

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»



Сумський державний університет

Теорія систем в екології

Підручник



Суми
Сумський державний університет
2015

УДК 303.732.4:502.13:519.876.2(075.8)

ББК 28.071

ТЗЗ

Авторський колектив:

Ю. Г. Масікевич, доктор біологічних наук, професор (Чернівецький факультет НТУ «ХП»);

О. В. Шестопапов, кандидат технічних наук, доцент (НТУ «ХП»);

А. А. Негадайло, кандидат технічних наук, доцент (Чернівецький факультет НТУ «ХП»);

Л. Д. Пляцук, доктор технічних наук, професор (Сумський державний університет);

Л. Л. Гурець, кандидат технічних наук, доцент (Сумський державний університет);

Р. А. Васькін, кандидат технічних наук, доцент (Сумський державний університет)

Рецензенти:

Ю. В. Малюкін – доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент АН України, заступник директора Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України;

В. Ф. Мислицький – доктор біологічних наук, професор кафедри патофізіології Буковинського державного медичного університету

*Рекомендовано до видання
редакційно-видавничою радою
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
як підручник
(протокол № 2 від 12 грудня 2013 р.)*

Теорія систем в екології : підручник / Ю. Г. Масікевич, О. В. Шестопапов, ТЗЗ А. А. Негадайло та ін. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 330 с.

ISBN 978-966-657-568-8

У підручнику викладені основи теорії систем і системного аналізу, необхідні під час дослідження різних міждисциплінарних проблем, їх системно-синергетичних основ і зв'язків, а також теоретичні, методичні й практичні питання вирішення конкретних екологічно спрямованих завдань за допомогою загального системного підходу і методів системного аналізу екологічних процесів.

Цей підручник рекомендований для підготовки кваліфікованих фахівців із природоохоронної діяльності, пов'язаної з організацією раціонального природокористування, системним аналізом, дослідницькою діяльністю, управлінням екологічними процесами і прийняттям рішень.

Призначений для студентів-екологів вищих навчальних закладів.

УДК 303.732.4:502.13:519.876.2(075.8)

ББК 28.071

© Масікевич Ю. Г., Шестопапов О. В.,
Негадайло А. А. та ін., 2015

© Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
Сумський державний університет, 2015

ISBN 978-966-657-568-8

ЗМІСТ

Вступ	С. 6
ЧАСТИНА ПЕРША ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ СИСТЕМ В ЕКОЛОГІЇ	
1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ СИСТЕМ	
1.1 Історія розвитку вчення про системи.....	9
1.2 Зв'язок теорії систем з іншими науками.....	13
1.3 Поняття системи.....	15
1.4 Властивості систем.....	20
1.5 Класифікація систем.....	23
1.6 Системний аналіз та системний підхід як методології дослідження систем.....	34
1.7 Складність екологічних систем.....	42
Контрольні запитання і завдання до самостійної роботи до розділу.....	47
2 ЗАКОНОМІРНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ	
2.1 Структурно-функціональні рівні організації органічного світу.....	48
2.2 Ступені організації екосистем.....	58
2.2.1 Консорційні екосистеми.....	58
2.2.2 Парцелярні екосистеми.....	61
2.2.3 Біогеоценозні екосистеми.....	65
2.2.4 Ландшафтні екосистеми.....	68
2.2.5 Провінційні екосистеми.....	72
2.2.6 Біомні екосистеми.....	74
2.2.7 Субстратні екосистеми.....	77
2.2.8 Глобальна екосистема – біосфера.....	77
2.3 Енергетичний баланс екологічних систем та їх продуктивність.....	81
2.3.1 Енергетичний баланс екологічних систем.....	81
2.3.2 Біологічна продуктивність екологічних систем.....	93
2.4 Екологія популяцій.....	95
2.5 Екологічні фактори та їх вплив на життєдіяльність організмів.....	100
2.5.1 Поняття про екологічні фактори.....	100
2.5.2 Класифікація екологічних факторів та їх вплив на живі організми.....	102
2.5.3 Види дії екологічних чинників на організми.....	106
2.6 Екологічна ніша з позицій системного підходу.....	113
2.7 Природна динаміка та еволюція екосистем.....	118
2.7.1 Екологічна сукцесія.....	119
2.7.2 Еволюція екосистем.....	125
2.7.3 Флуктуації екосистем.....	128

2.8 Стійкість, стабільність та самоочищення екосистем.....	133
2.8.1 Механізми стійкості екологічних систем.....	133
2.8.2 Самоочищення екологічних систем.....	141
2.9 Системний аналіз самоочищення біотехноценозу.....	148
2.10 Основні закони функціонування екологічних систем.....	158
Контрольні запитання і завдання до самостійної роботи до розділу.....	167
3. МЕТОДОЛОГІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ДОВКІЛЛЯ	
3.1. Суть і завдання системного аналізу.....	168
3.2. Основні принципи системного аналізу.....	169
3.3. Етапи і послідовність системного аналізу.....	169
3.4 Методика проведення системного аналізу.....	177
3.5 Методи системного аналізу.....	178
3.5.1. Неформальні методи.....	178
3.5.2. Формалізовані методи.....	181
3.6 Методологія побудови або ідентифікації складних систем.....	183
3.7 Опис системи на вербальному рівні.....	185
3.7.1 Історична форма опису системи.....	186
3.7.2 Предметна форма опису системи.....	187
3.7.3 Функціональна форма опису системи (функціональний аналіз)	189
Контрольні запитання і завдання до самостійної роботи до розділу.....	190
4. ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ І ПРОЦЕСІВ	
4.1. Поняття «модель» і «моделювання». Абстрактна модель системи довільної природи.....	191
4.2 Класифікація моделей.....	193
4.3 Властивості моделей.....	198
4.4. Підходи до фізичного і математичного моделювання.....	201
4.5 Узагальнений алгоритм побудови математичної моделі.....	211
4.6. Формалізовані процедури системного аналізу.....	213
4.6.1. Аналіз та синтез у теорії пізнання і системному аналізі.....	213
4.6.2. Декомпозиція та агрегація.....	213
4.6.3. Процедура декомпозиції. Алгоритм декомпозиції.....	214
4.6.4 Агрегування.....	216
Контрольні запитання і завдання до самостійної роботи до розділу.....	219

ЧАСТИНА ДРУГА
ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ СИСТЕМ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ
ЕКОЛОГІЧНИХ ЗАДАЧ

5. ЕЛЕМЕНТИ ЯКІСНОЇ ТЕОРІЇ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ	
5.1 Особливості математичного моделювання екологічних процесів.....	220
5.2 Моделі екологічних систем, що описуються одним диференціальним рівнянням першого порядку. Стійкість. Метод Ляпунова.....	224
5.3 Моделі, що описуються системами диференціальних рівнянь другого порядку. Фазова картина системи. Визначення стійкості....	234
5.4 Лінійні системи. Типи особливих точок: вузол, сідло, фокус, центр	240
5.5. Дослідження стійкості нелінійних систем за методом Ляпунова.....	248
5.5.1 Кінетичні рівняння Лотки та модель Вольтерра.....	250
Контрольні запитання і завдання для самостійної роботи до розділу.....	258
6 ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ В ЕКОЛОГІЇ	
6.1 Основні принципи використання загальносистемного підходу до моделювання екологічних систем.....	259
6.2 Детерміністські моделі.....	263
6.3 Стохастичні моделі.....	270
6.4 Екологічні тригери, автоколивання, граничні цикли.....	276
6.5 Динамічні моделі в екології.....	282
6.6 Узагальнені моделі взаємодії двох видів.....	293
6.7 Матричні моделі.....	299
6.8 Оптимізаційні моделі.....	306
6.9 Ігрові моделі.....	310
6.10 PEST- та SWOT-аналіз в управлінні екологічними системами.....	317
Контрольні запитання і завдання до самостійної роботи до розділу.....	326
Перелік скорочень.....	327
Список використаної літератури.....	328
Список рекомендованої літератури.....	329

Вступ

Сучасний системний аналіз є прикладною наукою, націленою на з'ясування причин реальних ускладнень, що виникли перед «власником проблеми» (звичайно це конкретна організація, установа, підприємство, колектив, особа), і на вироблення варіантів їх усунення. У найбільш розвиненій формі системний аналіз містить і безпосереднє, практичне поліпшувальне втручання в проблемну ситуацію.

Системність не повинна здаватися якимось нововведенням, останнім досягненням науки. Системність є загальна властивість матерії, форма її існування, а отже, і невід'ємна властивість людської практики, включаючи мислення. Проте будь-яка діяльність може бути менш або більш системною. Поява проблеми – ознака недостатньої системності; вирішення проблеми – результат підвищення системності.

Вражаючі успіхи в розвитку науки і техніки на якийсь час створили ілюзію повної незалежності людини від природи, підвладності того, що оточує людину. Останнім часом на зміну таким уявленням приходять суспільне усвідомлення зацікавленості людства у всьому, що відбувається в довкіллі, пізнання необхідності не «підкорення природи», а розумної її експлуатації. Характерною межею нової системи поглядів на взаємовідносини людини з природою є розуміння можливості необоротних наслідків нашої діяльності, а звідси гостра потреба в прогнозуванні, прогнозі безпосередніх і віддаленіших наслідків нашого втручання в «природний порядок речей».

Існує декілька підходів до прогнозу поведінки складних систем: використання інтуїції і багатого досвіду дослідника, порівняння з даними експериментів, виконаних на тотожних або подібних системах, і, нарешті, математичне моделювання. В екологічних дослідженнях повинні використовуватися (і використовуються) всі можливі підходи. Проте у наш час масштаби та характер втручання людини у природні екосистеми такі безпрецедентні, що інтуїція дослідника часто-густо відмовляє. Можливості ж експериментування з природними екосистемами зі зрозумілих причин більш ніж обмежені.

На сьогодні існують три системні поняття: «теорія систем», «системний аналіз», «системний підхід». «Теорія систем» досліджує загальні властивості, що мають будь-які складні системи незалежно від їх природи (фізичної, біологічної, соціальної тощо). «Системний аналіз» – це здебільшого прикладна наукова дисципліна, яка розробляє методи вирішення проблем, що виникають у складних системах. Це методологічна дисципліна, основними результатами якої є розроблення і класифікація методів аналізу систем та вирішення проблеми. «Системний підхід» – це поняття, яке полягає у тому, що для вирішення будь-якої проблеми потрібно підходити системно, тобто розглядати в цілому систему, в якій виникла дана проблема з урахуванням цілей та функцій системи, її структури, всіх зовнішніх та внутрішніх зв'язків.

Фахівці в галузі охорони навколишнього середовища й збалансованого природокористування мають бути добре обізнаними з методами досліджень, що застосовуються на різних стадіях системного аналізу довкілля, таких як:

- 1) пошук можливих варіантів вирішення проблеми;
- 2) визначення наслідків використання (застосування) кожного з можливих варіантів рішення;
- 3) застосування об'єктивних тверджень або критеріїв, що вказують, чи є одне рішення більш переважним за інше. При цьому не передбачається, що використовувані способи вибору рішення є єдиними або що вони не мають невизначеностей;
- 4) надання інформації особі, яка приймає рішення (ОПР), разом з описом ефектів, що отримуються при зміні параметрів системи, при зміні системи оцінок або при заміні одного варіанта рішення на інший.

Метою курсу є забезпечення загальноінженерної підготовки фахівців у галузі аналізу складних систем навколишнього середовища як основи для вивчення професійно орієнтованих дисциплін і надання теоретичних знань та практичних навичок із системного аналізу в достатньому для професійної спеціалізації обсязі.

Причинами малої ефективності застосування системного аналізу як методу розроблення раціональних програм управління складною системою (навколишнім середовищем) є невміння дослідників подавати інформацію у формі, зрозумілій для особи, що ухвалює рішення; переоцінка можливостей системного аналізу; неадекватність існуючих даних; невизначеність і труднощі встановлення причинно-наслідкових взаємозв'язків між змінними, що описують стан довкілля; досить поширена думка про неможливість використання аналітичних методів дослідження під час вирішення проблем навколишнього середовища; нездатність окремих дослідників відобразити цілі планування так, щоб можна було оцінити прогрес у вирішенні поставленого завдання.

За своїм змістом і призначенням методами системного аналізу є способи конструювання безлічі варіантів вирішення проблеми, яка зачіпає інтереси осіб, що не збігаються або навіть є суперечливими, і вибору єдиного якнайкращого з усіх точок зору компромісного варіанта.

Підручник «Теорія систем в екології» призначений для вивчення курсу «Теорія систем в екології», а також для виконання дипломних проектів.

Мета вивчення цієї дисципліни: надання загальноінженерної підготовки (теоретичні знання й практичні навички) в галузі аналізу складних систем як основи для вивчення професійно орієнтованих дисциплін.

Предмет дисципліни: системні підходи до аналізу складних систем і вирішення складних проблем в умовах неповної і різномірної інформації.

Унаслідок вивчення дисципліни студент повинен:

- знати теоретичні засади й методи аналізу складних систем і проблем в умовах неповної інформації;
- уміти застосовувати теоретичні знання й надбані вміння в практичних проблемах в умовах недостатнього інформаційного забезпечення.

Підручник враховує той факт, що дисципліна належить до дисциплін циклу професійної та практичної підготовки спеціаліста та магістра. Це надає можливості підвищити якість підготовки студентів до практичної діяльності у галузі раціонального природокористування.

Матеріал підручника розрахований на викладання лекційних та практичних занять, а також використання його у ході підготовки студентами індивідуального завдання та самостійної роботи.

Структура навчального підручника дозволяє студентам перевірити та поглибити свої знання, для чого після кожного розділу наводяться запитання та завдання для самостійної роботи.

Подана в підручнику інформація дозволяє студентам знати основні інструменти: особливості структурно-функціональних зв'язків природних систем, основні принципи системного аналізу і теорії прийняття рішень, методи аналізу, синтезу та моделювання екологічних процесів, уміти застосовувати комплексний підхід під час розроблення заходів підвищення екологічної безпеки.

ЧАСТИНА ПЕРША

ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ СИСТЕМ В ЕКОЛОГІЇ

1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ СИСТЕМ

1.1 Історія розвитку вчення про системи

Поняття системи з'явилося дуже давно. Ще в період античності виникли основні ідеї цілісності світу й окремих його частин, їх розвитку, структури, взаємодії та зв'язку між елементами. Відомі численні спроби вчених Давньої Греції (Анаксимандр, Аристарх, Аристотель, Демокрит, Піфагор, Платон, Фалес та інші) створити єдину систему світобудови. Результати систематизації знань у низці конкретних наук, отримані давньогрецькими вченими, відіграли велику роль у розвитку науки, а в окремих випадках зберігають своє значення дотепер. Серед них – геометрія Евкліда, праці Аристотеля з різних галузей науки (фізика, біологія, логіка й інше), атомізм Демокрита та Епікура тощо. Медичною школою Гіппократа було створено вчення про цілісність людського організму, систему спостереження й вивчення хворих. Платоном і Аристотелем запропоновано перші теорії державного устрою.

У період розквіту Римської імперії Гіппархом та Птолемеєм розроблено, можливо, першу серйозну математичну модель складної системи. Вони розробили математичну теорію, що описує рух Сонця й відомих на той час планет по небосхилу. Книга Птолемея, відома нам в арабському перекладі як «Альмагест», в оригіналі мала заголовок «Математична система». У Давньому Римі сформувалася також система правових норм – так зване «римське право».

Велике значення для формування системних уявлень і підходів у різних галузях знань відіграв перехід найбільш розвинених країн давнього світу від язичества до монотеїстичних релігій – християнства, мусульманства, іудаїзму, буддизму, конфуціанства. З-поміж середньовічних доробок системних уявлень можна назвати геліоцентричну систему М. Коперніка – Т. Браге – Й. Кеплера, дослідження будови й функціонування органів людського тіла А. Везалієм, опис системи кровообігу й серцевої діяльності у тварин, а також дослідження ембріонального розвитку птахів і ссавців У. Гарвеєм.

Провісниками нового етапу розвитку системних уявлень стали відкриття й дослідження клітинної будови живих організмів Р. Гуком (1665), розвиток ідеї біологічної еволюції Г. В. Лейбніцем, Ж. Бюффоном, М. В. Ломоносовим, К. Ф. Вольфом, Е. Жоффруа Сент-Ілером, Ж.-Б. Ламарком та іншими вченими кінця XVII – початку XIX століть. І. Кант (1755) розробив першу наукову теорію утворення й розвитку Сонячної системи. Важливим етапом формування системного підходу стала побудова А. М. Ампером класифікації наук (1834–1843). Він виділив спеціальну науку про управління державою і назвав її кібернетикою. При цьому Ампер розглядав управління державою як приклад управління складною системою взагалі. Його ідеї розвинув Б. Трентовський (1843), який звернув увагу на системний характер великих і малих соціальних груп, обговорював проблему ефективності управління, необхідність виділення

цілей та алгоритмізації управлінської діяльності.

У XIX столітті кібернетика як наука про управління складними системами не набула подальшого розвитку. Однак у цей період відбувалося поступове накопичення й узагальнення знань про конкретні природні, технічні й суспільні системи. Велике значення для становлення загальносистемних уявлень мали такі досягнення: теорія еволюції Ч. Дарвіна (1842–1853), що дала змогу виявити закономірності видоутворення в живій природі, ввела поняття адаптації й конкуренції, започаткувала розгляд процесів розгалуження при розвитку складних систем; розвиток фізики і насамперед термодинаміки, що сформулювала поняття відкритих і замкнених систем, проаналізувала роль внутрішніх і зовнішніх факторів у розвитку фізичних систем, увела поняття рівноваги складних систем, розробила методи його вивчення. Були сформульовані в загальній формі основні закони збереження (енергії, імпульсу, моменту імпульсу, маси, заряду), а також принцип Ле-Шательє, що встановлює напрям зміни стану системи при зовнішньому впливі; Д. І. Менделєєв (1869) створив періодичну систему хімічних елементів, яка стала підґрунтям для їх подальшого вивчення і класифікації; Є. С. Федоров довів (1891), що вся різноманітність кристалічних речовин у природі може бути зведена лише до 230 різних типів кристалічних ґраток. Надалі він узагальнив цей висновок і показав, що різні природні, технічні, суспільні й інші системи реалізуються з невеликої кількості вихідних форм. Він установив також, що головним засобом підвищення життєздатності різних систем є їх здатність до пристосування (життєва рухливість).

Наступний важливий етап у розвитку теорії систем пов'язаний з ім'ям О. О. Богданова (Малиновського). Він дослідив (1911–1925) загальні закономірності організації різних систем, співвідношення стійкості й мінливості, значення зворотних зв'язків, співвідношення цілей різних рівнів організації, особливості відкритих систем. О. О. Богданов розглянув також проблему виникнення криз, що викликають структурні перебудови систем, і підкреслив роль моделювання і математики як потенційних методів дослідження систем різного типу. Його ідеї набули подальшого розвитку в працях радянських дослідників І. І. Шмальгаузена, П. К. Анохіна, В. М. Беклемішева та істотними для становлення системології були також розвиток математичної теорії стійкості розв'язків диференціальних рівнянь, формулювання основних положень квантової механіки й генетики, становлення нових розділів фізики, зокрема атомної, статистичної, хімічної, біофізики, фізики твердого тіла, астрофізики, фізики океану та атмосфери.

Сформульовані Н. Бором та В. Гейзенбергом у квантовій механіці принципи додатковості та невизначеності мають, як було показано пізніше, більш загальне значення й можуть бути застосованими до систем різної природи. Зокрема, із принципу додатковості випливає неможливість одержати повну інформацію про систему в рамках якогось одного підходу, одного набору понять і параметрів. Для отримання найбільш повної інформації необхідно використовувати різні підходи, що доповнюють один одного. Принцип невизначеності стверджує, що деякі характеристики складної системи

неможливо одночасно точно кількісно оцінити. Велике значення для загальної теорії систем мали результати досліджень В. І. Вернадського й інших учених, які показали, що сучасні земна кора й атмосфера є продуктом життєдіяльності тварин і рослин, що вони змінюються з часом і мають власну історію.

Важливу роль відіграли також концепція ноосфери В. І. Вернадського, теорія біоценозів, теорія еволюції Всесвіту, теоретичні розробки, пов'язані зі створенням складних технічних систем – електростанцій, літаків, засобів зв'язку, електронних обчислювальних машин тощо.

Етапною подією в розвитку системних уявлень стала публікація книги Н. Вінера «Кібернетика» (1948). Спочатку він визначив кібернетику як науку про управління та зв'язок у тваринах і машинах. Однак незабаром він показав, що з позицій кібернетики можливий також аналіз процесів, які відбуваються у суспільстві. Сучасне місце кібернетики в системі наукових знань можна зрозуміти з таких визначень: кібернетика – це наука про оптимальне управління складними динамічними системами (А. І. Берг); кібернетика – це наука про системи, що сприймають, зберігають, використовують і переробляють інформацію (А. М. Колмогоров). Кібернетичні методи так само, як методи теорії систем, системного аналізу й математичного моделювання, можуть застосовуватися для дослідження об'єктів, традиційно закріплених за іншими науками. Це потрібно розглядати не як втручання неспеціалістів, а як новий погляд на них, який доповнює результати, що можуть бути отримані при традиційному підході до їх вивчення. При цьому відбувається взаємне збагачення наук. З одного боку, кібернетика, системний аналіз і математичне моделювання одержують можливість розвивати свої концепції та методи. З іншого – отримувані результати дають змогу прояснити багато проблем конкретних наук і сформулювати нові проблеми та завдання. Із кібернетикою пов'язані такі досягнення, як типологізація моделей систем, виявлення особливої ролі зворотних зв'язків у системах, формулювання й застосування принципу оптимальності в управлінні ними та їх синтезі, усвідомлення інформації як загальної властивості систем і розроблення методів кількісного опису, розвиток методології математичного моделювання та математичного експерименту за допомогою ЕОМ.

Паралельно з кібернетикою розвивалася загальна теорія систем. Загальна теорія систем була запропонована Л. фон Берталанфі в 30-ті роки ХХ ст. Ідея наявності загальних закономірностей за взаємодії великої, але не нескінченної кількості фізичних, біологічних і соціальних об'єктів уперше була висловлена Берталанфі в 1937 році на семінарі з філософії в Чиказькому університеті. Однак уперше його публікації на цю тему з'явилися лише після війни. Основною ідеєю загальної теорії систем, запропонованої Берталанфі, є визнання ізоморфізму законів, що управляють функціонуванням системних об'єктів.

У 50–70-ті роки ХХ ст. було запропоновано низку нових підходів до побудови загальної теорії систем такими науковцями, як М. Месарович, Л. Заде, Р. Акофф, Дж. Клір, А. І. Уйюмов, Ю. А. Урманцев, Р. Калман, С. Бір, Е. Ласло, Г. П. Мельников та ін. Загальною рисою цих підходів було

розроблення логіко-концептуального і математичного апарату системних досліджень. Методологія системного мислення, що розробляється в Московському методологічному гуртку Г. П. Щедровицьким, його учнями та співробітниками є подальшим продовженням і розширенням Загальної теорії систем.

Фон Берталанфі також увів поняття і дослідив відкриті системи – системи, що постійно обмінюються речовиною та енергією із зовнішнім середовищем. Один із можливих шляхів у реалізації він вбачав у пошуку структурної подібності законів, установлених у різних конкретних науках. Найважливішими досягненнями Л. фон Берталанфі були узагальнення поняття відкритої системи та усвідомлення значення обміну речовиною, енергією й інформацією між системою та навколишнім середовищем для її розвитку.

У другій половині ХХ століття серйозні досягнення в розвитку теорії систем були пов'язані зі становленням синергетики, теорії катастроф і термодинаміки нерівноважних процесів. Зокрема, бельгійським фізиком І. Пригожиним та його школою було розкрито основні механізми самоорганізації складних систем. Ними обґрунтовано також ієрархічність рівнів організації нерівноважних систем, незвідність одна до одної закономірностей різних рівнів організації, наявність на кожному рівні як детермінованих, так і недетермінованих процесів. І. Пригожин показав, що матерія не є пасивною субстанцією. Рано чи пізно внаслідок взаємодії з навколишнім середовищем будь-яка система опиняється в нестійкому нерівноважному стані, вихід з якого супроводжується спонтанною активністю системи, що призводить і до внутрішньої перебудови. У такі моменти принципово неможливо визначити, у якому напрямі та як саме зміниться структура системи.

Якщо говорити про першу половину ХХ століття, то можна назвати одиничні (а не масові) приклади використання елементів методології системного підходу до розв'язання деяких значних економічних, соціальних та політичних завдань, наприклад план ГОЕЛРО. При цьому їх застосовували ніби навмання або наосліп, тому що нова наукова дисципліна, яка оформилась у вигляді методології системного аналізу, з'явилася значно пізніше. Виключно як робочий інструмент розв'язання комплексних проблем з урахуванням подальшої їх перспективи системний аналіз було розроблено кількома науковими закладами США на початку 60-х років ХХ століття за завданням військових відомств. У колишньому СРСР методологію системного аналізу стали застосовувати фактично відразу ж після її зародження. При Президії АН СРСР уже наприкінці 60-х років було створено Комітет системного аналізу, що об'єднував і координував роботи з його розвитку й використання, вийшли перші наукові монографії, в яких досліджувалися проблеми застосування системного аналізу в різних галузях. Системний аналіз як науковий метод та інструмент пізнання може бути використаний не лише для вивчення глобальних проблем, що стоять перед світом (екологічних, демографічних, продовольчих, транспортних, енергетичних та інших), а й під час вирішення багатьох менш масштабних проблем у рамках однієї країни, регіону, галузі, промислового об'єднання й навіть окремого підприємства.

1.2 Зв'язок теорії систем з іншими науками

Навколишній світ і діяльність людини з точки зору сучасної науки мають системний характер.

Системність – це загальна властивість об'єктивно існуючої єдності світу, його *структурованості* та *взаємозв'язку*. Системність як загальна властивість світу виявляється не лише в системності матеріального світу, а й системності пізнавальної та практичної діяльності. Системність пізнавальної діяльності полягає в тому, що наші знання структуровані, становлять ієрархічну систему взаємозв'язаних моделей світу. Системність практичної діяльності полягає у використанні взаємозв'язаних процедур для перетворення навколишнього середовища й людини, у врахуванні різних сторін діяльності та всіх можливих її наслідків.

Структурованість світу полягає в його дискретності та впорядкованості. Матеріальний світ складається з величезної кількості різноманітних дискретних частин. Ці частини утворюють певні структури, що розміщуються на різних рівнях. Це такі рівні, як, наприклад, рівень елементарних частинок, атомів, молекул, організмів, популяції, суспільства, планети, планетних систем, галактики, метagalaktiki. Елементарні частинки світобудови, а їх тепер відомо понад 30 (якщо враховувати віртуальні, з коротким життєвим циклом, частинки – понад 100), утворюють атоми, які є основою будови всіх стабільних об'єктів навколишнього світу. Елементарні частинки (фотони, протони, електрони, мезони, баріони та ін.) також мають свою структуру. Є всі підстави стверджувати, що вони складаються із частинок матерії, що мають назву кварків. Існує обмежена кількість кварків з такими характеристиками, як маса, електричний та баріонний заряди, дивність, забарвлення, спин та ін. Вони, вступаючи у взаємодію, групуються й утворюють всі інші «елементарні» частинки. З дискретними формами матерії нерозривно зв'язані неперервні форми, а саме електричні, магнітні, гравітаційні поля, поля ядерних та слабких взаємодій. Перервні й неперервні форми матерії також зв'язані між собою, оскільки носіями цих полів є певні дискретні частинки, які у взаємодії виявляють квантові й хвильові властивості.

Дискретні утворення матерії, будучи цілісними, незмінними, вступають у взаємодію, не втрачаючи своєї індивідуальності. У хімічних реакціях атоми залишаються незмінними, не руйнуються. У біологічних процесах молекули виступають як ціле. Клітини живих організмів, окремі органи діють як певні цілісні неподільні структурні одиниці. Кожен організм у зовнішньому середовищі також виступає як одне ціле. Тобто ми бачимо, що світ не є хаосом, а закономірно організованою ієрархією систем. Під структурованістю світу ми розуміємо якраз цю впорядкованість на різних рівнях і закономірні зв'язки між цими впорядкованими структурними рівнями. Причому різні рівні структурованості світу не зводяться до інших. Рівень атомів не зводиться до рівня елементарних частинок. Рівень організмів живого світу не зводиться до рівня окремих органів цих організмів тощо. Кожному рівневі властиві свої закономірності, свої взаємодії, свої характеристики.

Структурованість властива не лише матеріальним об'єктам, а й іншим сторонам матеріального світу, наприклад формам руху матерії. Ми знаємо такі форми руху, як механічна, теплова, хімічна, біологічна. Ці форми взаємозв'язані, вони знаходяться на різних рівнях структурованості світу, але вони також не зводяться одна до одної. Наприклад, підвищення температури будь-якого об'єкта призведе до механічного руху внаслідок зміни густини матерії (розширення), прискорення хімічних реакцій і т. п.

Взаємозв'язок об'єктів матеріального світу полягає у тому, що всі об'єкти матеріального світу взаємозв'язані між собою. Який би об'єкт ми не розглядали, він має безліч матеріальних, енергетичних або інформаційних зв'язків з іншими об'єктами. Жоден об'єкт не може бути ізольованим від великої кількості інших об'єктів. У сукупності всі об'єкти створюють певну цілісність, яка і є навколишнім світом.

Через те, що в навколишньому світі всі об'єкти пов'язані між собою, а кожна властивість можуть вивчати різні науки, існує певна кореляція теорії систем як методології вивчення матеріального світу з іншими науками. Різноманітні системи вивчає та використовує знання про системи і системність світу наука *системологія*, технічні та інформаційні системи управління та моделювання (математичне, інформаційне, технічне) відносять до *кібернетики*, системи-об'єкти та їх класифікацію розглядає *систематика*, системи та системне проектування розробляються в межах інженерних напрямків та спеціалізації технічних дисциплін, соціальні, екологічні та політекономічні системи розглядають на синтетичних рівнях відповідних продуктивних напрямків. Штучне виділення об'єктів розгляду на рівні псевдосистем є методологічним прийомом для можливості адекватного модельного опису на системному рівні формалізованого опису об'єктів за функціональними ознаками.

Сам Берталанфі вважав, що спільні цілі або методи з теорією систем частково мають такі наукові дисципліни:

- *кібернетика*, що базується на принципі зворотного зв'язку;
- *теорія інформації*, що вводить поняття інформації як певної величини, яку можна виміряти, і розвиває принципи передачі інформації;
- *теорія ігор*, що аналізує в рамках власного математичного апарату раціональну конкуренцію двох або більше протидіючих сил з метою досягнення максимального виграшу і мінімального програшу;
- *теорія прийняття рішень*, що аналізує раціональні варіанти вибору всередині людських організацій;
- *топология*, що містить несиметричні сфери, такі як *теорія мереж* і *теорія графів*;
- *факторний аналіз*, тобто процедури виділення факторів у багатозмінних явищах у соціології та інших наукових галузях;
- *загальна теорія систем* у вузькому смислі, що має на меті вивести із загальних визначень поняття «система», низку понять, характерних для організованих цілих, таких як взаємодія, сума, механізація, централізація, конкуренція, фінальність і т. д., і застосувати їх до конкретних явищ.

Також виділяється зв'язок теорії систем у прикладній науці, яку інколи називають наукою про системи або системною наукою (*Systems Science*). Цей напрямок пов'язаний з автоматикою. У прикладній науці про системи виділяють такі галузі:

- *системотехніка (Systems Engineering)*, тобто наукове планування, проектування, оцінку і конструювання систем «людина – машина»;
- *дослідження операцій (Operations research)*, тобто наукове управління існуючими системами людей, машин, матеріалів, грошей тощо;
- *інженерна психологія (Human Engineering)*;
- *теорія польової поведінки* (Курт Левін);
- на основі систем Берталанфі побудована *теорія інтегральної індивідуальності* (Вольф Соломонович Мерлін).

1.3 Поняття системи

Будь-який неелементарний об'єкт можна розглядати як підсистему цілого (до якого належить даний об'єкт), виділивши в ньому окремі частини й визначивши взаємодії цих частин, службовців якої-небудь функції.

Система (від давньогр. σύστημα – «сполучення») – множина взаємозв'язаних елементів, відокремлена від середовища, що взаємодіє з ним, як єдине ціле. Проте в системному аналізі використовують різні визначення поняття «система».

Сам Л. фон Берталанфі визначав систему як сукупність елементів, що знаходяться у визначених відношеннях один з одним і з середовищем.

Згідно із визначенням В. І. Вернадського система – це сукупність різних функціональних одиниць (біологічних, людських, інформаційних тощо), які пов'язані із середовищем і слугують для досягнення певної загальної мети шляхом дії над матеріалами, енергією, біологічними явищами та керування ними.

Однак такі визначення не дають можливості відрізнити систему від несистем, оскільки кожен об'єкт знаходиться в безпосередньому або опосередкованому зв'язку з іншими об'єктами матеріального світу. Наприклад, залежно від мети дослідження як система може бути прийнятий певний вид організмів, або популяція, або окремий індивід, або його орган і т. д. Відношення об'єктів у системі повинні володіти визначеними властивостями й однорідністю відносин і зв'язків елементів. Однак навіть обмеження зв'язків у системі не робить визначення системи досить чітким. Вчені дійшли висновку, що систему потрібно обмежити якимось ступенем відносин, що дало б системі визначеності й дало б можливість розрізнити її в конкретних дослідженнях. Тому, як правило, дослідники *інтуїтивно відкидають визначену кількість сполучення змінних*, залишаючи лише підмножину тих зв'язків, елементів і відносин, що необхідні для конкретного дослідження.

Зокрема, за В. М. Сагатовським, система – це скінченна множина функціональних елементів і відношень між ними, які виокремлено із середовища відповідно до певної мети в межах визначеного часового інтервалу.

Згідно з Ю. І. Черняком система – це відображення у свідомості суб'єкта (дослідника, спостерігача) властивостей об'єктів та їх відношень у вирішенні завдання дослідження, пізнання. Відома також велика кількість інших визначень поняття «система», що використовуються залежно від контексту, галузі знань та цілей дослідження.

Відтак дати визначення системи можна через такі чотири ознаки:

- 1) система являє собою цілісний комплекс взаємозв'язаних елементів;
- 2) система утворює єдність із середовищем;
- 3) як правило, системи, що досліджуються, є елементами більш високого класу;
- 4) елементи будь-якої системи, що досліджується, у свою чергу, можуть бути системами нижчого порядку.

Підбиваючи підсумки, дамо таке узагальнене визначення системи: *це структурно-функціональна цілісна єдність множини взаємозв'язаних між собою елементів, яку виокремлено із середовища відповідно до певної мети в межах визначеного часового інтервалу.*

Розглянемо деяку систему S (рис. 1.1).

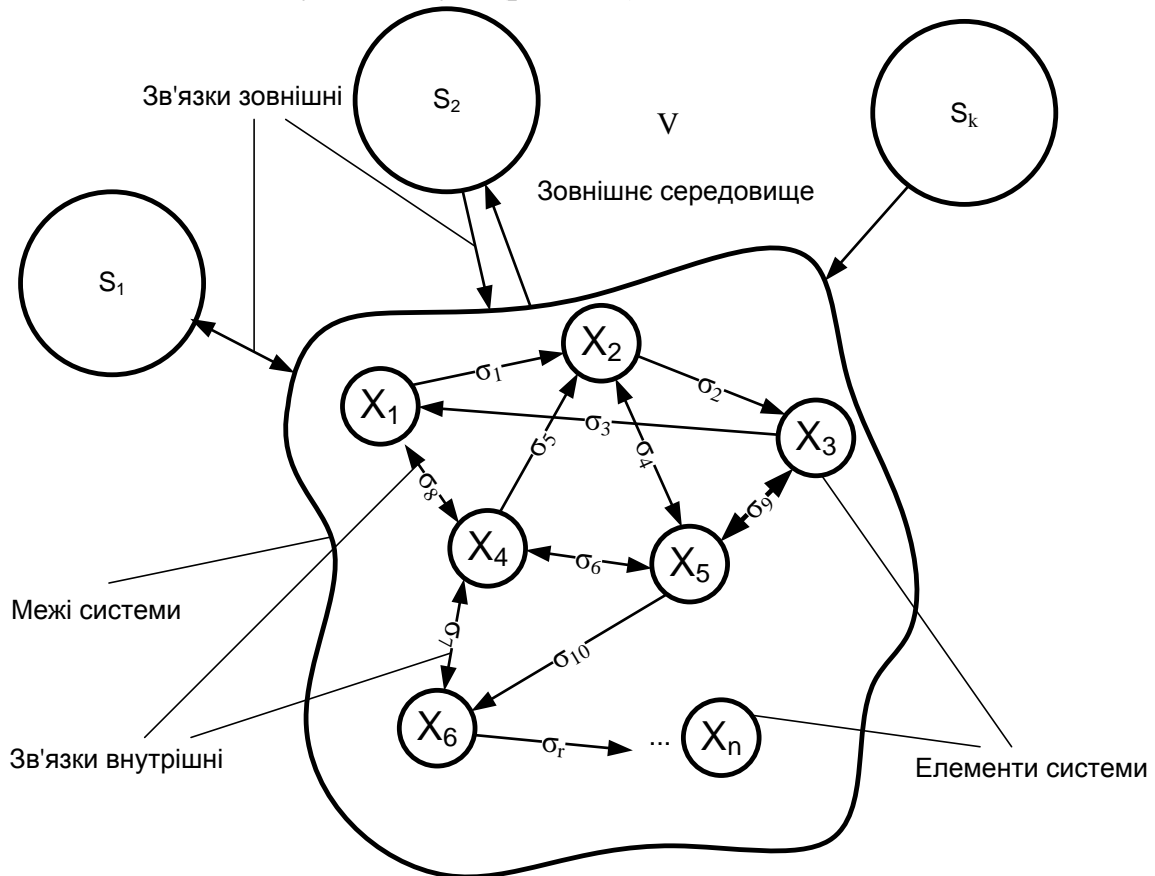


Рисунок 1.1 – Модель системи

Кожна система характеризується певним складом і структурою.

Структурою системи називають сукупність необхідних і достатніх для досягнення цілей відношень (зв'язків) між її компонентами (елементами). При цьому в складних системах структура відображає не всі елементи та зв'язки між

ними, а лише найбільш істотні, що мало змінюються при поточному функціонуванні системи й забезпечують існування системи та її основних властивостей. Структура характеризує організованість системи, стійку упорядкованість її елементів і зв'язків. Структурні зв'язки є відносно незалежними від елементів і можуть виступати як інваріант під час переходу від однієї системи до іншої, переносячи закономірності, виявлені й відбиті у структурі однієї з них, на інші.

Елементи, що входять до складу системи, позначаються символами X_1, X_2, \dots, X_n , де n – кількість елементів.

Елементом системи називають найпростішу складову частину системи, яку умовно розглядають як неподільну. Поняття неподільності є умовним та визначається залежно від конкретних завдань. Наприклад, при розгляді організму як системи з метою визначення стану його здоров'я немає потреби враховувати молекулярну будову його клітин, а достатньо виділити органи як елементи організму.

Елемент – це відносно самостійна частина системи, яка на даному рівні аналізу розглядається як одне ціле зі своєю поведінкою, спрямованою на реалізацію властивої цьому елементу функції.

Характеристиками елемента є:

- елемент виконує одну чи декілька функцій;
- елемент має свої властивості, свою поведінку;
- елемент використовується у певному контексті.

Важливим поняттям є *цілісність елемента*. Вона залежить від внутрішніх і зовнішніх факторів. Такими факторами є зв'язки елемента та інтенсивність обміну. Внутрішні фактори – зв'язки та інтенсивність взаємодії частин елемента. Зовнішні фактори – це зв'язки елемента з іншими елементами і взаємодія між ними. Цілісність елемента визначається співвідношенням внутрішніх і зовнішніх факторів. Коли внутрішні фактори переважають над зовнішніми, то елемент є стійким, в іншому разі він може бути або зовсім нестійким, або мати певну відносну стійкість. У теорії систем ці властивості виражають більш формалізованою мовою на основі математичної теорії множин.

Саме поняття «елемент» трактується подвійно. З одного боку, елемент – це абсолютна категорія, що має конкретний зміст, а з другого – поняття відносне. Поняття «елемент» як абсолютна категорія означає, що це початкова, неподільна, найменша частинка системи. Ми вважаємо, що така частинка існує і в такому відношенні поняття «елемент» має абсолютне значення. З іншого боку, поняття «елемент» є відносним, оскільки пов'язане з рівнем розгляду і деталізації системи із завданнями дослідження. Залежно від цілей розгляду, точки зору елементом може бути та чи інша частина системи, той чи інший її компонент. Зі зміною точки зору поняття «елемент» змінюється, тобто категорія «елемент» залежить від розгляду системи і в цьому полягає відносність поняття «елемент».

Складову частину системи, у якій можна виокремити інші складові, називають *підсистемою*.

У сукупності елементи й підсистеми називають компонентами системи. Поділ системи на окремі елементи й підсистеми є неоднозначним і залежить від мети й конкретних завдань дослідження.

Множина

$$X = \{ X_1, X_2, \dots, X_n \}, \quad (1.1)$$

що складається з усіх внутрішніх елементів, називається *складом системи S*.

Елементи X_1, X_2, \dots, X_n пов'язані між собою різноманітними зв'язками, що мають назву системоутворювальних, оскільки саме вони перетворюють набір елементів у цілісну систему.

Зв'язком називають співвідношення між компонентами системи, що базуються на взаємозалежності й взаємообумовленості. Поняття «зв'язок» характеризує чинники виникнення й збереження цілісності та властивостей системи. З формального погляду зв'язок визначають як обмеження кількості ступенів вільності компонент системи. Зв'язок можна охарактеризувати за напрямом, силою, характером (видом). За першою ознакою зв'язки поділяють на спрямовані та неспрямовані. За другою – на сильні та слабкі. Іноді для цього вводять шкалу сили зв'язків для конкретної задачі. За характером (видом) вирізняють зв'язки підпорядкування, породження (генетичні), рівноправні (байдужі), управління. Деякі із цих класів можна поділити більш детально: наприклад, зв'язки підпорядкування можуть бути типу «рід – вид», «частина – ціле»; зв'язки породження – типу «причина – наслідок». Зв'язки можна класифікувати також за місцем розташування (внутрішні та зовнішні), спрямованістю процесів у системі в цілому чи в окремих її підсистемах (прямі та зворотні) та за деякими більш конкретними ознаками. Зв'язки в конкретних системах можуть бути одночасно охарактеризовані за кількома з названих ознак.

Сукупність усіх зв'язків між елементами системи утворюють її структуру:

$$\Sigma = \{ \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r \}. \quad (1.2)$$

Кожна система існує у зовнішньому (для неї) середовищі V :

$$V = \{ S_1, S_2, \dots, S_k \}. \quad (1.3)$$

Сукупність усіх систем, що знаходяться в безпосередніх зв'язках із даною системою, є зовнішнім середовищем системи S : $V = S_1, S_2, \dots, S_k$; де k – кількість систем, що безпосередньо пов'язані з даною системою.

Склад, структура і зовнішнє середовище можуть змінюватися з плином часу, що можна записати таким чином:

$$V = V(t) = \{ S_1(t), \dots, S_k(t) \}, \quad (1.4)$$

$$X = X(t) = \{ X_1(t), \dots, X_n(t) \}, \quad (1.5)$$

$$\Sigma = \Sigma(t) = \{ \sigma_1(t), \dots, \sigma_r(t) \}. \quad (1.6)$$

Функцією системи S називається закон (сукупність правил) F , згідно з яким залежно від зовнішніх факторів $V(t)$ відбуваються зміни у часі складу $X(t)$ та структури $\Sigma(t)$ системи S .

Таким чином, системою $S(t)$, що функціє у зовнішньому середовищі $V(t)$, називається об'єкт

$$S(t) = S(X(t), \Sigma(t), V(t), F), \quad (1.7)$$

утворений елементами множини $X(t) = \{X_1(t), \dots, X_n(t)\}$, що пов'язані між собою певними зв'язками, які утворюють структуру $\Sigma(t)$ системи S . Як склад, так і структура $\Sigma(t)$ системи змінюється з часом згідно з функцією F .

Якщо система здатна переходити з одного стану до іншого з плином часу, то говорять, що вона має певну *поведінку*. Цим поняттям користуються, коли не відомі закономірності (правила) переходу з одного стану до іншого. Тоді зазначають, що система має якусь поведінку, та з'ясовують її характер, механізми, алгоритми тощо. *Стан системи* – це сукупність значень її параметрів (властивостей) у певний момент часу. Його визначають або через вхідні впливи й вихідні сигнали (результати), або через макропараметри, макрвластивості системи (тиск, швидкість, температура, уставний фонд тощо).

Своєю поведінкою система прямує до певної мети. *Метою* системи називають її бажаний майбутній стан. Залежно від стадії пізнання об'єкта, етапу системного аналізу в цей термін вкладають різний зміст – від ідеальних устремлінь, що виражають активну свідомість окремих осіб або соціальних систем, до конкретних цілей – результатів. У першому випадку можуть формулюватися цілі, досягнення яких є неможливим, але до яких можна безупинно наближатись. У другому – цілі мають бути досяжними в межах певного інтервалу часу й формулюються іноді навіть у термінах кінцевого продукту діяльності. Часто розрізняють суб'єктивні та об'єктивні цілі. Суб'єктивна мета – це суб'єктивний погляд дослідника (керівника, власника) на бажаний майбутній стан системи. Об'єктивна мета – це майбутній реальний стан системи, тобто стан, до якого переходитиме система при заданих зовнішніх умовах і керівних впливах. Суб'єктивні та об'єктивні цілі системи у загальному випадку можуть розрізнятися. Зокрема, вони не збігаються, якщо система є погано дослідженою або якщо суб'єкт, який визначає цілі, недостатньо обізнаний із закономірностями функціонування системи чи ігнорує їх.

Системі притаманні такі ознаки, як внутрішня рівновага, стійкість до впливу інших систем, розвиток із плином часу та адаптація до змін навколишнього середовища.

Рівновага – це здатність системи за відсутності зовнішніх впливів, що збурюють (чи при постійних впливах), зберігати свою поведінку як завгодно довго.

Під *стійкістю* стану системи розуміють ситуацію, коли малим змінам зовнішніх впливів відповідають малі зміни вихідних параметрів системи чи її властивостей.

Поняття *розвитку*, як і поняття рівноваги та стійкості, характеризує зміну стану системи в часі. Воно допомагає пояснити складні термодинамічні й інформаційні процеси у природі та суспільстві. Вирізняють *еволюційний* та *стрибокподібний* (революційний) розвиток. У першому випадку характеристики з часом змінюються повільно, структура системи залишається сталою. У другому – спостерігаються різкі стрибкоподібні зміни окремих параметрів системи, можуть змінюватися її будова й характер зв'язків між компонентами.

Адаптацією називають процеси пристосування системи до зовнішнього середовища, внаслідок яких підвищується ефективність її функціонування. Ці процеси можуть супроводжуватися зміною структури та характеристик системи.

Поняття системи може використовуватися як під час дослідження матеріальних, так й ідеальних явищ. Тому такі поняття й категорії, як річ, властивість, співвідношення, відношення, зв'язок, кількість, якість тощо – це категорії першого типу, які називають *формальними*, а також категорії другого типу – це матерія, свідомість, простір, час – вони називаються *змістовними*.

Речі, взяті поза якимось відношенням одна до іншої, ніколи не утворюють систему. З іншого боку, ніколи не утворюють систему й відношення без урахування речей. Причому сукупність речей з відношеннями між ними іноді утворюють систему, а іноді ні. Для того щоб визначити достатню умову існування системи, потрібно ввести третю категорію – *властивість*. У ході системного дослідження спочатку визначається властивість, потім відношення, що мають таку властивість, і лише потім устанавлюють множину елементів, у яких реалізується таке відношення.

1.4 Властивості систем

Кожна система насамперед є сукупністю елементів. За певних умов елементи можуть розглядатись як системи. Між елементами системи існують *істотні зв'язки* або властивості, що за силою зв'язку перевищують зв'язки між елементами системи та елементами, які не входять до системи. Під істотними зв'язками розуміють такі, які закономірно з необхідністю визначають інтегровані властивості системи. Ці істотні зв'язки визначають систему, відділяючи її від простої сукупності (конгломерату) і виділяють її з навколишнього середовища у вигляді цілого об'єкта.

Системі властива певна організація, що виявляється у зменшенні ентропії системи порівняно з ентропією сукупності елементів, що складають систему. Поняття ентропії більш детально розглядається далі. Воно визначає ступінь неорганізованості, безладу, хаосу. Організація системи приводить до зменшення безладу, зменшення кількості можливих станів системи.

Існування інтеграційних властивостей, тобто властивостей, що властиві системі в цілому і не властиві жодному елементу системи. Тобто властивості системи не зводяться лише до властивостей її елементів.

Розглянемо більш детально ці властивості системи й виділимо основні ознаки.

Цілісність означає, що система – це об'єднання частин, що по відношенню до навколишнього оточення виступає як одне ціле.

Під *якісною визначеністю* розуміють, що система – це така сукупність елементів, яка має свої якісні ознаки, характерні лише для даної системи і відсутні в інших системах. Ці ознаки проявляються лише у даній системі. Вони визначають відношення до інших систем. Наприклад, система «автомобіль» має якісні ознаки, що характеризують його в цілому. Такими ознаками є: маса,

потужність, швидкість, габаритні розміри, комфортність, естетичність та багато інших. Якісні ознаки іншої системи, наприклад тролейбуса, можуть бути зовсім іншими: споживання електроенергії, маневреність, місткість тощо. Тобто система є цілісністю, що має властиві лише їй якісні ознаки, за якими вона відрізняється від інших систем. Якість здебільшого може бути виражена кількісними величинами, наприклад місткість тролейбуса 105 пасажирів. Однак наявність кількісного визначення не обов'язкова, наприклад якісна ознака естетичності не може бути виражена кількісно.

Відмежованість системи від середовища означає, що всяка система має свої межі. Межі відділяють систему від навколишнього середовища. Вони визначають, що входить до системи і що до неї не входить, є зовнішнім по відношенню до системи. Переважна більшість систем має чіткі межі. Проте межі системи не завжди можуть визначатись однозначно. Інколи визначити межі дуже складно. Наприклад, визначення меж системи «річка»: входять до системи її береги, чи «річка» закінчується там, де протікає вода? Якщо берег входить до системи, то на якій відстані від води проходить межа системи «річка»? На відстані 1, 10 чи 100 м? А заплава річки входить до системи чи ні? Де її межа? Отже, навіть таке просте поняття, як визначення меж системи має особливості і їх необхідно враховувати під час визначення та дослідження систем. Це стосується й інших характеристик системи.

Гетерогенність системи та структурованість. Під гетерогенністю розуміють неоднорідність, тобто те, що система складається з різних частин. У визначенні системи зазначено, що система це сукупність елементів. Проте система – це не проста сукупність. Структурованість означає, що система є певним чином організованою сукупністю, має певну структуру. Поняття структурованості світу ми вже розглядали. Світ є певною сукупністю структур, організованих на різних рівнях і взаємозв'язаних між собою. Будь-яка система також має певну структуру. Ця структура забезпечує об'єднання елементів системи таким чином, щоб дане об'єднання мало свою якісну визначеність, цілісність. Гетерогенність поняття більш вузьке, воно просто означає неоднорідність складу, наявність складових частин.

Взаємодія частин системи між собою означає, що в системі частини взаємодіють між собою і лише у даній взаємодії вони утворюють певну систему. З наведеного прикладу зрозуміло, що тролейбус буде системою тоді, коли складові його частини: двигун, ходова частина, електрообладнання – певним чином взаємодіють між собою. Причому ця взаємодія однозначна, визначена, обумовлена в найдрібніших деталях.

Взаємодія з навколишнім середовищем означає, що система як ціле взаємодіє з іншими системами. Це зумовлено цілісністю системи, її якісною визначеністю. Під час взаємодії з навколишнім середовищем виявляються властивості системи. За характером взаємодії розрізняють відкриті й закриті системи. *Відкрита система* – це система, яка активно обмінюється з навколишнім середовищем речовиною, енергією та інформацією. У *закритій системі* такий обмін обмежений або відсутній. Поняття відкритості системи має велике значення під час вивчення питання розвитку й життєвого циклу

системи. Для закритих систем характерні процеси старіння. У термодинаміці – дисципліні, що вивчає явища передачі енергії, процеси старіння визначаються зростанням ентропії. Ентропія – це характеристика, що показує ступінь безладу системи, її неупорядкованість, хаотичність. Відповідно до другого начала термодинаміки в усіх закритих системах ентропія може лише зростати. Внаслідок цього закриті системи прагнуть до дифузного, неупорядкованого стану. В них зникає будь-яка структурованість, зникають будь-які процеси передачі енергії, матерії. Цей стан називають «тепловою смертю». Зростання ентропії – універсальний закон природи, яким зумовлені процеси старіння, розпаду, загибелі замкнених систем. На відміну від замкнених систем у відкритих системах, крім процесів зростання ентропії, є процеси, що приводять до її зменшення, до зростання організованості й впорядкованості системи.

Під поняттям *інтегрованості* розуміють, що в системі властивості окремих елементів об'єднуються і виступають разом у новій якості.

Емерджентність – це поява нових якостей, не властивих елементам, що становлять систему.

Кожна система є сукупністю певних частин, певних елементів. Особливістю системи є те, що внаслідок об'єднання декількох елементів і утворення системи з'являються нові властивості, яких не має жоден елемент до створення системи. Ця властивість системи і називається емерджентністю. Емерджентність (від англ. emergent – несподіване виникнення) визначає, що властивості системи не зводяться до властивостей елементів, з яких вона складається. З емерджентності систем випливає те, що майже *ідеальна система може бути створена з неідеальних елементів*. Так, наприклад, колонії бджіл та мурах ідеально функціонують завдяки інтегративним властивостям, проте кожний елемент цієї системи не здатен функціонувати окремо, кожна особина колонії не може вижити та відтворюватися за її межами.

Емерджентність системи може характеризувати ступінь організованості системи. Чим більше характеристики системи відрізняються від характеристик елементів, з яких вона утворена, тим більш організованою є система. Щоправда, величина емерджентності не має числового вираження і характеристика може бути лише якісною. Наприклад, властивості автомобіля не зводяться до властивостей двигуна, кузова, ходової частини. У нього з'являється низка нових якісних ознак, відмінних від ознак складових частин. Ще один приклад. Досить високоорганізованою системою є комп'ютер. Його властивості істотно відрізняються від властивостей елементів, що входять до його складу, а саме мікросхем, вимикачів, елементів пам'яті, з'єднувальних провідників тощо. Якщо брати живі організми, то ступінь їх організованості значно вищий, оскільки неможливо звести характеристики до характеристик окремих частин організму. Емерджентні властивості саме і обумовлені взаємодією компонентів під час формування системи певного рівня організації. На рівні популяції емерджентними будуть: її структура (статева, генетична, вікова тощо), тип розподілу організмів у просторі, народжуваність, смертність, біотичний потенціал, тип динаміки тощо. На рівні угруповання – типи міжпопуляційних взаємовідносин, трофічні ланцюги й мережі, видове розмаїття

тощо. На екосистемному – характер біогеохімічних колообігів, трансформація енергії, енергетичний баланс екосистеми, екологічні сукцесії, флуктуації й трансформації тощо.

Наявність цілей, цілеспрямованість – одна з головних ознак системи. Кожна система має певну мету існування або створена для певної мети. У системи може бути одна мета або сукупність цілей. У разі сукупності цілей всі вони утворюють певну ієрархію, в якій є головні, першочергові цілі й другорядні підпорядковані головним. Визначення цілей системи є завданням, що має свої особливості. Цілі по-різному визначаються для систем штучного походження й природних систем.

Як правило, в системах можна виділити множину рівнів, де підсистеми розміщені в порядку підпорядкованості від більш високого рівня до нижчого. Таке розміщення підсистем називається *ієрархією*. Взаємодія рівнів системи виявляється в такому:

- вищий рівень ієрархії поєднує в собі всі попередні, більш низькі рівні, як складові частини;
- більш високий рівень впливає на більш низький рівень.

1.5 Класифікація систем

Класифікацію систем виконують, як правило, за ієрархічним принципом. Ієрархічний принцип класифікації означає, що існує декілька рівнів класифікації і вони розміщені один вище за іншим. Наприклад, поділ систем на природні, штучні й змішані є загальним і оскільки він не завжди задовольняє потреби аналізу, то вводять наступний, більш низький рівень класифікації. Тому на другому рівні деталізують системи кожної групи. Як правило, верхні рівні класифікації повинні бути замкненими й охоплювати всі існуючі системи. Нижній рівень може бути і незакінченим. Це зумовлюється цілями класифікації і її постійним розвитком. При розвитку поглиблюються знання про предмет класифікації, відбувається диференціація класів і підкласів.

Необхідно зауважити, що будь-яка класифікація завжди має абсолютну й відносну сторони. Абсолютна сторона означає, що система, віднесена до певного класу систем, має ті самі характеристики, що й інші системи даного класу, і підпорядковується тим самим закономірностям. Відносність класифікації полягає в тому, що, крім чітко визначеного поділу, існують системи, які займають проміжне місце. Відносність означає також те, що система може бути віднесена до однієї чи іншої групи залежно від того, з якої точки зору ми розглядаємо систему, які властивості системи нас цікавлять під час аналізу, які проблеми ми вирішуємо за допомогою даної системи. Втім будь-яка класифікація завжди є відотною, служить певним цілям, до кожного із класів систем входить безліч різноманітних систем, що різняться великою сукупністю характеристик.

Класифікацію виконують за класифікаційними ознаками. *Класифікаційними ознаками* є ті ознаки, які, на думку того, хто виконує класифікацію, є визначальними для даного класу об'єктів. Поняття «система»

охоплює всі об'єкти навколишнього світу. Тому існує велика різноманітність класифікацій систем за різними ознаками. Кожна класифікація виконується спеціалістами, які займаються певним колом проблем, і відображає підхід до проблеми класифікації з точки зору саме цих спеціалістів. Тому єдиної класифікації систем на сьогодні немає і навряд чи вона можлива. Розглянемо запропоновану класифікацію систем. Принципи класифікації та класи систем подані у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Класи та підкласи систем

№	Основа класифікації систем	Класи та підкласи систем
1	2	3
1	За матеріалом, з якого створені	1.1. Матеріальні. 1.2. Ідеальні (абстрактні)
2	За походженням	2.1. Штучні. 2.2. Природні. 2.3. Змішані
3	За характером зв'язку з навколишнім середовищем	3.1. Відкриті. 3.2. Закриті
4	За складністю	4.1. Неживі: 4.1.1. Статичні структури або їх основи (кристал). 4.1.2. Прості динамічні із заданим законом поведінки (годинник). 4.1.3. Кібернетичні системи із циклами керування, що мають зворотний зв'язок (термостат, робот)
		4.2. Живі: 4.2.1. Відкриті системи із самозбережною структурою (клітина). 4.2.2. Живі організми з низькою здатністю сприйняття інформації (рослини). 4.2.3. Живі організми з більш розвинутою системою сприйняття інформації (тварини). 4.2.4. Живі організми із самосвідомістю (людина). 4.2.5. Соціальні системи (етнос, нація). 4.2.6. Трансцендентні системи чи системи, що знаходяться поза нашою свідомістю
5	За принципами поведінки	5.1. Матеріальні. 5.2. Гомеостатичі. 5.3. Вирішувальні (без передбачення). 5.4. Здатні передбачувати. 5.5. Рефлексивні

Продовження табл. 1.1

1	2	3
6	За ступенем організованості	6.1. Добре організовані. 6.2. Погано організовані. 6.3. Самоорганізувальні: 6.3.1. Саморегулювальні. 6.3.2. Самонавчальні. 6.3.3. Самонастроювальні. 6.3.4. Самовідновлювальні. 6.3.5. Самовідтворювальні
7	За ступенем ресурсної забезпеченості	7.1. Малі. 7.2. Великі. 7.3. Прості. 7.4. Складні. 7.5. Звичайні. 7.6. Енергокритичні
8	За характером цілей	8.1. Призначені для певної мети. 8.2. Здатні обирати мету і до неї прагнути
9	За описом змінних	9.1. Якісний опис. 9.2. Кількісний опис. 9.3. Змішаний опис
10	За способом керування	10.1. Керування зовні. 10.2. Самокерування. 10.3. Із комбінованим керуванням
11	За типом операторів системи	11.1. Чорний ящик (S невідомо). 11.2. Непараметризований клас (S відомо частково). 11.3. Параметризований клас (S відомо до параметра). 11.4. Білий ящик (S відомо повністю).

За матеріалом, з якого створені системи, розрізняють матеріальні й абстрактні (ідеальні) системи.

Матеріальні системи – це системи, утворені засобами матеріального світу. Системи неживої природи (природні утворення: атоми, молекули, астрономічні об'єкти, хімічні сполуки та системи, створені людиною), системи живої природи (біологічні організми, популяції, екосистеми) та соціальні системи (етнос, нація, держава, партії та ін.).

Матеріальні системи можуть бути створені людьми або природними утвореннями, які існують незалежно від людини. Перші системи називають *штучними*, другі *природними*. Проміжне положення займають *змішані* системи.

Абстрактні (ідеальні) системи – це системи, створені нашим мисленням, продукти розумової діяльності. До них належать мови, знакові системи, наукові й релігійні теорії тощо.

За походженням системи поділяють на штучні, природні, змішані.

Штучні – це системи, створені людьми, *природні* – системи, створені самою природою, існують у природі незалежно від свідомості людини, від її діяльності. *Змішані* системи створені людиною, але в них важливу роль відіграє природна частина. Штучні системи, створені людиною і мають певну об'єктивну мету свого існування, для якої вони створені.

Під час розгляду природних систем виникають певні ускладнення. Для природних систем важко сформулювати мету існування. Питання цілей у класифікації систем за походженням потребує детального розгляду.

До визначення системи, яке ми розглядали раніше, не входить поняття мети, проте серед ознак системи важливою ознакою є цілеспрямованість, тобто наявність цілей чи їх сукупності. Оскільки штучні системи створені людиною, то вони мають конкретну мету, для якої їх створили. Визначити цю мету неважко. Але коли ми розглядаємо природні утворення, то на запитання про мету відповісти дуже важко. Природних утворень ми бачимо безліч – це атом, кристал, молекула, рослина, живі організми, Сонячна система та ін. Якщо утворення не має однієї з ознак системи, то виникає логічне запитання, чи можна його вважати системою? У повсякденній практиці наведені вище природні утворення прийнято вважати системами – система атома, Сонячна система, організм як система. Можливо, якби ми розглядали світ із точки зору «творця світу», ми могли б визначити цілі, для яких створені вищезазначені природні утворення. Однак наука відрізняється від релігії тим, що всі пояснення природних явищ, існування природних об'єктів здійснюються на основі об'єктивно існуючих закономірностей, що не потребують наявності надприродних сил. Таким виходом є введення поняття об'єктивних й суб'єктивних цілей. *Суб'єктивна мета* – це мета, сформована певним суб'єктом, який створив систему. Суб'єктивні цілі визначаються для штучних систем. Для природних систем імовірною вважається наявність об'єктивних цілей. Наявність об'єктивних цілей можна пояснити таким чином, що коли ми приходимо у світ, де цілі, для яких система створена, вже реалізовані, то існування системи ми повинні визнати об'єктивним, а цілі, для яких ці системи створювалися й існують, – об'єктивними цілями. У такому разі ми можемо вважати *об'єктивними цілями* майбутній або теперішній реальний стан системи, якого вона досягає у своєму життєвому циклі. Введення об'єктивних цілей дозволяє визначити цілі природних утворень і, відповідно до наших ознак, вважати їх системами.

Змішані системи – це системи природного походження, що перетворені людиною для задоволення певних потреб, або системи, створені людиною, в яких значною мірою використовуються елементи природних систем, наприклад заповідник, ліспромгосп, канал, парк культури, штучний супутник Землі тощо. Для змішаних систем існують об'єктивна й суб'єктивна цілі. На верхньому рівні, як правило, – суб'єктивні цілі, на нижньому – об'єктивні.

Оскільки поділ систем на природні, штучні й змішані є досить загальним, то необхідно ввести такий рівень класифікації. Так, природні системи класифікують як неживі системи, живі організми, соціальні системи, екологічні

системи тощо. Екологічні системи ввели в класифікацію, враховуючи їх великий вплив на життя та діяльність людини і тому, що системний аналіз у наш час багато уваги приділяє вивченню екологічних систем.

Під час розгляду ознак систем було помічено, що однією з головних ознак є наявність взаємодії з навколишнім середовищем. Залежно від інтенсивності взаємодії системи поділяють на відкриті й закриті (замкнені, ізольовані). Для замкненої системи виконується закон збільшення ентропії. Поняття ентропії вперше було введено у розділі фізики – термодинаміці – під час вивчення теплових процесів у системах. Пізніше це поняття було уточнене й розширене. Під час вивчення інформаційних систем і подальшого розвитку науки стало зрозумілим, що поняття ентропії має загальний характер і визначає напрямок розвитку складних систем. Цей напрямок такий, що у замкненій системі ентропія може лише збільшуватись. Ентропія – це міра безладу, неупорядкованості системи. Всі процеси у замкнених системах відбуваються так, що неупорядкованість, дифузність, хаотичність системи лише збільшується. Наприклад, тепло завжди передається від більш нагрітих тіл до менш нагрітих і розподіл температури в системі вирівнюється, декілька розділених газів в одному об'ємі після усунення межі завжди перемішуються, рідина випаровується і т. п. Ентропія максимальна у системах, де більше хаосу, безпорядку. Відповідно до закону збільшення ентропії відбувається старіння живих організмів, руйнування будівель, руйнування гір і вирівнювання земної поверхні, остигання Сонця і загибель зоряних систем. У системі, в якій ентропія має найбільшу величину, припиняються будь-які спрямовані процеси обміну речовиною, енергією, інформацією. Збільшення ентропії призводить до стихійного хаосу. Відповідно до цього, наприклад, замкнений Всесвіт чекає «теплова смерть», будь-які замкнені системи рано чи пізно гинуть. У відкритих системах унаслідок взаємодії з навколишнім середовищем, відбуваються процеси, що приводять до зменшення ентропії, до зростання упорядкованості системи. Інтенсивність взаємодії систем може змінюватися в широких межах: від слабкої, майже непомітної, до дуже сильної.

Відкриті – це системи, які в процесі своєї діяльності обмінюються із середовищем матерією, енергією, інформацією.

Закриті (замкнені, ізольовані) – це системи, в яких процеси обміну з навколишнім середовищем відсутні. Ці системи підпорядковані другому закону термодинаміки, закону збільшення ентропії.

Складність систем є важливою характеристикою, яку необхідно враховувати під час аналізу. Складність систем може бути структурною або функціональною. Структурна складність полягає у наявності великої кількості елементів і їх взаємозв'язку. Функціональна складність виражається в наявності багатьох взаємозв'язків і взаємозалежностей.

Ці зв'язки можуть бути внутрішніми (між елементами системи) й зовнішніми (між системою та метасистемою).

Принципи поведінки систем схематично наведені на рис. 1.2.

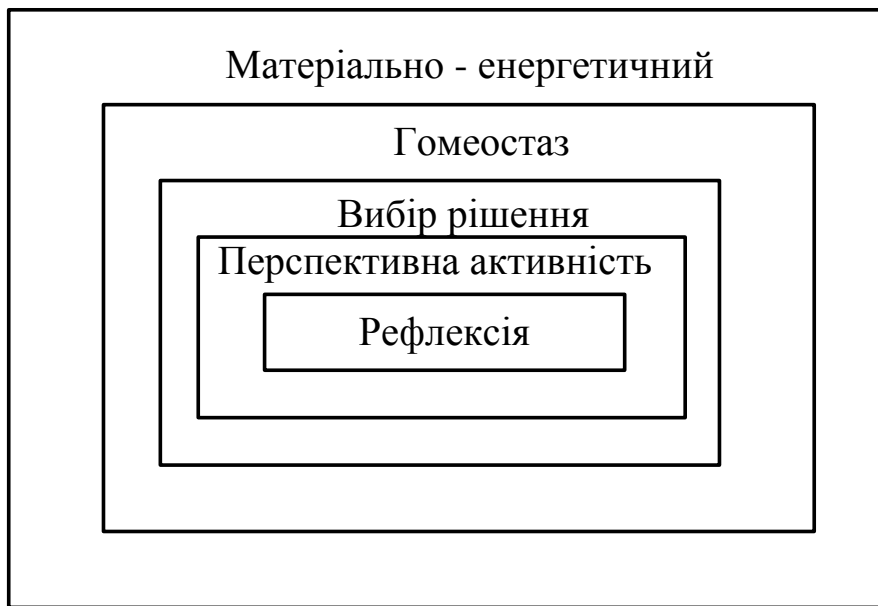


Рисунок 1.2 – Принципи поведінки систем

Принцип матеріально-енергетичного балансу досить простий, а саме: поведінка системи зумовлена лише законами фізики, законами збереження енергії, маси, рівнянням неперервності тощо. Дії цих законів підлягають усі системи матеріального світу, що показано на рис. 1.2 прямокутником, який охоплює всі системи.

Принцип гомеостазу. Гомеостаз у перекладі з грецької означає незмінність стану. В науці гомеостазом називають таку поведінку динамічної системи (системи, що обмінюється із середовищем матерією та енергією), при якій зберігаються постійний її склад та властивості внутрішнього середовища, стійкість головних функцій системи. Термін «гомеостаз» широко використовується в біології, медицині, генетиці, кібернетиці. У нашій класифікації він означає, що поведінка системи спрямована на підтримання стабільності свого складу та функціональних властивостей, здатність системи повертатись у стан рівноваги. Цей принцип характерний поведінці систем живої природи, виконання його забезпечується для більшості штучних систем і в деяких систем неживої природи, що знаходяться у стані динамічної рівноваги.

Принцип вибору рішення. Поведінка систем обмежується не лише підтриманням рівноваги у системі, проте система має можливість вибирати одну із декількох альтернатив своєї роботи чи поведінки.

Принцип перспективної діяльності виділяє системи, здатні організувати свою поведінку з урахуванням минулого досвіду на основі припущення, що майбутній розвиток істотно не відрізнятиметься від минулого. Такі системи повинні мати достатній обсяг пам'яті й здатність прогнозувати хід подій на певний проміжок часу в майбутньому на основі інтерполяції та приймати рішення залежно від результатів такого прогнозування.

Принцип рефлексії полягає у тому, що система організує свою поведінку з урахуванням не лише минулого досвіду, а й можливої дії іншої системи, з якою вона взаємодіє, тобто це поведінка систем, які наділені інтелектом, можливістю

передбачати дії інших систем.

Принципи класифікації, що розглядатимуться далі, пов'язані з рівнем наших знань про систему, з моделями системи, які ми будемо і використовуємо для вивчення системи, з відшукуванням шляхів вирішення проблеми в системі. Питання моделювання та моделі систем будемо вивчати далі. Ця класифікація певною мірою відображає рівень наших знань про систему.

До добре організованих систем ми відносимо ті системи, поведінка яких жорстко детермінована, у системі встановлені чіткі взаємозв'язки між складовими частинами, що забезпечують дію системи в цілому. До таких систем належать тролейбус, телевізор, холодильник, пральна машина тощо. У них взаємозв'язки окремих механізмів чітко організовані й система діє лише таким чином, як це дозволяє внутрішня організація.

Поняття добре організованої системи використовують також для відображення ступеня наших знань про систему. Ті системи, про внутрішню будову яких знають досить добре, відносять до добре організованих. Так, для конструктора автомобіль є добре організованою системою, оскільки він досконально знає всі механізми і взаємозв'язок між ними, а для того, хто тільки починає вивчати автомобіль, не знає його складових частин і взаємодії між ними, автомобіль є дифузною, погано організованою системою.

Під погано організованими (дифузними) системами розуміють системи, в яких взаємодія частин не детермінована однозначно, має випадковий характер. Типовим прикладом такої системи є газ, що знаходиться у певному об'ємі. Ознаки дифузної мають і добре організовані системи, наприклад поведінка людини не завжди однозначна, не завжди однозначна дія великого трудового колективу та ін. До погано організованих систем належать ті системи, про які ми знаємо досить мало.

До самоорганізуючих систем належать системи, що мають механізми регулювання. Найбільш простими з них є системи саморегулювання.

У таких системах важливим є наявність зворотного зв'язку. Під останнім ми розуміємо подачу на вхід системи сигналу про вихідну величину (пропорційного, залежного від швидкості зміни чи інтегрального значення вихідної величини). Працює ця система таким чином. Вихідна величина системи, або інформація про її стан, подається на регулятор. Регулятор залежно від вимог, що стоять перед системою, та від інформації, що надійшла через зворотний зв'язок, регулює її роботу (рис. 1.3).

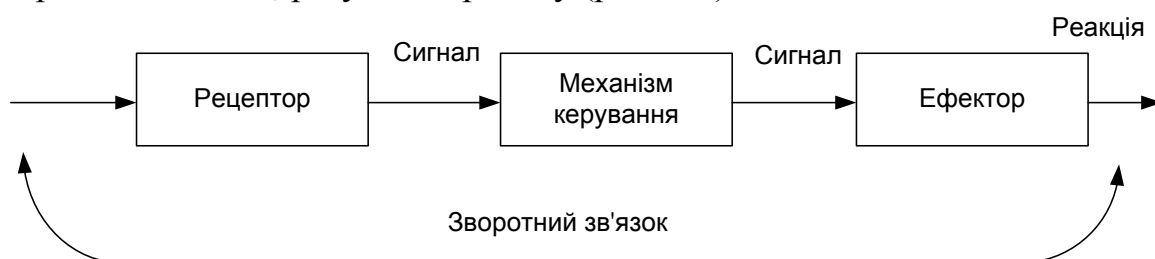


Рисунок 1.3 – Модель простого зворотного зв'язку

Наприклад, сучасні автомати, так само, як і багато явищ у живому організмі, базуються на дії зворотних зв'язків, причому набагато складніших порівняно з простою моделлю (рис. 1.3) форм, проте остання є їх елементарним прототипом. Щодо живих організмів схема зворотного зв'язку виступає у формі гомеостазу.

Гомеостаз є сукупністю органічних регуляцій для підтримання стійкого стану організму, причому дія регулювальних механізмів може відбуватися не в одному і тому самому, але нерідко в різних і навіть протилежних напрямках – згідно з відповідними зовнішніми змінам, які підлягають деяким фізичним законам. Простим прикладом гомеостазу є гомеотермія. У фізичній хімії за правилом Вант – Гоффа зменшення температури призводить до зниження швидкості хімічних реакцій. Саме так відбувається у звичайних фізико-хімічних системах, а також у холоднокровних тварин. Проте у теплокровних тварин зниження температури викликає протилежну дію, а саме збільшення швидкості метаболічного процесу, внаслідок чого підтримується стала температура тіла на рівні близько 37 °С. Це обумовлено дією механізму зворотного зв'язку. Зниження температури стимулює термогенічні центри в таламусі мозку, що «включають» терморегулювальні механізми. Подібну схему зворотного зв'язку можна знайти в різноманітних формах фізіологічних регуляцій. Регуляція стану і управління діями за цілеспрямованої активності тварин і людини так само здійснюється механізмом зворотного зв'язку.

Самонавчальні системи – це системи, що мають здатність засвоювати й запам'ятовувати минулий досвід і змінювати свою поведінку відповідно до набутих знань.

Самовідновлювальні системи – це системи, здатні відновлюватися повністю або частково. Живі організми та штучні системи, що відновлюються, здатні регенерувати певні органи, свої частини.

Самовідтворювальні – це системи, які можуть відтворювати подібні до себе системи, породжувати нові системи, аналогічні собі. Це всі живі організми, які можуть мати потомство. Деякі штучні системи можуть створювати системи такі самі, як вони, наприклад роботи.

Принцип ресурсної забезпеченості повністю належить до можливостей створення та реалізації моделі системи. Модель створюють для того, щоб відтворити роботу системи, вивчити процеси в ній, її розвиток. Вимагається, щоб модель дозволяла вирішити проблему за обмежений час. Для того щоб реалізувати таку модель, потрібні певні енергетичні, матеріальні й інформаційні ресурси. У реальних випадках виявляється, що наявні ресурси не завжди дозволяють створити потрібну модель. Класифікація систем за ступенем ресурсної забезпеченості показана в табл. 1.2.

Першим у цій таблиці є енергетичний ресурс, тобто затрати енергії, які потрібно витратити для побудови моделі системи. Для більшості систем побудова моделі не потребує значних енергетичних ресурсів, такі системи за ступенем енергозабезпеченості відносять до звичайних. З обмеженістю енергетичних ресурсів ми стикаємося тоді, коли для побудови моделі системи потрібні значні витрати енергії. Прикладом таких систем є мікросвіт, системи

елементарних частинок матерії. Для побудови їх моделі і вивчення потрібні велетенські прискорювачі, що споживають значну енергію. Такі системи відносять до класу енергокритичних.

Таблиця 1.2 – Класифікація систем за ступенем ресурсної забезпеченості

Характер ресурсу	Забезпеченість	
	Повна	Недостатня
Енергетичний	Звичайні	Енергокритичні
Матеріальний	Малі	Великі
Інформаційний	Прості	Складні

Наступний тип ресурсу – матеріальний. Залежно від матеріальних ресурсів, потрібних для створення моделі, системи поділяють на малі та великі. Великі системи – це системи, для створення моделі яких наявних матеріальних ресурсів недостатньо або потрібні більші ресурси, ніж є в наявності, наприклад система функціонування економіки країни, атмосфера землі та ін. У ході вирішення низки економічних, організаційно-управлінських, завдань екології, метеорології створення моделей потребує значного обсягу пам'яті ЕОМ, великих матеріальних затрат. Системи, моделювання яких обмежене внаслідок великих розмірів, необхідності значних матеріальних затрат класифікують як великі, на противагу малим системам, які таких матеріальних затрат не потребують.

У системному аналізі часто велику систему переводять у розряд малих, енергокритичну – в розряд звичайних. Це можна здійснити, якщо розбити завдання, для вирішення якого недостатньо матеріальних ресурсів, на ряд окремих завдань, на завдання меншої складності й розв'язувати кожне окремо.

Третій тип ресурсів – інформаційні. Відповідно до класифікації системи можуть бути простими чи складними. Ознакою простоти системи є достатність інформації для успішного керування нею. Коли наявна інформація не дозволяє успішно здійснювати керування системою, то систему вважають складною. Наприклад, економіка країни є складною системою, оскільки інформації для успішного керування нею недостатньо. Кодовий замок зі складною системою шифрів є складним для того, хто не знає шифрів і простим для того, хто знає шифри замка. Рідна мова для кожного є простою системою, а іноземна, якою він не володіє, є складною. Комп'ютер для того, хто уміє з ним працювати, є простою системою, а для того, хто не володіє комп'ютерною грамотністю, – складною системою.

Отже, за ресурсною забезпеченістю ми маємо три види ресурсів і система класифікується за кожним видом ресурсу окремо. У класифікації системи зазначають, наприклад: система мала, енергокритична, проста. Це означає, що під час її моделювання ми повністю забезпечені матеріальними ресурсами, відчуваємо недостатність енергетичних ресурсів і досить добре можемо керувати поведінкою системи. Під час класифікації систем за ресурсною забезпеченістю можливі різні комбінації ознак.

За характером цілей системи прийнято класифікувати як системи, призначені для певної мети, так і системи, здатні самостійно обирати мету і прагнути до неї (рос. целенаправленные и целеустремленные).

Системи, призначені для певної мети, – це такі системи, які мають певну мету свого існування, створені для певної мети і функціонують завжди так, щоб виконати цю мету. Наприклад, холодильник, пральна машина, телевізор, електродвигун служать для певних цілей, які обумовлені під час їх створення.

Системи, здатні обирати ціль і прагнути до неї, – це системи, які самостійно обирають мету і прагнуть до неї. Наприклад, людина, трудовий колектив можуть самостійно обирати мету своєї діяльності.

Класифікація за описом змінних здійснюється залежно від ступеня складності системи, наших знань про неї і від того, як ми описуємо функціонування системи. Змінними системи є вхідні величини $x(t)$, вихідні $y(t)$ та внутрішні параметри системи $z(t)$. Відповідно до типу цих величин розрізняють системи з кількісним описом змінних, системи з якісним описом та системи зі змішаним (частково з кількісним, а частково з якісним) описом.

Системи, функціонування яких повністю відоме і можна кількісно встановити значення змінних, відносять до систем із *кількісним описом змінних*. На другому рівні класифікації такі системи можуть бути класифіковані за характером змінних як дискретні, або неперервні, за кількістю змінних: одно- чи багатовимірні та за іншими параметрами.

Системи з якісним описом – це системи, в яких вхідні й вихідні величини описуються якісно. На другому рівні вони можуть бути класифіковані як системи зі змістовним описом, із формалізованим описом та зі змішаним описом. Системи зі змістовним описом мають лише загальний словесний опис змінних, виконаний мовою, близькою до розмовної. Системи з формалізованим описом – це вже системи, в яких більш докладно вивчені змінні, що підлягають певним формальним правилам і можуть бути описані на деякій формальній мові.

Системи зі змішаним описом змінних – це системи, в яких деякі змінні набувають числових значень, які можна виміряти й виразити числом, а інші описані лише якісно.

Якщо класифікація систем за типом змінних обумовлює, якими є вхідні, вихідні й внутрішні змінні системи, то класифікація за типом операторів відображає зв'язок між цими змінними в системі, тобто вона несе інформацію про те, які процеси відбуваються в системі, динаміку системи. Змінні системи, її вхідні й вихідні величини між собою завжди зв'язані певними залежностями, співвідношеннями. Ці залежності можуть бути описані певними операторами системи, які визначають перетворення вхідних величин у вихідні.

Системи, в яких внутрішні процеси зовсім невідомі й оператори явно не можуть бути записані, відносять до класу систем «чорний ящик». Для таких систем відомі лише вхідні й вихідні величини і зовсім не відомі процеси перетворення вхідних величин у вихідні.

Системи, в яких частково відомі процеси перетворення вхідних величин у вихідні, оператори системи можуть бути записані у вигляді певних правил,

відносять до *непараметризованого* класу.

Системи, для яких співвідношення між вхідними й вихідними величинами повністю відомі, можуть бути записані у явному вигляді з точністю до певних числових параметрів, відносять до *параметризованого* класу.

Для деяких систем *параметризованого* класу співвідношення між вхідними й вихідними величинами можуть бути описані в операторній формі, наприклад, у вигляді

$$Y(t) = R[X(t), Z(t)], \quad (1.8)$$

де R – певний оператор.

Такі системи відносять до класу «білий ящик». Під цим терміном розуміють, що повністю відома внутрішня будова системи, закономірності її функціонування.

На другому рівні класифікації системи класифікують залежно від типу операторів. Класифікація виконується для систем параметризованого класу та класу «білий ящик». Зрозуміло, що для систем типу «чорний ящик» подальша класифікація неможлива, а для систем непараметризованого класу на другому рівні загальну класифікацію виконати важко, оскільки вона залежить від інформації про систему, яка відома лише частково. Операторами системи можуть бути звичайні й диференціальні рівняння, більш складні матричні співвідношення та ін. Залежно від характеру рівнянь системи можуть бути: лінійними й нелінійними; від того, який тип рівнянь – дискретними та неперервними; залежно від зміни величин у часі – інерційними й безінерційними, з пам'яттю; залежно від зміни параметрів системи в часі – стаціонарними й нестаціонарними.

Перший рівень класифікації за способом керування визначає, входить блок керування у саму систему чи знаходиться поза нею. Самокеровані системи мають власний блок керування, у систем, керованих зовні, блок керування відсутній й існує лише зовнішнє керування. Системи з комбінованим керуванням – це такі системи, в яких є блок керування у самій системі, за допомогою якого здійснюється керування певними параметрами, але система підлягає також зовнішньому керуванню. Другий рівень класифікації поділяє системи за ознакою, як саме здійснюється керування. Для всіх систем підкласи другого рівня мають певні спільні ознаки.

Системи з керуванням без зворотного зв'язку – це такі системи, як, наприклад, велосипед, пілосос, автомобіль, у яких відсутні механізми зворотного зв'язку і режими роботи строго обумовлені керуючою дією. До цього підкласу належать також верстати з програмним керуванням, що мають одну чи декілька жорстких програм роботи і не здатні змінювати їх при зміні зовнішніх умов.

Системи наступного підкласу відрізняються наявністю зворотного зв'язку. Зворотний зв'язок забезпечує автоматичне регулювання системи, підтримання параметрів системи при змінах характеристик зовнішнього середовища. До таких систем належать, наприклад, холодильник, генератор електростанції із системою автоматичного підтримання постійної напруги й частоти. До таких систем частково можна віднести й автомобіль, оскільки

в нього є механізми зворотного зв'язку, наприклад підтримання автоматичної роботи двигуна в режимі холостого ходу, телевізори, які автоматично настроюються на частоту радіостанції, мають автоматичне регулювання яскравості екрана, автоматичне регулювання коефіцієнта підсилення тощо.

Системи з керуванням за параметрами – це такі системи, в яких не лише здійснюється зворотний зв'язок за вихідною величиною, а й можлива зміна параметрів самої системи. Прикладами таких систем є адаптивні автоматизовані системи керування, адаптація живих організмів до зміни умов життя, робота пілотів на різних типах літаків, робота водіїв на різних автомобілях за різних умов руху та інші системи.

Найбільш складними є системи керування, що здійснюються шляхом зміни структури самої системи. Такі системи працюють у надзвичайно складних умовах і зміна структури системи дозволяє їм пристосуватися до нових умов. До таких систем потрібно віднести гнучкі автоматизовані системи сучасних виробництв, що дозволяють переходити з випуску однієї продукції на іншу, живі організми, в яких відбуваються зміни під час еволюції та природного відбору, державу та органи державного управління, в яких відбуваються організаційні зміни в процесі розвитку країни.

1.6 Системний аналіз та системний підхід як методології дослідження систем

Природа – це система, якій характерні структурно-функціональна єдність взаємозв'язаних компонентів і цілісність біотичної та абіотичної складових. Біотична складова навколишнього середовища об'єднується у біосферу (глобальну екосистему), що складається із ієрархічно пов'язаних між собою екосистем різних рівнів організації і великої кількості різноманітних підсистем, між якими існують тісні матеріально-енергетичні та ієрархічні зв'язки. Ієрархічність будови біосфери зумовлює й ієрархічність систем регуляції рівноваги (гомеостазу) її підсистем. Гомеостатичні системи мають генетичну природу й еволюціонують разом зі структурно-функціональною організацією екосистем. Таким чином, життя не існує поза екосистемами, тому вивчення природних об'єктів будь-якого таксономічного рівня ефективно лише при застосуванні системного підходу.

Ступінь стійкості та здатності до адаптаційного перебудування екосистем в умовах зростання негативного антропогенного впливу зумовлений численністю та екологічною різноманітністю видів, а також численністю вторинних (по відношенню до первинних – трофічних зв'язків) форм відношень між видами. Тому розроблені на сьогодні численні методики діагностики впливу на біоту за окремими чинниками чи змінами окремих структурних компонентів екосистем неадекватно відображають реальну ситуацію, що значно складніша. Виходячи із теорії системної організації біосфери та ієрархічного взаємозв'язку її підсистем, механізмів гомеостазу, проблему впливу специфічних чинників на біоту необхідно вивчати з позицій саме системного підходу, який враховує такі ефекти комплексного впливу

негативних факторів, як синергізм, адитивність, нейтралізація, та передбачає врахування принципу емерджентності.

Теорія систем – це сфера наукового знання про навколишній світ як сукупність систем різної складності й різного рівня, що взаємодіють між собою. Теорія систем є загальнотеоретичним підходом, що базується на методах діалектики, використанні знань філософії, прикладної математики, теорій пізнання та інших наукових дисциплін. Вона вивчає закономірності функціонування, взаємодії та розвитку великих систем. *Основні положення теорії систем* можна виразити такими постулатами.

Положення перше. У світі немає нічого, крім ієрархічної сукупності систем.

Положення друге. Основу загальної теорії систем складають фундаментальні положення термодинаміки: закон збереження енергії замкненої системи (перший принцип), закон зростання ентропії замкненої системи (другий принцип), закон прагнення до нульової ентропії (невпорядкованості) системи при прагненні до нульової її температури (третьій принцип, або теорема Нернста), принцип Ле-Шательє (зовнішній вплив, що виводить систему з рівноваги, стимулює в ній процеси, які здатні послабити цей вплив), і принцип найменшого розсіювання енергії Онсагера (або узагальнювальний його на випадок сильно нерівноважних систем критерій Гленсдорфа – Пригожина). Для відкритих необмежених систем, до яких належать, зокрема, біологічні і соціальні системи, другий і третій принципи термодинаміки потрібно формулювати у вигляді об'єднаного термодинамічного принципу: ентропія підсистеми речовини прагне до нуля при одночасному зростанні ентропії об'єднаної системи «речовина + випромінена цією речовиною енергія».

Закони термодинаміки сформульовані безвідносно до природи об'єктів, що становлять систему.

Положення третє. Кількісною величиною, що характеризує систему, є пропускна здатність утвореного нею інформаційного каналу.

Положення четв'рте. Усі системи побудовані за ієрархічним принципом. Ієрархічна структура систем обумовлена необхідністю підвищення пропускної здатності системи в умовах обмеженості пропускної здатності складових системи елементів.

Положення п'яте. Зростання рівня системної ієрархії неминуче супроводжується спрощенням (спеціалізацією) підсистем нижнього рівня.

Це положення є наслідком теореми Шредингера, згідно з якою система живиться інформацією з навколишнього середовища. Для кожного вищого рівня таким середовищем є підсистеми нижніх рівнів.

Положення шосте. Закон односпрямованості вектора розвитку.

Основні рівняння теоретичної фізики симетричні щодо часу, тож для описуваних ними об'єктів не існує ні минулого, ні майбутнього. Єдиним винятком є другий принцип термодинаміки, що дозволяє виділити позитивний напрямок часу як такий, при якому ентропія замкненої системи зростає. У поведженні реальних фізичних систем, починаючи зі сфери Всесвіту, що спостерігається, виявляється спрямованість. Як відомо, в останні приблизно

15 млрд років наш Всесвіт неспинно розширювався. Галактика, зірка, біосфера Землі, цивілізація, живий організм, механічний пристрій, ідеологічна система – усе проходить цикл розвитку, що складається із зародження, досягнення деякого вищого ступеня системної складності, а потім спрощення і руйнування.

Явище наявності минулого і майбутнього в реальному світі сформульоване у вигляді закону односпрямованості розвитку. Механічні системи, створені людиною, також підлягають дії закону односпрямованості, хоча фаза росту в них відсутня. Життєвий цикл клітини, навпаки, не містить фази занепаду – розподіл, що є одночасно і народженням двох нових клітин, і загибеллю вихідної, настає безпосередньо після фази росту. Єдиними системами, що не підлягають дії закону односпрямованості розвитку, є, напевне, атоми, які взагалі не зазнають, як ми вважаємо вже сьогодні, змін у часі.

У разі біологічних систем механізм дії закону односпрямованості розвитку полягає в порушенні нормальної молекулярної структури елементів клітини тепловим рухом молекул. Оскільки ці порушення (мутації) у переважній більшості є шкідливими, то живі організми, починаючи з клітини, можуть існувати, лише безупинно створюючи копії своїх підсистем замість відмерлих. Речовину, енергію й інформацію для цього організми одержують із зовнішнього середовища. Проте стан зовнішнього середовища змінюється, тому внаслідок природного відбору вижили лише ті системи, що створювали копії своїх підсистем «із запасом». Однак зайве нагромадження в клітинах призводить до росту як самих організмів, так і їх кількості. Відповідно зростає вхідний потік інформації, пропустити який система може, лише збільшивши ступінь своєї складності. Але, як зазначено вище, ступінь складності не може зростати до нескінченності. Система починає розпадатися на окремі незалежні частини.

Системний аналіз – це методологічна дисципліна, що базується на системному підході. Вона поєднує методи вивчення систем різної складності й призначення, розробляє ці методи, узагальнює їх, дає практичні рекомендації для їх використання. Системний аналіз застосовується для підготовки й обґрунтування шляхів вирішення складних проблем політичного, соціального, військового, економічного, технічного характеру. Системний аналіз – це прикладна діалектика.

Головна процедура системного аналізу – побудова узагальнених моделей, в яких відображені закономірності реальної ситуації. Моделі системного аналізу відображають структуру, взаємозв'язки у складних системах, реальну ситуацію та проблеми, які в них виникають. За допомогою створених моделей досліджують системи й знаходять шляхи вирішення складних проблем практичної діяльності людини.

Технічна основа системного аналізу – інформаційні системи, обчислювальна техніка та сучасні методи керування. Системний аналіз вивчає такі питання:

- утворення цілого;
- побудова цілого;

- зростання і розвиток цілого;
- відношення між цілісною системою та іншими системами;
- відношення між системою та метасистемою, великою зовнішньою системою, до складу якої вона входить.

Цілями системного аналізу є вивчення загальних закономірностей складних систем різної природи й характеру. Практична спрямованість системного аналізу полягає у вирішенні непростих проблем, що виникають унаслідок діяльності людини.

Спеціалісти із системного аналізу вивчають процеси у складних системах, аналізують результати, до яких приводять ці процеси, оцінюють перспективи розвитку систем. Їх завданням є прогнозування можливих сценаріїв розвитку, запобігання небажаним явищам та катастрофам, які можуть виникнути в результаті діяльності людини, а також внаслідок природних процесів розвитку систем та їх взаємодії між собою. Системний аналіз є основою прийняття рішення у складних ситуаціях, коли ефективність цих рішень неоднозначна й оцінити її важко. Отже, системний аналіз розробляє наукові методи вирішення складних проблем у системах навколишнього світу. Він виступає як каркас, що об'єднує методи та знання для вирішення проблем. Головними методами системного аналізу є побудова моделей систем різного рівня і складності та аналіз систем за допомогою побудованих моделей.

Завданнями системного аналізу займається Міжнародний інститут прикладного системного аналізу (International Institute for Applied Systems Analysis – IIASA), створений у 1972 р. Метою досліджень, що виконуються в цьому інституті, є розроблення методів прогнозування й оцінки соціальних та інших аспектів науково-технічного прогресу. В ньому вивчають проблеми методології системного аналізу, проблеми економіки, екології, сільського господарства, енергетики, глобального моделювання, інформатики, дослідження міст, водних та лісових ресурсів, транспорту, регіонального розвитку та ін. Методи системного аналізу широко використовують в управлінні й зв'язку, організації виробництва, керуванні матеріальними потоками, резервами та в інших напрямках діяльності.

Проблеми системного аналізу прийнято поділяти на глобальні й універсальні. *Глобальні* проблеми мають загальнопланетний, загальнолюдський характер. *Універсальні* проблеми – це проблеми локальних систем чи мікросистем, таких як проблеми розвитку міст, великих підприємств, окремих галузей промисловості тощо. Зростання населення у світі, збільшення кількості великих міст і їх розмірів, прискорення темпів розвитку науки й техніки призводять не лише до розширення дії людини на середовище, в якому вона проживає, але й до змін у характері втручання людини в природні процеси. Дія людини на природу сьогодні досягнула рівня, який за масштабами може бути порівняний до дії наймогутніших сил самої природи. Існує загроза в незворотних змінах у земній атмосфері, порушень у головному механізмі підтримання та забезпечення життя на планеті, повного вичерпання мінеральних ресурсів, невідновних втрат природних умов життя майбутніх поколінь.

Системний аналіз базується на системному підході, а також на ряді математичних дисциплін та сучасних методах керування.

Системний підхід – це напрямок дослідження, вивчення світу, в основу якого покладний розгляд об'єктів як системи, орієнтація на розкриття цілісності об'єкта, виявлення різноманітності зв'язків у ньому і приведення їх до єдиної теоретичної картини.

Основними принципами системного підходу є:

1. Принцип взаємозв'язку – система вивчається як частина певної макросистеми. Вона зв'язана безліччю зв'язків з іншими системами, взаємодіє та існує в єдності з ними.

2. Принцип багатоплановості – система як деяка самостійна одиниця вивчається з різних боків зі своїми особливостями.

3. Принцип багатовимірності, який полягає в тому, що вивчаються різні характеристики систем, які об'єднують в групи (кластери): об'єкт описується як сукупність деяких характеристик та взаємозв'язків між ними.

4. Принцип ієрархічності – система розглядається як складна структура з різними рівнями, між якими встановлюються певні зв'язки.

5. Принцип різнопорядковості – полягає у тому, що різні ієрархічні рівні системи породжують закономірності різного порядку. Одні закономірності властиві лише всім елементам або деякій групі елементів, а інші лише окремим елементам.

6. Принцип динамічності – система розглядається в рухові й розвитку.

Відповідно до системного підходу будь-який об'єкт виникає та існує в рамках деякої великої системи. Зв'язки між об'єктами та системою є істотними основами виникнення, існування та розвитку об'єкта і системи в цілому.

Практичне значення системного аналізу полягає в тому, що він є методологією і практикою цілеспрямованого перетворення як самої людини, так і навколишнього світу.

Таким чином, головним методологічним принципом вивчення всіх біосистем повинен стати екосистемний підхід, оскільки:

1) він найбільш адекватно відображає суть організації, розвитку та поточного стану біосистем;

2) тільки так ми можемо вивчити кібернетичну природу механізмів гомеостазу екосистем та їх збої в умовах надмірних антропогенних навантажень;

3) необхідне взаємозв'язане, сумісне вивчення екосистем на всіх (основних) рівнях організації живого – виходячи із принципів ємерджентності, функціональної інтеграції та ієрархічної організації біосфери та систем її гомеостазу.

Екосистемний підхід дозволяє виявити специфіку змін:

- навколишнього середовища;
- ценотичних взаємовідносин особин у популяціях, а також міжпопуляційних відносин;
- відношень біоценозів із середовищем;
- структури екосистем в цілому на певних ієрархічних рівнях;

- структури ієрархії екосистем певних класифікаційних таксонів та біосфери в цілому.

Отримана інформація сприятиме виявленню:

- «слабких ланок» в екосистемах;
- механізмів та форм реакції екосистем на збудження;
- причинно-наслідкових зв'язків;
- переліків специфічних екологічних проблем, диференційованих за: а) причиною (адресом); б) локалізацією; в) поєднанням з іншими негативними чинниками та г) значущістю загроз (масштабом, інтенсивністю прояву, небезпекою тощо);

- найбільш адекватних напрямків вирішення проблем.

Під час екологічного дослідження антропогенних навантажень повинні вирішувати три проблеми, пов'язані: 1) з об'єктом; 2) з явищем; 3) із рівнем навантаження, або рівнем трансформації (див. табл. 1.3).

Таблиця 1.3 Співвідношення реакції екосистеми з рівнями антропогенного впливу

Діапазон стану екосистеми у процесі деградації	Дози впливу	Поріг	Антропогенне навантаження	Загроза
<p>Нормальні флуктуації. Діагностичні ознаки мінімально відхиляються від середніх значень.</p> <p>Екстремальні флуктуації. Діагностичні ознаки відхиляються до меж амплітуди флуктуацій.</p> <p>Хронічні зміни. Істотно змінюються другорядні ознаки стабільності головних.</p> <p>Гострі зворотні зміни. Істотно змінюються головні ознаки при збереженні залишкових.</p> <p>Гострі незворотні зміни. Майже повна втрата діагностичних ознак вихідної екосистеми.</p> <p>Повна деградація. Екосистема відсутня</p>	Фонові	Чутливості	Нульова	С
	Низьні		Допустима	В
	Помірні	Токсичності	Гранично допустима	А
	Токсичні		Недопустима	А
	Суб-летальні	Стійкості	Катастрофічна	А
	Летальні			А
	Вживання			

Досить великі труднощі дослідники зустрічають при спробах диференціювати причини пригнічення розвитку природних екосистем, фітоценозів, популяцій та окремих особин у районах із комплексним впливом негативних факторів, особливо якщо це сукупність антропогенних та природних чинників (рис. 1.4). Це пов'язано із властивістю екологічних факторів при сумісній дії проявляти ефекти адитивної, синергічної та антагоністичної взаємодії. Крім того, різні за природою негативні чинники досить відрізняються за режимом (періодичністю, інтенсивністю та тривалістю)

впливу на екосистеми, ступенем пригнічення розвитку їх структурно-функціональних компонентів, наслідками в цілому.

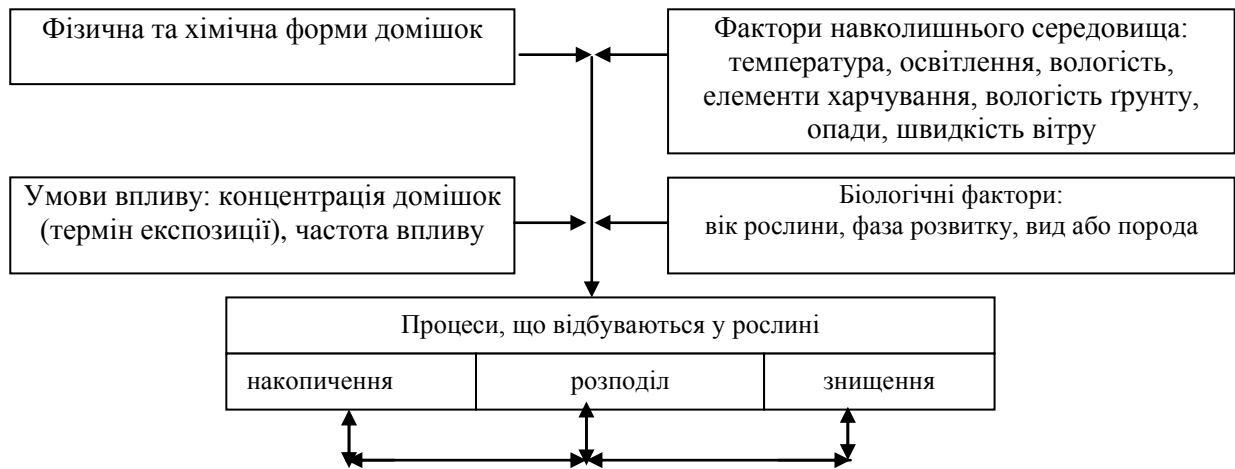


Рисунок 1.4 – Фактори, що визначають відповідну реакцію рослин на атмосферні полютанти (Weinstein, McCune, 1979 за У. Смітом)

Отже, на даному етапі розвитку методології дослідження стану природних об'єктів здебільшого проводяться без взаємної ув'язки методичних підходів, що значно звужує їх можливості, а отримані результати відображають лише частину картини явища. Однобокість під час дослідження екосистем, як відомо, часто зумовлює помилкові висновки, неадекватні управлінські рішення, що в цілому не сприяє вирішенню проблем.

Таким чином, для встановлення істинного стану природних екосистем та з'ясування причин їх пригнічення в умовах антропогенезу необхідно об'єднати зусилля всіх дослідників, що вивчають ці питання на принципах екосистемного підходу.

Ще одна проблема полягає у різноякісності інформації, оскільки кожна природна екосистема характеризується трьома групами характеристик: 1) біологічні; 2) геохімічні та 3) географічні. Кожна група інформації специфічна. Стан екосистеми та відхилення від норми проявляється в біологічній групі, але його причини потрібно шукати в екології, тобто у другій та третій групах характеристик. Крім класифікації антропогенних чинників за адресом їх впливу на екосистему, необхідно вивчити їх сумісний вплив у часі та просторі, встановити внесок кожного чинника (чи певної їх групи) в негативному ефекті, провести інтеркорелятивний аналіз зі встановленням адитивних, синергічних та антагоністичних їх взаємодій. Це потребує використання кібернетичних та еколого-економічних моделей і значно ускладнює розвиток методології екосистемних досліджень антропогенних трансформацій навколишнього природного середовища. Системний підхід передбачає врахування всіх аспектів цього явища. Тому явище необхідно класифікувати за об'єктами, причинами виникнення та умовами перебігу. Наприклад, причини та масштаби наслідків пірологічного впливу на природні екосистеми залежать від характеристики трьох систем (за Лавровим В. В.):

А. Система, що зазнає пірологічного впливу

1. Тип екосистеми, що зазнає пірологічного впливу:
 - 1) тип лісу – склад деревостану (листяний, мішаний, хвойний);
 - 2) тип сільськогосподарського угіддя (луг, поле);
 - 3) цінність екосистеми щодо збереження біорізноманіття тощо.
2. Характеристика екосистеми:
 - 1) вік деревостану, його щільність;
 - 2) запаси та характеристика пірологічно небезпечних матеріалів (наявність сухоостою, повалених дерев, захаращеність, запас підстилки, сухого травостою тощо).

Б. Система, що впливає на розвиток явища

1. Метеорологічні фактори (на рівні ландшафту): засухи, атмосферні опади, вітровий режим тощо.
2. Організаційна характеристика ландшафту: інфраструктура доріг, відстань до населених пунктів, водоймищ тощо.
3. Типи сусідніх природних екосистем.

В. Система, що контролює небезпеку явища, – соціоекосистема

1. Інтенсивність рекреаційного навантаження на природні екосистеми та його нормативність.
2. Дотримання вимог природоохоронного законодавства під час випалювання рослинності.
3. Ефективність системи превентивних заходів.
4. Ефективність системи моніторингу та попередження пожеж.
5. Відповідність сучасним вимогам та забезпеченість ресурсами системи гасіння пожеж.

Масштаб наслідків залежить також від часу виникнення пожежі, інтенсивності та площі пожежі.

Таким чином, з наведеного прикладу бачимо, що під час екологічних досліджень необхідно враховувати безліч взаємозв'язаних та взаємообумовлених факторів впливу на розвиток живих систем. Тому завдання, що ставляться перед дослідниками, є або дуже складними для аналітичного вирішення, або не призводять до отримання об'єктивних результатів за нехтування істотними аспектами впливу на екосистеми. У свою чергу, системний підхід надає методології комплексного та всебічного дослідження поставлених завдань залежно від мети аналізу та завдяки можливості спрощення системи або декомпозиції проблеми на більш прості завдання, шляхом вилучення неістотних елементів та зв'язків та встановленню ієрархії цілей, отримати достовірні результати аналізу.

З урахуванням вищенаведеного **завданнями** дослідження екологічних систем є вивчення (за М. А. Голубцем):

- 1) морфологічної структури екосистем, тобто вертикальної (ярусність, синузальність, шаруватість) і горизонтальної (мозаїчність, парцелярність) будови біогеоценотичної товщі (рослинного покриття, ґрунту чи води, насичених тваринними, мікробними і грибовими організмами);
- 2) взаємозв'язків між структурними компонентами (блоками,

підсистемами) екосистем (залежно від потреб – морфологічними, трофічними та іншими);

3) функціональних показників екосистеми та її окремих структурних блоків (енергетичних, водотрансформаційних, організаційних, біогеохімічних, середовищеутворювальних, біопродукційних, захисних, оздоровчих, естетичних та інших), швидкості екологічних процесів, їх спрямованості, тривалості й господарської ефективності;

4) особливостей і механізмів самоорганізації, саморегуляції і самозбереження екосистем, їх внутрішнього речовинно-енергетичного та інформаційного обміну, показників неентропійності, стійкості щодо зовнішніх природних та антропогенних чинників, стабільності існування в часі та просторі;

5) міжекосистемних взаємозв'язків і міжекосистемного речовинно-енергетичного та інформаційного обміну як основи стійкості й стабільності мегаекосистем і біосфери;

6) можливостей і розмірів використання природних ресурсів екосистем для народногосподарських потреб без зменшення або руйнування їх екологічного потенціалу та із цілеспрямованою орієнтацією на реалізацію ідей сталого розвитку;

7) масштабів і наслідків антропогенних змін у структурно-функціональній організації екосистем, способів ренатуралізації трансформованих і деастрованих екосистем з метою оптимізації біогеоценотичного покриву;

8) структурно-функціональних особливостей та ефективних способів створення штучних (аграрних, лісових, водних, урбаністичних та інших) екосистем й ефективного підтримання їх функцій;

9) теоретичне обґрунтування структури, програми, методів і параметрів екологічного моніторингу в екосистемах різних ступенів організації;

10) генезису та історії розвитку екосистем;

11) моделювання та прогнозування екологічних процесів.

1.7 Складність екологічних систем

Складними називають системи, для яких характерні унікальність та неможливість чи небажаність натурних експериментів над об'єктами як джерела інформації під час моделювання та прийняття рішень.

При конкретних розробленнях термін «складна система» асоціюється з об'єктом, що складається із множини ієрархічно побудованих частин, які знаходяться у тісній взаємодії та становлять єдине ціле.

Для вивчення складних систем пропонується така схема: об'єкт (уявою або думкою) поділяється на порівняно однорідні взаємодіючі частини (тобто більш низького рівня), потім дається математичний опис цих частин. Далі за допомогою експериментів, знань та досвіду спеціалістів також дається опис зв'язку між цими частинами. Таким чином робиться модель складного об'єкта. Далі за допомогою теоретичного вивчення та експериментів з моделлю досягається основна мета – вивчення об'єкта та керування ним.

Розглянемо особливості функціонування екологічних систем, що обумовлюють їх складність.

До основних загальних властивостей біологічних, екологічних, геологічних систем належать: територіальна та просторова неоднорідність, поліструктурність, цілісність, відкритість, динамічність, стійкість, стохастичність.

Територіальна та просторова неоднорідність притаманна кожному типу систем. В екологічних системах вона виявляється у зміні зовнішніх та внутрішніх факторів за горизонталлю (мозаїчність екосистем) та вертикаллю (ярусність).

Територіальність-просторовість – це також особливість усіх геосистем, що відрізняє їх від багатьох систем інших класів, зокрема екосистем. Із зовнішнього середовища геосистеми виділяються як певні ділянки території. Кожну геосистему можна описати метричними показниками (площею, лінійними розмірами) і топологічними (характеризують положення даної геосистеми щодо інших геосистем або об'єктів іншої природи). Територіальність геосистем дає можливість ефективно використовувати картографічні методи при їх виділенні, зображенні та аналізі.

Фактично геосистеми виділяються не стільки як територіальні (двовимірні), скільки як просторові системи. Проте просторовість властива багатьом класам систем і взагалі не потребує залежності характеристик системи від місцезнаходження та розмірів території. Структурні, динамічні та інші особливості геосистеми дуже залежать від того, яку саме ділянку земної поверхні (території) вона займає. Тому цю її властивість доцільно називати територіальністю-просторовістю.

До геосистем належать природні системи лише певного просторового інтервалу. Лінійні розміри геосистем найменших розмірів – декілька метрів, а географічної оболонки, якщо її вважати за геосистему, – 10^7 – 10^8 м по горизонталі та 10^3 – 10^4 м по вертикалі. Таким чином, аналіз геосистем виконується в просторовому інтервалі від 10^0 до 10^8 м. Як довів В. О. Боков, порівняно з величинами, відомими в природі (найменші досліджені відстані становлять 10^{-22} м, розміри найбільших галактик – 10^{21} м), це дуже малий діапазон – лише 10^{-31} % інтервалу відомих у природі лінійних відстаней.

Розмір геосистеми визначає особливості факторів її формування та динаміки, багато інших особливостей, а також методи дослідження. На цій підставі розробляється концепція просторової розмірності геосистеми. Згідно з нею різні ранги геосистем можна узагальнити до значно меншого числа розмірностей. Щодо числа цих класів єдиної думки у ландшафтних екологів та ландшафтознавців немає. Найдоцільніше виділення 6 класів (рівнів) просторового геосистемного аналізу:

- 1) субтопічний (просторовий масштаб 10^0 – 10^1 м²);
- 2) топічний (10^2 – 10^4 м²);
- 3) хоричний (10^4 – 10^8 м²);
- 4) регіональний (10^7 – 10^{12} м²);
- 5) субглобальний (10^{10} – 10^{14} м²);

б) глобальний (10^{14} – 10^{16} м²).

Поліструктурність. Під структурою системи розуміють характер поєднання її елементів певного типу відношеннями. Оскільки в тій самій системі можуть бути відношення різних типів, то й поєднання ними елементів також буде неоднаковим, тобто в одній системі може бути кілька різних структур. Такі системи називаються поліструктурними. Ними, наприклад, є суспільні системи (у них виділяють статево–вікову, етнічну, професійну та інші структури, що не збігаються). Ці відношення визначають спосіб поділу системи на її елементи (декомпозицію системи), їх склад та поєднання у підсистеми.

Визначення типу відношень, що вважаються структуроформувальними, тобто щодо яких виділяється структура геосистеми, залежить від аспекту аналізу останньої. Найбільш загальними аспектами аналізу систем є:

1) вертикальний (синонім – топічний), де елементами є різні фізичні тіла геокomпонентів, а відношеннями – вертикальні потоки різних речовин та енергії, генетико-еволюційні та ін.;

2) територіальний (синонім – хоричний), елементами якого є підсистеми нижчого рангу, ніж досліджувана, а відношеннями – горизонтальні потоки між ними, позиційні залежності, генетико-еволюційні та ін.;

3) часовий (синонім – динамічний), елементи якого виділяються як окремі інтервали часу, а відношення – як послідовність їх змін.

Відповідно виділяються вертикальний, територіальний та часовий класи структур екосистеми.

Кожен із загальних аспектів аналізу системи реалізується у більш конкретних формах. Так, у рамках територіального аспекту досліджуються такі різні типи відношень, як зв'язок еко- та геосистем потоками води, повітря, міграцією тварин, їх позиційні, генетико-еволюційні зв'язки тощо. Відповідно до цих типів відношень виділяються й різні типи територіальних структур геосистеми. Послідовна конкретизація аспекту аналізу геосистеми приводить до конкретизації поняття її структури.

Ефективним підходом структурного аналізу геосистем є модульний. Модуль системи виділяється як сукупність усіх її елементів, пов'язаних безпосередніми відношеннями з якимось одним елементом або їх деякою фіксованою групою. Будь-який модуль є моноцентричною структурою. Класична модель екосистеми – типовий приклад модуля, виділеного з геосистеми. Взагалі в геосистемі можна виділити як мінімум стільки модулів, скільки в ній є елементів, тобто в межах однієї геосистеми можна аналізувати багато різних екосистем – ґрунту, певного виду рослин чи всього фітоценозу або ґрунтово-рослинного комплексу тощо.

Цілісність – властивість системи, яка проявляється в тому, що вилучення з неї певного компонента призводить до її кардинальної перебудови або взагалі загибелі, а сам цей компонент окремо від системи існувати не може або ж він якісно змінюється. Екосистеми мають риси цілісності. Так, позбавлення екосистем ґрунту призводить до їх трансформації в цілому – вони не можуть мати і рослинності, практично зникає трофічна структура, формуються специфічні водний, радіаційний, геохімічний та інші режими. Такої самої

радикальної трансформації зазнає територіальна структура геосистеми. Наприклад, вилучення з неї елементів локальної ерозійної сітки (геосистем лощин, ярів, балок) призводить до інтенсивного заболочення вододілів, зміни гідрологічного і ландшафтно-геохімічного режимів геосистеми в цілому.

Своєрідність прояву цілісності у системах полягає в тому, що з вилученням із їх структури певних елементів система стає іншою (іншого типу), але не замінюється системою якогось іншого класу. В цьому відношенні цілісність геосистеми значно нижча, ніж цілісність біосистем (наприклад, окремого організму), технічне вилучення деяких елементів з яких призводить до їх розпаду (загибелі або поломки). У геосистемах може й не бути деяких геокомпонентів (грунтів, рослин), проте системні зв'язки між тими, що є, і тут зберігаються.

Більш «сильним» виявом цілісності систем є їх емерджентність (синонім – холістичність), тобто притаманність системі таких властивостей, якостей та функцій, яких не має жоден з її елементів і які не можуть виникнути при їх механічній суміші, а лише за умови їх взаємодії. Як приклад таких холістичних проявів екосистеми можна навести продукційний процес (продукування біомаси – наслідок складної взаємодії всіх компонентів), кругообороти різних субстанцій, здатність системи до самоочищення тощо.

Відкритість. Відкритими є системи, частина елементів яких мають зв'язки з елементами, що не належать до її структури. Елементи останнього типу становлять зовнішнє середовище системи, а зв'язки, що йдуть від них до системи, називають вхідними, входами, зовнішніми сигналами. Крім вхідних, є й вихідні зовнішні зв'язки системи (синоніми – виходи, відгуки). Системи, що мають лише вхідні зовнішні зв'язки і практично не мають вихідних, називають напівзакритими. Закритими вважаються системи, у яких немає зовнішніх зв'язків, тобто які не залежать від зовнішнього середовища. Щодо екосистем останнього сказати не можна, оскільки такі вхідні потоки, як надходження сонячної радіації, атмосферні опади тощо – неодмінна умова їх існування. Проте як напівзакриті можна розглядати деякі типи систем, наприклад акумулятивного геохімічного режиму. Горизонтальними потоками води, вітру, речовини, біотичними міграціями одні геосистеми пов'язані з іншими. Геосистеми відкриті й до антропогенних навантажень.

Ступінь зв'язку екосистем із зовнішнім середовищем настільки тісний, що є важливі підстави вважати їх характерною ознакою слабкої відокремленості із зовнішнього середовища. Із цією особливістю пов'язана, зокрема, складність визначення вертикальних та горизонтальних меж досліджуваної системи.

Динамічність. Динамічними називаються системи, значення характеристик яких змінюються в часі. У різні проміжки часу геосистема може перебувати у неоднакових станах, тому її повний опис передбачає вияв цих станів та послідовності їх змін. Таким чином, геосистеми виділяються не лише в просторі, а й у часі. Якщо з просторово-територіальної точки зору екосистема *вичленовується* як деякий

територіально локалізований об'єм, то із часової – як певний інтервал часу, протягом якого система виявляє свої основні особливості.

Важливою особливістю динаміки екосистем є те, що різні її характеристики змінюються в часі з різною частотою. Метеорологічні показники дуже мінливі, тоді як властивості геологічної основи геосистеми змінюються дуже повільно. Виділяють різні класи часових розмірностей системи. Прийнято розрізняти добову, сезонну (річну) та багаторічну динаміку.

Стійкість екосистеми проявляється у багатьох формах і дає їй змогу протистояти зовнішнім впливам, зокрема антропогенним, зберігати за взаємодії із зовнішнім середовищем свою цілісність та інші ознаки. Нестійкі в цих умовах геосистеми змінюються на більш стійкі типи, тому стійкість екосистеми значною мірою зумовлена генетико-еволюційно. У процесі еволюції шляхом пристосування геокомпонентів та контактуючих геосистем одна до одної формуються їх стійкі ландшафтно-екологічні взаємовідносини і структури. В умовах інтенсивного втручання людської діяльності в природу ця рівновага часто порушується. Розвиток деградаційних процесів у екосистемах (вимирання видів, ерозія та засолення ґрунтів, забруднення тощо) є не чим іншим, як наслідком втрати ними стійкості до антропогенних навантажень. Тому оцінка стійкості системи до зовнішніх факторів є однією з найважливіших прикладних проблем екології.

Стохастичність. Стохастичними називаються системи, залежність між характеристиками яких та їх зв'язки із зовнішнім середовищем не жорстко детерміновані (функціональні), а статистичні, ймовірнісні. Причин цього багато; одна з них полягає в опосередкованості взаємодій між елементами екосистем: елемент А діє на В, В – на С і т. д. Такі ланцюги зв'язків у екосистемі можуть бути дуже довгими. А чим довший ланцюг, тим менш тісними, менш однозначними стають зв'язки між кінцевими елементами. На систему діє багато зовнішніх факторів суто стохастичної, ймовірнісної природи (наприклад, випадання опадів), що зумовлює ймовірнісний характер її динаміки та еволюції.

Стохастичність екосистем проявляється у статистичному (корелятивному) характері зв'язків між її окремими ознаками (наприклад, між продуктивністю та гумусністю, сумою опадів тощо), відсутності жорсткої прив'язаності одного типу геокомпонента до іншого (певного виду рослинного угруповання до лише одного певного виду ґрунту), незбігові природних меж різних геокомпонентів, неоднозначності змін геосистем за певних антропогенних навантажень, ймовірнісний характер динаміки, зокрема прогнозу тощо. Усе це береться до уваги під час дослідження екосистем методами системного аналізу з використанням теорії ймовірностей та математичної статистики.

Контрольні запитання і завдання до самостійної роботи до розділу

1. За якими ознаками здійснюється класифікація систем?
2. Яке значення має класифікація систем для вивчення даного навчального предмета?
4. Які абсолютні сторони класифікації систем?
5. У чому полягає відносність класифікації?
6. Як ви розумієте поняття принципи класифікації?
7. Що розуміють під ієрархічною системою класифікації?
8. Як класифікують системи залежно від того, з чого вони створені?
9. Як класифікують системи за походженням?
10. Які труднощі визначення цілей систем штучного походження?
11. Які труднощі визначення цілей систем природного походження?
12. Як визначити об'єктивні цілі системи?
13. Чому виникає потреба класифікувати системи за ступенем зв'язку з навколишнім середовищем?
14. Чим відрізняється розвиток замкнених і розімкнених систем?
15. До яких систем належить поняття «теплова смерть», у чому його суть?
16. Що таке принцип гомеостазу?
17. Яка роль поняття «ентропії» у системному аналізі?
18. Які принципи поведінки систем ви можете назвати?
19. Що таке зворотний зв'язок, у якому класифікаторі він враховується?
20. Які способи самокерування властиві системам?
21. Які принципи поведінки систем ви знаєте?

2 ЗАКОНОМІРНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Структурно-функціональні рівні організації органічного світу

Повітря і вода, рослинність і ґрунти, звірі й птахи та інші живі організми утворюють взаємозв'язану і взаємозумовлену світову біосферу, яка підтримує все живе і яка, незважаючи на могутню життєздатність, складається з тендітних і надто вразливих систем, рівновага в яких дуже легко порушується. Природні системи досить різноманітні, вони складаються з величезної кількості різноорганізованих, взаємозумовлених і взаємозамінних компонентів, які об'єднані безліччю прямих і зворотних зв'язків. Незважаючи на те, що системи досить різноманітні, їм притаманна низка спільних рис.

Щоб більш наочно розкрити суть процесів, що проходять у біосфері, розглянемо основні функції живої речовини: енергетичну, деструктивну, концентраційну і середовищеутворювальну.

Енергетична функція виконується насамперед рослинами, які в процесі фотосинтезу акумулюють сонячну енергію у вигляді різноманітних органічних сполук. За словами Вернадського, зелені хлорофілові організми є головним механізмом біосфери, який уловлює сонячний промінь і створює фотосинтезом хімічні тіла – своєрідні сонячні консерви, енергія яких надалі є джерелом дієвої хімічної енергії біосфери, а значною мірою – всієї земної кори.

Енергія, що акумулюється рослинами і перетворюється в енергію хімічних зв'язків, розподіляється всередині екосистеми між тваринами у вигляді їжі. Частково енергія розсівається, а частково накопичується у відмерлій органічній речовині й переходить у викопний стан. Так утворилися поклади торфу, кам'яного вугілля, нафти та інших паливних корисних копалини. У зв'язку з тим, що рослини є головним джерелом енергії для інших живих істот, то їх збереження є запорукою збереження життя на нашій планеті. Саме тому сьогодні особливо гостро стоїть питання вирішення проблем опустелювання та знеліснення. Кількість енергії Сонця, що потрапляє на Землю, можна вважати сталою величиною, а зменшення первинної біомаси внаслідок знеліснення та опустелювання призводить до пропорційного скорочення популяцій інших видів унаслідок нестачі їжі. Зараз ця недостатність приросту біомаси ще компенсується накопиченим надлишком первинної продукції, хоча саме з цієї причини зараз зникли і зникають види живих істот і скорочується біологічне різноманіття біосфери.

Деструктивна (руйнівна) функція полягає в розкладанні, мінералізації мертвої органічної речовини, хімічному розкладанні гірських порід, залученні мінералів, що утворилися, в біотичний кругообіг.

Мертва органічна речовина розкладається до простих неорганічних сполук (вуглекислого газу, води, сірководню, метану, аміаку і т. д.), які знову використовуються в початковій ланці кругообігату. Цим займається спеціальна група організмів – *редуценти*.

Особливо потрібно наголосити на хімічному розкладанні гірських порід. Завдяки живій речовині біотичний кругообігат поповнюється мінералами, що

вивільняються з літосфери. Піонери життя на скелях – бактерії, синьо-зелені водорості, гриби та лишайники – чинять на гірські породи сильну хімічну дію розчинами цілого комплексу кислот – вугільної, азотної, сірчаної і різних органічних. Розкладаючи з їх допомогою ті або інші мінерали, організми вибірково вилучають і включають у біотичний кругооборот найважливіші поживні елементи – кальцій, калій, натрій, фосфор, кремній, мікроелементи. Наприклад, пліснявий грибок у лабораторних умовах за тиждень вивільняє з базальту 3 % кремнію, що міститься в ньому, 11 % алюмінію, 59 % магнію, 64 % заліза.

Загальна маса зольних елементів, що включаються щорічно до біотичного кругообороту лише на суші, становить близько 8 млрд тонн. Це у декілька разів перевищує масу продуктів виверження всіх вулканів світу протягом року. Завдяки життєдіяльності організмів-деструкторів створюється унікальна властивість ґрунтів – їх родючість.

Концентраційна функція полягає у вибіркового накопиченні під час життєдіяльності організмів атомів речовин, розсіяних у природі. Здатність концентрувати елементи з розбавлених розчинів – це характерна особливість живої речовини. Найбільш активними концентраторами багатьох елементів є мікроорганізми. Наприклад, у продуктах життєдіяльності деяких із них порівняно з природним середовищем вміст марганцю збільшений у 1200000 разів, заліза – в 65000, ванадію – в 420000, срібла – в 240000 разів і т. д.

Морські організми активно концентрують розсіяні мінерали для будування своїх скелетів або покривів. Існують, наприклад, кальцієві організми (молюски, корали, моховатки, голкошкірі, вапняні водорості тощо) і кремнієві (діатомові водорості, кремнієві губки, радіолярії). Особливо потрібно звернути увагу на здатність морських організмів накопичувати мікроелементи, важкі метали, зокрема отруйні (ртуть, свинець, миш'як), радіоактивні елементи. Їх концентрація в тілі безхребетних і риб може в сотні тисяч разів перевищувати вміст у морській воді. Завдяки цьому морські організми корисні як джерело мікроелементів, але разом з тим вживання їх у їжу може загрожувати отруєнням важкими металами або бути небезпечним у зв'язку з підвищеною радіоактивністю. Антропогенні забруднення також накопичуються в тілах різних організмів, передаються по трофічному ланцюгу, де з кожним рівнем їх концентрація збільшується навіть до летальної для консументів вищого порядку.

Середовищеутворювальна функція полягає в трансформації фізико-хімічних параметрів середовища (літосфери, гідросфери, атмосфери) в умови, сприятливі для існування організмів. Можна сказати, що вона є сумісним наслідком усіх розглянутих вище функцій живої речовини: енергетична функція забезпечує енергією всі ланки біологічного кругообороту; деструктивна і концентраційна сприяють вилученню з природного середовища і накопиченню розсіяних, але життєво важливих для організмів елементів.

Середовищеутворювальні функції живої речовини створили і підтримують у динамічній рівновазі баланс речовини та енергії в біосфері, забезпечуючи стабільність умов існування організмів, зокрема людини. Разом з

тим жива речовина здатна відновлювати умови незаселені, порушені внаслідок природних катастроф або антропогенної дії.

Унаслідок цієї функції в географічній оболонці відбулися такі найважливіші події: був перетворений газовий склад первинної атмосфери; змінився хімічний склад вод первинного океану; утворилася товща осадових порід у літосфері; на поверхні суші виник родючий ґрунтовий покрив (також родючі води океану, річок та озер).

Якщо живу речовину розподілити на поверхні Землі рівним шаром, його товщина становитиме всього 2 см. За такої незначної маси організми здійснюють свою планетарну роль за рахунок дуже швидкого розмноження, тобто дуже енергійного кругообороту речовин, пов'язаного з цим розмноженням.

Маса живої речовини, що відповідає даному моменту часу, ледь зіставляється з тією грандіозною її кількістю, що виконувала свою роботу впродовж мільярдів років існування організмів. В. І. Вернадський вважав, що вся маса живої речовини, відтвореної за час існування біосфери, багато разів перевищує масу земної кори. На земній поверхні немає хімічної сили, що більш постійно діє, а тому і могутнішої за своїми кінцевими наслідками, ніж живі організми, взяті в цілому. Глини, вапняки, доломіт, бурі залізняки, боксити – це все породи біогенного походження. Нарешті, властивості природних вод, солоність Світового океану і газовий склад атмосфери визначаються життєдіяльністю живих істот.

Жива речовина в біосфері, взаємодіючи з навколишнім середовищем, пристосовуючись до нього і перетворюючи довкілля має певну структурно-функціональну організацію. На думку багатьох вчених, світ організований у вигляді ланцюжка, що складається з ланок зростаючої складності. Ця послідовність починається з елементарних частинок, з яких складається атом, іде до молекул, клітин і поширюється до складних індивідуумів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Рівні організації органічного світу

Основна група	Рівень	Приклад
Біологічні мікросистеми	Молекулярний (молекулярно-генетичний)	Органічні молекули білків, жирів та вуглеводнів (макромолекули), РНК, ДНК, АТФ і т. д.
	Субклітинний	Органели клітин: рибосоми, метакондрії, лізосоми і т. д.
	Клітинний	Клітини рослин та тварин
Біологічні мезосистеми	Тканинний	Нервова тканина, м'язова, кісткова і т. д.
	Органний	Печінка, серце, легені і т. д.
	Організмний	Індивідуум, організм
Біологічні макросистеми	Популяційно-видовий	Стадо, зграя, плем'я
	Біоценотичний	Фітоценоз, зооценоз, біом і т. д.
	Екосистемний	Біосфера (глобальна екосистема)

Одиниці одного рівня організації є частинками, з яких утворюється наступний вищий рівень. Молекули, об'єднуючись, утворюють клітини, клітини утворюють тканини та органи, які, у свою чергу, утворюють багатоклітинні організми, організми утворюють надорганізмові системи: види, популяції, біоценози, біогеоценози. Живе на нашій планеті – це окремі організми, особини. Кожен організм, з одного боку, складається з одиниць підпорядкованих йому рівнів організації (органів, клітин, молекул), з іншого – сам є одиницею, що входить до складу надорганізмових біологічних макросистем (популяцій, видів, біоценозів, екосистем, біосфери).

На всіх рівнях життя (організмовий, популяційний, екосистемний) спостерігаються певна впорядкованість, обмін речовин, енергії, інформації та ін. Завдяки обміну речовин та енергії встановлюється єдність живого із середовищем.

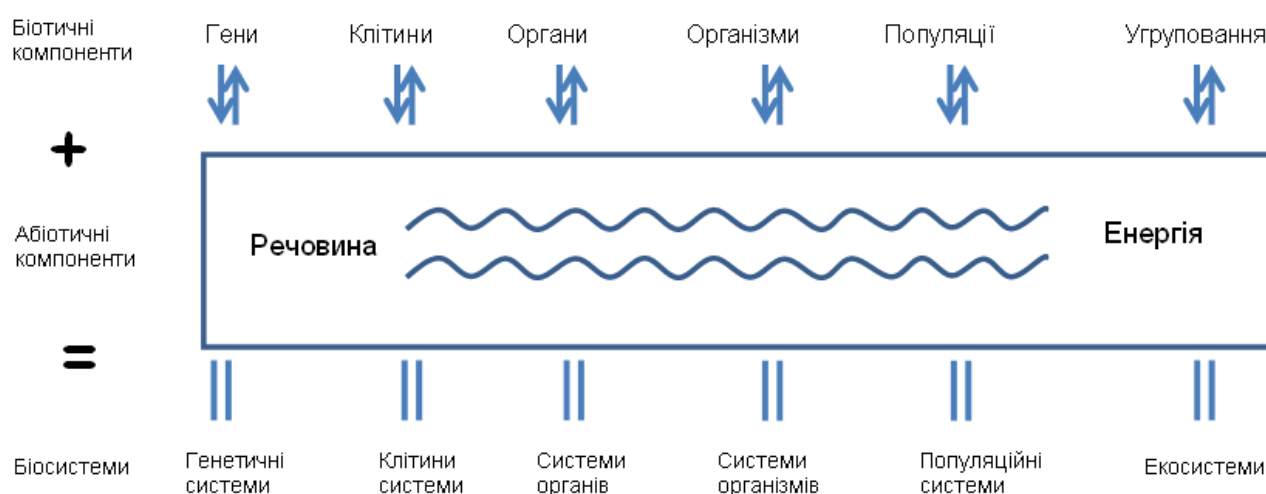


Рисунок 2.1 – Ієрархія біосистем

Розподіл біосистем на рівні (ступені) доволі умовний, оскільки кожен рівень інтегрований, тобто взаємозв'язаний із сусідніми рівнями у функціональному сенсі. Дійсно, клітини (окрім одноклітинних) не можуть функціонувати поза тканинами, тканини – поза органами, органи – поза організмом, окремі організми – поза популяцією, популяції не можуть існувати поза співтовариствами та екосистемами.

Найважливіший наслідок ієрархічної організованості живої природи полягає в тому, що при переході від нижчих підсистем до більших, у цих більших систем виникають принципово нові якості, властивості й закони їх функціонування, яких не було на попередньому рівні і які не можуть бути передбачені на підставі властивостей підсистем нижчого порядку.

При кожному об'єднанні підмножин в нову множину виникає принаймні одна нова якість або властивість. Цей принцип в екології називається принципом емерджентності (від англ. *emergent* – те, що несподівано виникає). Наприклад, властивості води не можуть бути передбачені на підставі властивостей кисню і водню. Щодо живої природи принцип емерджентності полягає в тому, що біологічні системи володіють властивостями, які не можна

звести до суми властивостей складових їх підсистем. З принципу емерджентності впливає вибір підходу у вивченні екологічних систем.

Науці відомі два різні підходи і способи мислення у вивченні складних систем:

- **холістичний** (від гр. *holos* – весь, цілий), при якому система вивчається в її цілісності, досліджуються загальні для системи, системні функції та закони;
- **редукціоністський** (від лат. *reductio* – зведення складного до простого), або мерологічний (від гр. *meros* – частина), при якому система вивчається шляхом детального аналізу все більш і більш дрібних підсистем, їх функцій і законів.

Людина від природи володіє схильністю до редукціоністського складу мислення, тобто людині властиве виявлення одиничних, простих причинно-наслідкових зв'язків і простих функціональних залежностей типу «**причина – наслідок**». Цим, зокрема, пояснюється складність вивчення процесів у біосфері, де спостерігаються багатопараметричні процеси, багаторівневі зворотні зв'язки, замкнені цикли, колообіги речовини та енергії, де наслідок є одночасно й причиною багатьох явищ.

Отже, кожен рівень організації живої матерії потребує самостійного вивчення (рис. 2.2).

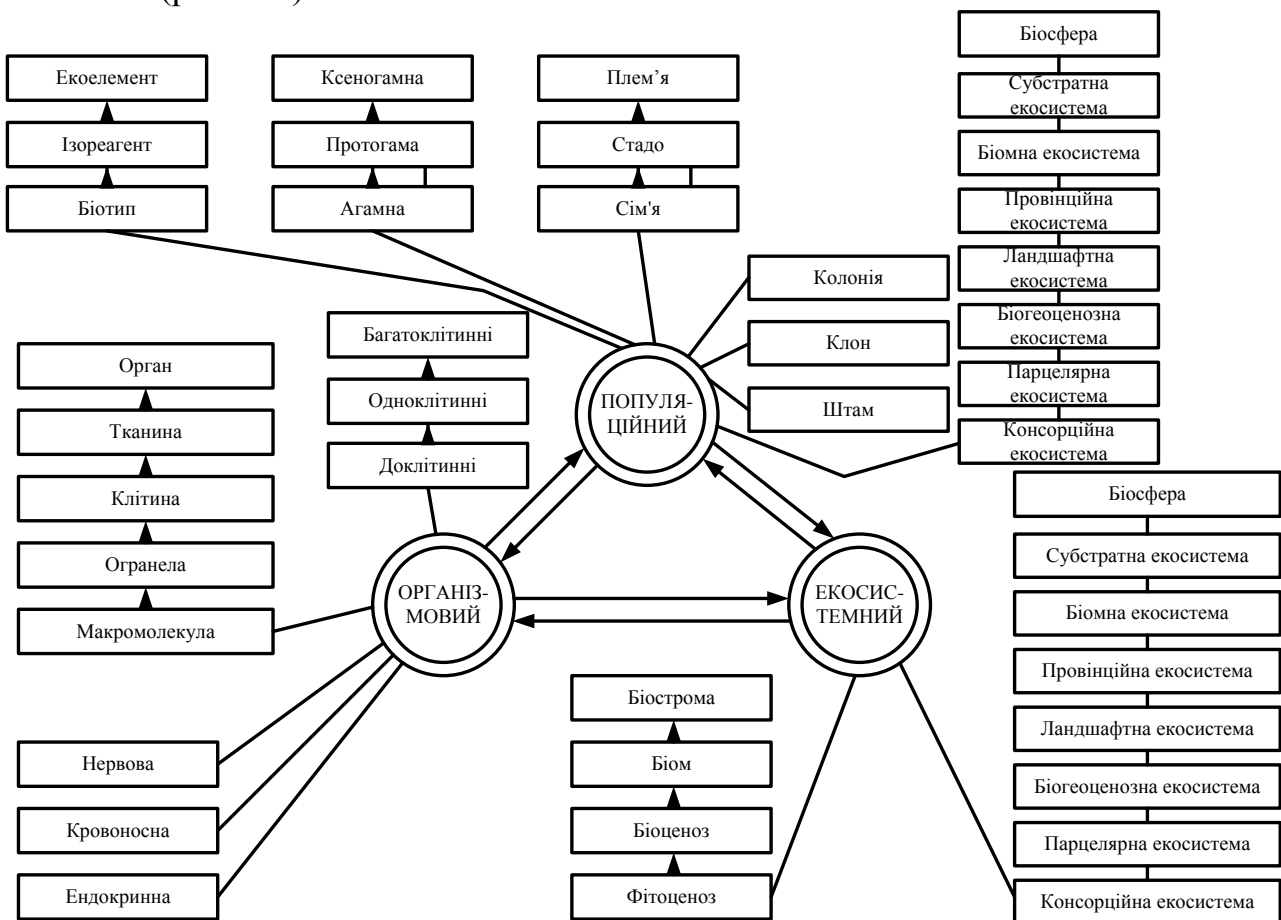


Рисунок 2.2 – Схема структурно-функціональних зв'язків між основними рівнями організації живого

Організмний рівень організації характеризується великою кількістю функцій, однак із загальноекологічних позицій найважливішою з них є розмноження і насичення простору живою речовиною, відтворення життєвого субстрату, постійний процес синтезу й деструкції, розгортання і мотичного кругообігу та ускладнення біосфери. До підпорядкованих систем цього рівня, чи ступенів його організації, належать доклітинні, одноклітинні та багатоклітинні організми, системи, які є структурними блоками високоорганізованих багатоклітинних істот (макромолекулярна, органельна, клітинна, тканинна, органа) або їх функціональні системи (кровоносна, нервова, травна, ендокринна, опорна, рухова та інші).

Основна **функція популяційного** рівня організації – це формування в певному ареалі (зайнятому однією популяцією) такого населення виду, яке за структурою та життєвими особливостями найбільше відповідає середовищу його існування; пристосовування популяції до біотичних та абіотичних компонентів тих екосистем, у яких вона є структурним блоком. Так, один біологічний вид унаслідок пристосування до факторів середовища, що закріплюються у фенотипі, може бути представлений декількома різними популяціями, тому популяція є **елементарною еволюційною структурою**, а процес історичного розвитку популяцій у ряді їх послідовних поколінь аж до утворення нового виду називають **мікроеволюцією**.

На **екосистемному** рівні організації реалізується третя найважливіша функція живих систем – безперервний обмін речовиною, енергією та інформацією між усіма живими її компонентами та середовищем їх існування. Кругообіг речовин і трансформація енергії в екосистемах будь-якої просторової чи функціональної складності здійснюється завдяки тісній взаємодії організмів різних трофічних груп між собою та з навколишнім середовищем. Підпорядкованими системами цього рівня організації, його внутрішніми ступенями є консорції, біогеоценози, ландшафтні, провінційні, біомні, материкові, морські екосистеми, аж до біосфери включно.

Екосистема – основна одиниця біосфери, що є об'єктом вивчення екології. Цей термін запровадив англійський біолог А. Тенслі у 1935 році. Екосистема – це просторова система, що охоплює історично сформований комплекс живих істот, пов'язаних між собою трофічними зв'язками, та неживих компонентів середовища їх існування, які залучаються в процесі обміну речовин та енергії. У кожній екосистемі відбуваються кругообіг речовин та обмінні енергетичні процеси.

Кожна екосистема складається з біоценозу та біотопу.

Біотоп – це ділянка поверхні землі з більш-менш однотипними умовами існування (грунтом, мікрокліматом тощо).

Біоценоз – це історично сформована сукупність рослин, тварин та мікроорганізмів, що населяє біотоп. Відповідно до цього кожний біоценоз складається з фітоценозу (угруповання рослин), зооценозу (угруповання тварин) та мікробіоценозу (угруповання мікроорганізмів) (рис. 2.3).

Екосистема може бути різних розмірів і складності. Наприклад, можна говорити про екосистему лісу в цілому і про екосистему окремого пенька.

Взаємодія організмів в екосистемі надзвичайно складна. Взаємодія біоценозів з біотопами відбувається через речовинно-енергетичний обмін. Для кожної екосистеми характерний свій біологічний кругообіг речовин, що здійснюється внаслідок існування в екосистемах трофічних ланцюгів (ланцюгів живлення).

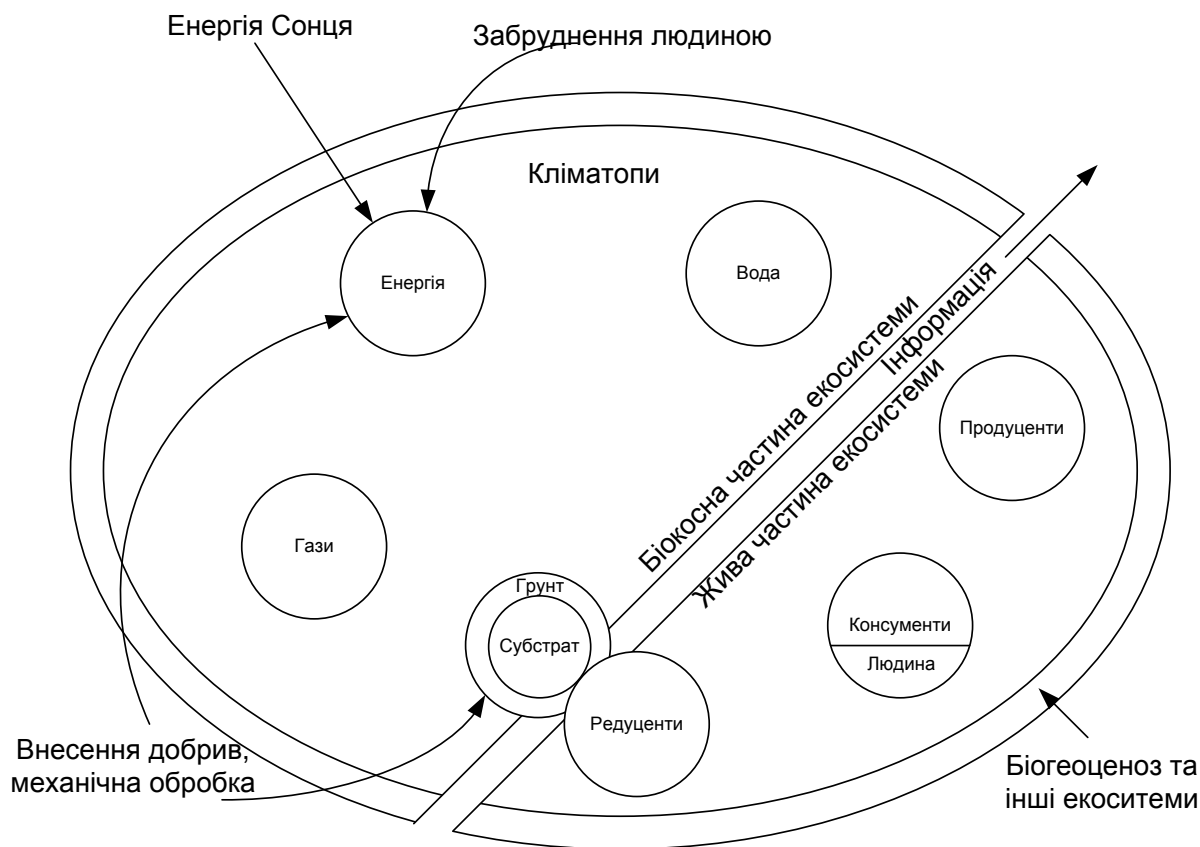


Рисунок 2.3 – Структура екосистеми за М. Ф. Реймерсом

Наприклад, у водоймах фітопланктон поїдається зоопланктоном, останній – дрібною рибою, що є здобиччю великих риб – хижаків, які, у свою чергу, споживаються людиною. Мова йде про певні угруповання рослин, тварин і мікроорганізмів, які взаємодіють один з одним і з навколишнім середовищем. Дуже великі наземні екосистеми називають біомами. Наприклад, ліси помірного поясу, пустелі, хвойні ліси, савани тощо. Кожний біом містить у собі цілий ряд менших за розмірами взаємозв'язаних одна з одною екосистем. Одна з них може бути великою – площею в декілька мільйонів квадратних кілометрів, інша – невеликою галявиною. Важливо те, що кожну екосистему можна визначити як більш-менш своєрідне угруповання рослин і тварин, які взаємодіють одне з одним і з довкіллям.

Щоб в'ясувати цілісність біосфери, необхідно з'ясувати, як вона функціонує. Оскільки біосфера складається з безлічі екосистем, необхідно знати їх структуру. В кожній екосистемі є два основні компоненти: організми, з одного боку, і фактори неживої природи – з іншого. Таку сукупність організмів (рослин, тварин, мікроорганізмів) називають біотою (від лат. *bio* – життя) екосистеми. Шляхи взаємодії різних категорій організмів – це її біотична структура; неживі (хімічні й фізичні) фактори навколишнього середовища

називають абіотичними.

Незважаючи на велику різноманітність екосистем – від пустель до тундри, всім їм, на думку екологів, властива приблизно однакова біотична структура. Іншими словами, всі вони містять одні й ті самі категорії організмів, які подібно взаємодіють у всіх екосистемах. Це такі категорії: продуценти, консументи, редуценти, які виконують розглянуті вище функції живої речовини.

Одна з причин, що викликає різноманітність екосистем (біоценозів) у природі, – це своєрідність абіотичних умов кожного регіону (зміна кліматичних факторів за поясами, а також неоднорідність рельєфу).

Таким чином, незважаючи на різноманітність екосистем, всі вони мають спільні риси.

Щодо *трофічної структури* екосистему можна розділити на два яруси (за Ю. Одумом):

1) верхній *автотрофний ярус*, або «зелений пояс», який утворюють рослини або їх частини, що містять хлорофіл, де переважають фіксація енергії світла в енергію хімічного зв'язку органічних молекул, використання простих неорганічних сполук і накопичення складних органічних сполук;

2) нижній *гетеротрофний ярус*, або «коричневий пояс» ґрунтів і опадів, речовин, що розкладаються, коріння і т. д., у якому переважають використання, трансформація і розкладання складних сполук.

З біологічної точки зору у складі екосистеми зручно виділяти такі компоненти:

1) *неорганічні речовини* (C, N, CO₂, H₂O і ін.), що включаються в кругообороти;

2) *органічні сполуки* (білки, вуглеводи, ліпіди, гумусові речовини і т. д.), що зв'язують біотичну та абіотичну частини;

3) повітряне, водне і субстратне середовище, що містить кліматичний режим та інші фізичні чинники;

4) *продуценти*, автотрофні організми, переважно зелені рослини, які можуть синтезувати їжу з простих неорганічних речовин;

5) *макроконсументи*, або *фаготрофи* – гетеротрофні організми, переважно тварини, що живляться іншими організмами або рештками органічної речовини;

6) *мікроконсументи*, *сапротрофи*, *деструктори*, або *осмотрофи* – гетеротрофні організми, здебільшого бактерії та гриби, які одержують енергію або шляхом розкладання мертвих тканин, або шляхом поглинання розчиненої органічної речовини, що виділяється мимоволі, або вилученої сапротрофами з рослин та інших організмів.

Для функціонування екосистеми і підтримання її структури необхідна взаємодія трьох основних компонентів, а саме співтовариства, потоку енергії і кругообороту речовин.

За масштабами екосистеми поділяються на мікроекосистеми, мезоекосистеми і глобальні екосистеми.

У **мікроекосистемах** невеличкі, тимчасові біоценози, що називаються

синузіями, перебувають в обмеженому просторі. До таких екосистем належать трухляві пеньки, мертві стовбури дерев, мурашники тощо. Синузія – просторово й екологічно обумовлена частина фітоценозу, що відображає внутрішньоценотичну асоційованість, або «субфітоценоз». Досить вдалим є визначення В. М. Сукачова та А. Л. Шеннікова: «синузії – структурні частини фітоценозу, обмежені в просторі або часі (займають певну екологічну нішу), які відрізняються одна від іншої у морфологічному, флористичному, екологічному і фітоценотичному відношенні». Термін «синузія» запровадив у 1917 р. Е. Рюбель, проте почав активно пропагуватися Х. Гамсом з 1918 р., який виділяв три порядки синузій.

Найбільш поширеними серед екосистем є **мезоекосистеми**, або біогеоценози, в яких біоценози займають однотипні ділянки земної поверхні з однаковими фізико-географічними умовами і межі яких, як правило, збігаються з межами відповідних фітоценозів.

Макроекосистеми охоплюють величезні території чи акваторії, що визначаються характерним для них макрокліматом і відповідають цілим природним зонам. Біоценози таких екосистем називаються **біомами**. До макроекосистем належать екосистеми тундри, тайги, степу, пустелі, саван, листяних і мішаних лісів помірного поясу, субтропічного і тропічного лісів, а також морські екосистеми. Прикладом глобальної екосистеми є біосфера нашої планети.

За ступенем трансформації людською діяльністю екосистеми поділяються на **природні, антропогенні та антропогенно-природні**.

Лісові насадження, луки, ниви – все це антропогенно-природні екосистеми, які хоча й складаються майже виключно з природних компонентів, однак створені та регулюються людьми.

До антропогенних екосистем належать екосистеми, в яких переважають штучно створені антропогенні об'єкти і в яких, крім людей, можуть існувати лише окремі види організмів, що пристосувалися до цих специфічних умов. Прикладом таких антропогенних екосистем є міста, промислові вузли, села (в межах забудови), кораблі тощо.

У зв'язку з трансформацією значної частини природних екосистем в антропогенно-природні та антропогенні предметна сфера екології в наш час значно розширилася. До найбільш актуальних завдань сучасної екології за Г. О. Бачинським належать:

- розроблення докладної типологічної і таксономічної класифікації екосистем;
- вивчення функціональної структури та метаболізму екосистем усіх типів і таксономічних рівнів від макроекосистеми до біосфери;
- визначення головних факторів, що забезпечують динамічну рівновагу різнотипних екосистем;
- установлення основних закономірностей взаємодії суміжних та більш віддалених екосистем між собою;
- дослідження характеру реакції різноманітних екосистем на різні види

антропогенних навантажень і вивчення закономірностей перетворення природних екосистем в антропогенно-природні та антропогенні.

У системах описаних трьох рівнів організації – організового, популяційного та екосистемного – відбуваються всі біохімічні, фізіологічні, біогеоценологічні, біофізичні, біогеохімічні та інші процеси, що характеризують саму суть життя, існування та еволюції біосфери. За межами біотичних систем цих рівнів життя не існує.

Характерною особливістю згаданих рівнів є й те, що вони мають не лише ієрархічне, а й мережеве підпорядкування. Останнє підтверджує правильність висновку В. І. Вернадського про те, що всі ці рівні є первісними і всі вони формувалися на планеті одночасно, тобто надорганізові системи організації такі древні, як саме життя. Воно також засвідчує, що будь-який організм може існувати в природі лише за умови його перебування у складі певної екосистеми займаючи в ній певну екологічну нішу, завойовану в боротьбі за існування, виконуючи визначену роботу в цілісній системі трансформації речовин та енергії й знаходячись у тісних функціональних зв'язках з іншими компонентами цієї системи.

Мережевий тип взаємовідносин відображає й те, що, з одного боку, в складі екосистем не обов'язково повинні знаходитися цілі популяції видів рослин чи тварин. У малих екосистемах, наприклад біогеоценозах, можуть бути представлені лише групи особин (родини, стада, ценопопуляції) чи поодинокі особини. З іншого боку, окремо взята особина – це також елементарна екосистема – консорція, з усіма її симбіотичними, паразитичними, мутуалістичними, топічними чи іншими консортами і своїм мікросередовищем.

Що ж стосується структурних ступенів екосистемного рівня організації живого, то це питання в науковій літературі ще слабо висвітлене. Немає класифікації екосистем, на підставі якої можна було б підійти до виділення згаданих ступенів. Без них неможливо розкрити складності будови біосфери, взаємозв'язків між її підсистемами і структурними компонентами.

На думку М. А. Голубця, доцільно вирізняти хоча б такі основні ступені організації екосистем:

1) *консорційні екосистеми* – найменші екологічні системи, центральним організатором яких є автотрофний або гетеротрофний організм, з яким функціонально трофічними, топічними, фабричними і форичними зв'язками поєднані інші живі істоти разом із освоєним ними абіотичним середовищем (наприклад, консорція смереки, черешні, дикої свині тощо);

2) *парцелярні екосистеми* (екосистеми розмірів біогеоценологічної парцели, за Дилісом, 1978), тобто структурної частини біогеоценозу, яка вирізняється за радіальним складом і будовою деревного, чагарникового, трав'яного і мохового ярусів, будовою ґрунтових горизонтів тощо) і специфікою радіально спрямованого матеріально-енергетичного метаболізму (синтезу, відмирання, опадку і розкладання органічної речовини, перерозподілу світла, тепла і вологи, накопичення органічної маси тощо);

3) *біогеоценози* – екосистеми в межах фітоценозів, крім того, їх різноманіття і просторове розташування досконало відображають плани

лісовпорядкування чи великомасштабні геоботанічні карти;

4) *ландшафтні екосистеми* – сукупність біогеоценозів на певній спорідненій території, між якими існують генетичні, історичні чи функціональні зв'язки, наприклад екосистеми невеликих річкових басейнів або частин басейнів великих рік, гірських хребтів або гірських схилів, фізико-географічних, геоботанічних чи агрогрунтових районів тощо;

5) *провінційні екосистеми* – територіальне поєднання ландшафтних екосистем, яке за своїми латеральними межами збігається з геоботанічними провінціями;

б) *біомні екосистеми* – територіальне поєднання провінційних екосистем, яке за своїми латеральними межами збігається з геоботанічними областями чи наближається до меж фізико-географічних зон;

7) *материкові та океанічні екосистеми*;

8) *загальнопланетна екосистема* – біосфера.

Зі ступенями організації екосистем пов'язана низка найрізноманітніших теоретичних питань, передусім їх генезису, структурно-функціональної організації, корисних для людини функцій, антропогенної динаміки, можливостей управління процесами тощо. Не менш важливими є прикладні проблеми, зокрема можливості експлуатації їх природних ресурсів і використання корисних функцій, збереження сприятливого для людини довкілля, оптимізація структури і функціональних ознак, збереження біорізноманітності, підвищення естетичної цінності, оздоровчого значення і захисної ролі, забезпечення стійкості, стабільності й сталого розвитку тощо.

І цей перелік, і попередньо наведені дані свідчать про те, що системи екосистемного рівня організації живого та пов'язані з ними теоретичні й практичні проблеми є всеосяжними, стосуються різних сфер життя людини, найсучасніших і найактуальніших аспектів її наукової і виробничої діяльності.

2.2 Ступені організації екосистем

2.2.1 Консорційні екосистеми

Консорція (від. лат. *consortio* – співучасть, спільність) – група видів різноманітної таксономічної належності, які більш-менш тісно пов'язані з певним організмом – ядром консорції (рис. 2.4). Розрізняють *індивідуальну консорцію*: ядро – одна особина (наприклад, дерево); *популяційну консорцію*: ядро – одна популяція чи вид у цілому; *синузійну консорцію*: ядро – види, що становлять одну екобіоморфу (наприклад, мезофільні темнохвойні дерева).

У ролі центрального члена консорції звичайно виступає *вид-едифікатор* – тобто вид, що відіграє основну роль в утворенні біосередовища в екосистемі та створенні структури біогеоценозу. Частіше едифікатори – це рослини, але ними можуть бути і тварини (наприклад, глибоководні тварини).

Консорції можуть бути повно- та неповночленними. Повночленними вони є за умови наявності в їх структурі груп споживачів та паразитів консортів, які мають прямий зв'язок з детермінантом. Так, перший концентр

містить види, що мешкають в окремих органах та на поверхні детермінанта і споживають його фітомасу і продукти виділення; другий, третій і наступні центри становлять зоофаги і паразити (див. рис. 2.4).

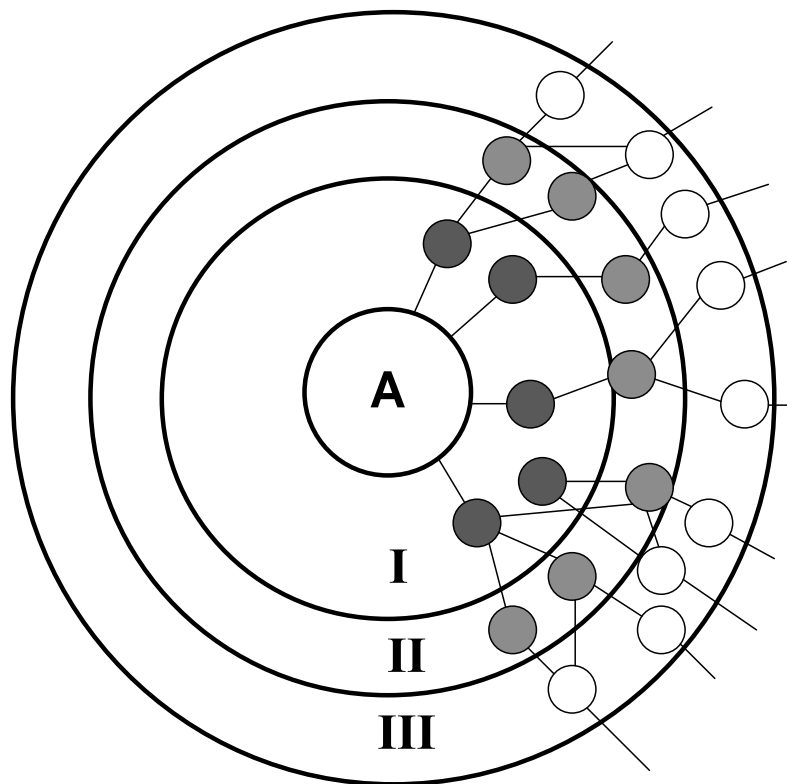


Рисунок 2.4 – Схема консорції за В. В. Мазингом:
А – детермінанти; I, II, III – найближчі центри; чорні кола – фітофаги та фітокомпоненти; сірі кола – зоофаги; білі кола – зоопаразити

Консорти експлуатують окремі особини детермінанта, їх щільність значною мірою визначається фізіологічним станом детермінанта. Супраконсорти експлуатують уже ценопопуляцію детермінанта і, певною мірою, менше залежать від його детермінуючого впливу. Таким чином, консортивна сукцесія повинна йти від переважання топічних зв'язків над трофічними (превалювання супраконсортів над консортами) в напрямку зростання трофічних відносин (зростання відносної частки власне консортів).

Як будь-які живі системи, консорційні екосистеми розвиваються в часі, змінюються під впливом різних екологічних чинників, їх структура залежить від віку, фізіологічного стану і стадій розвитку ядра консорції та її консортів. Тому повну інформацію про структурно-функціональну організацію автотрофної консорції багаторічного, скажімо, деревного виду можна зібрати лише на підставі тривалих досліджень щодо різних вікових станів ядра, періодів розвитку нових органів (наприклад, генеративних), в умовах різних екологічних збурень (наприклад, посух, повеней, перезволожений, спалаху хвороб і шкідників). У цьому разі доречним є вивчення мероконсорцій – консортивних угруповань окремих органів ядра консорції (квітів, плодів, листя, стебел, коренів тощо). Характерними видами взаємовідношень між організмами

в межах консорції є мутуалізм, протокооперація, коменсалізм, хижацтво, паразитизм, аменсалізм, конкуренція та нейтралізм. У межах однієї консорції всі вони можуть проявлятися одночасно.

Між детермінантом консорції та консортами існують різноманітні зв'язки, які, ґрунтуючись на результатах класифікації Т. А. Работнова, можна звести до такого (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Класифікація консортивних зв'язків рослин із їх консортами

Характер зв'язків	Інтерпретація
<i>Вплив детермінанта консорції на консортів</i>	
Фабричні	Дають консортам або опору (для ліан), або матеріал для влаштування гнізд
Трофічні	Постачає консортам енергію чи речовини, джерелом яких можуть бути живі органи детермінанта, його діаспора і пилок, прижиттєві виділення, відмерлі органи тощо
Форичні	Запилення квітів і поширення діаспор детермінанта консорції
Дефензивні	Забезпечує захист консортів від їх ворогів
Атрактивні й репелентні	Виділяє речовини, які приваблюють або відлякують консортів
Поліпшення умов проростання	Бере участь в утворенні загальних умов існування (мікроклімат, мікроґрунтові особливості тощо)
<i>Вплив консортів на детермінант консорції</i>	
Фабричні	Використання детермінанта як місця і матеріала для побудови та гнізд
Трофічні	Використання детермінанта як джерела енергії та елементів мінерального живлення. Поліпшення забезпечення детермінанта елементами мінерального живлення (фосфором – мікоризоутворювальні гриби, азотом – азотфіксувальні симбіонти); забезпечення елементами мінерального живлення і частково енергією комахоїдних рослин-детермінантів
Контактні	Травмування надземних і підземних органів (обгризання листя, обламування гілок, пошкодження кореневої системи тощо); інколи де супроводжується вегетативним розмноженням детермінантів
Асоціативні	Забезпечення детермінанта елементами мінерального живлення внаслідок розкладання і мінералізації його відмерлих органів сапрофітними консортами
Форичні	Перенесення консортами пилку і діаспор

Продовження табл. 2.1

Характер зв'язків	Інтерпретація
Патогенні	Виділення консортами-ендобіонтами токсичних метаболітів у тканини детермінанта
Едифікуючі	Зміна середовища існування детермінанта внаслідок діяльності консортів-тварин
Дефензивні	Захист детермінанта (яблуня – мурахи – тля)
Ареалографічні	Вплив консортів-запилювачів на межі поширення детермінанта

Структура і функціональна організація консорційних екосистем вивчені дуже слабо, незважаючи на те, що від них значною мірою залежить успіх існування цілих популяцій та біогеоценозних екосистем. З іншого боку, різноманітність структури консорцій, ядрами яких є особини певної популяції рослини чи тварини, зумовлена різними спадковими особливостями, фізіологічним станом, віком, їх розташуванням у просторі парцелярної чи біогеоценозної екосистем, конкурентним впливом сусідніх консорцій. Усе це свідчить про потребу пізнання структурно-функціональної організації цих консорцій з урахуванням згаданих параметрів, оскільки вони є не лише ознакою біорізноманітності й фактором стабільності популяційної консорції, а й відіграють визначальну організаційну функцію в парцелярних і біогеоценозних екосистемах. Узагальнено можна вважати, що останні становлять функціональну єдність консорційних екосистем.

2.2.2 Парцелярні екосистеми

У середині фітоценозів виділяють елементарні угруповання – *парцели*, які можна розглядати як комплексні частини біогеоценозу, що відрізняються один від одного як радіальною (горизонтальною) побудовою елементів, так і специфікою радіально спрямованого матеріально-енергетичного обміну.

Парцелярні екосистеми можна характеризувати, з одного боку, як найменші однорідні ділянки біогеоценозної екосистеми, або біогеоценозотичного покриву певної території, з іншого – як сукупність споріднених за походженням, віком, структурою і функціональними зв'язками консорції. У цій сукупності виділяються панівні консорції одного–двох, рідше трьох–чотирьох едифікаторних видів і значна кількість другорядних (додаткових) видів угруповання. Наприклад, у квасеницево-смерековій парцелі вологого мезотрофного квасеницевого буково-смерекового лісу едифікаторна, структурна і функціональна роль належить консорціям смереки європейської, другорядна – консорціям видів трав'яно-чагарникового і мохового покриву, розвиненого на прогалинах між деревами смереки.

У зв'язку з тим, що біогеоценозотичні парцели охоплюють цілу глибину біогеоценозотичної товщини екосистеми (від верхівок рослин до кінчиків

найглибших коренів чи глибини поширення ґрунтових гетеротрофів), окрім консорцій, їх структурними блоками можна вважати біогеоценотичні яруси та біогеоценотичні горизонти (біогеогоризонти).

Під **ярусами** розуміємо шари надземних і підземних частин біогеоценозів, що вирізняються за висотою рослинних організмів, з яких складаються їх автотрофні блоки (рис. 2.5).

Як відзначав В. М. Сукачов (1964), кожен ярус – це не лише окрема морфологічна структура. Це – також окрема матеріально-енергетична система, що специфічно сприймає речовини та енергію й функціонує у відмінних від інших ярусів режимах освітлення, вологи, тепла, концентрації вуглекислого газу, мінерального живлення, аерації, руху повітря, діяльності фауни та мікроорганізмів. Кожен ярус також відіграє специфічну роль у функціонуванні цілої системи і має різне господарське значення.

Біогеоценотичними горизонтами називають вертикально виокремлені й у цьому напрямі далі неподільні структури, що характеризуються специфічними складом компонентів, трансформацією речовин та енергії і різними ролями у функціонуванні цілої екосистеми. Вони не перекривають один одного, їх сумарна товщина дорівнює висоті рослинного угруповання. Наприклад, на основі експедиційного вивчення угруповання вологої мезотрофної зеленчуково-волосистоосокової бучини, на її мертвопокровній парцелі, за М. А. Голубцем, існує чотири біогеогоризонти:

1) інтенсивної матеріально-енергетичної трансформації, що займає верхню частину лісостану товщиною 6,6 м;

2) послабленої матеріально-енергетичної трансформації – у затіненій частині кронного простору товщиною 4 м;

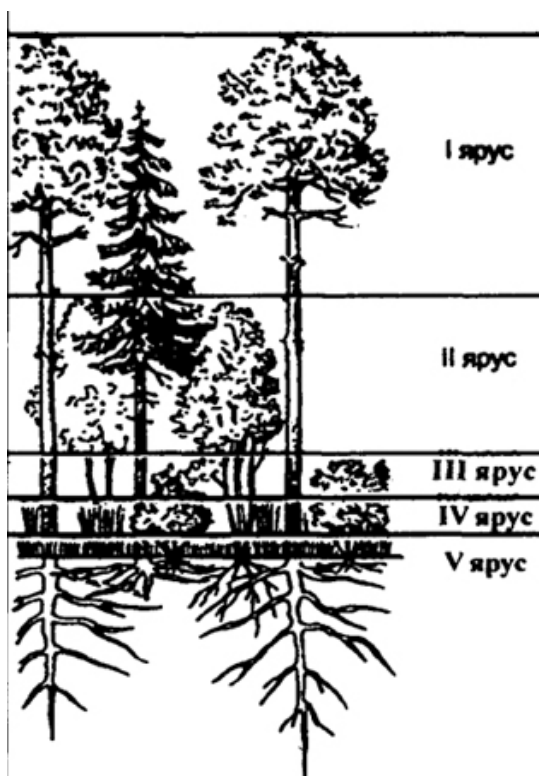
3) кронно-стовбурової акумуляції – у нижній частині кронного шару товщиною 5 м;

4) стовбурової акумуляції – у нижній, підкронній частині парцели, товщиною 20 м. Залежно від складності будови лісостану, наявності трав'яного і чагарникового ярусів можна виділяти й інші біогеогоризонти (на цьому зупинимося нижче).

Підземні частини рослин також розташовуються ярусно. Як правило, коріння у дерев проникає на більшу глибину, ніж у чагарників. Ближче до поверхні розміщене коріння дрібних трав'янистих рослин, а безпосередньо на ній – ризоїди мохів. У поверхневих шарах коріння значно більше, ніж у глибинних. Яруси визначають структуру і склад фітоценозу. При малій ярусності рослинне співтовариство називають простим, великій – складним. Рослини кожного ярусу та обумовлений ними мікроклімат створюють певне середовище для специфічних тварин, що приводить до виникнення угруповань рослин і тварин – популяцій, тісно зв'язаних між собою організмів.

Звідси яруси в біоценозі розрізняються не лише висотою, а й складом організмів, їх екологією і тією роллю, яку вони відіграють у житті всього співтовариства. В одному співтоваристві одні й ті самі види через вікові відмінності особин або часткове пригнічення можуть знаходитися в певний період у різних ярусах. Наприклад, сходи сосни, берези, поки вони маленькі,

розташовуються в нижніх ярусах лісу. В міру росту за сприятливих умов вони займуть своє місце у верхньому ярусі.



I – великі дерева (береза, ялина, сосна, дуб, осика);

II – малі дерева (горобина, черемха);

III – чагарники (ліщина, бересклет, шипшина);

IV – трави і чагарники (багно, лохина, верес, іван-чай, журавлина, кислиця і ін.);

V – мохи і лишайники

Рисунок 2.5 – Ярусність у лісі (за Д. І. Трайтаком та ін., 1987)

Ярусність виражена і в трав'янистих співтовариствах, але менш виразно і тут менше ярусів, ніж у лісах (рис. 2.6).

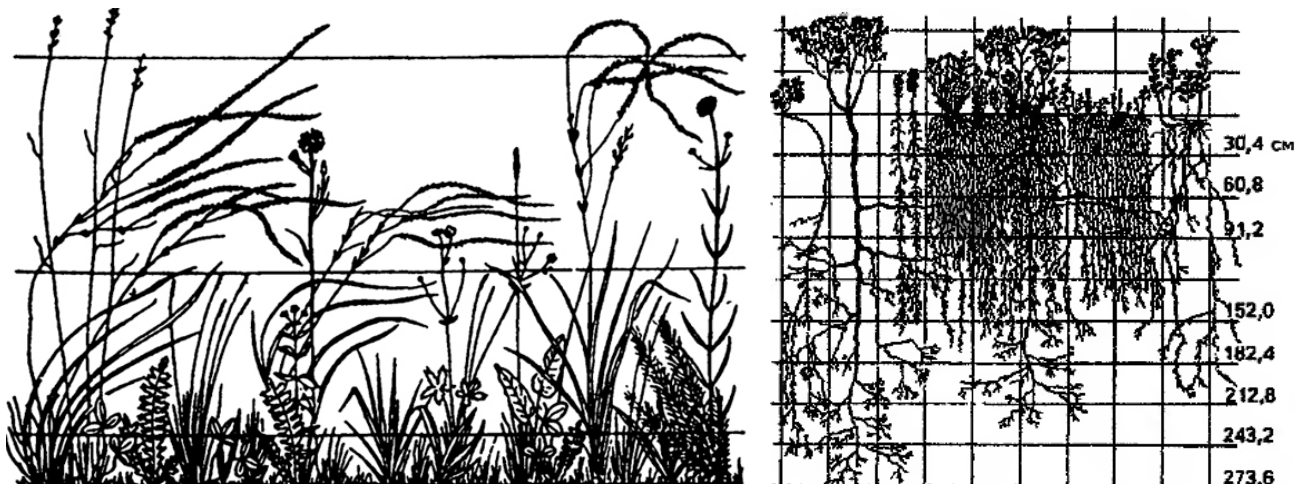


Рисунок 2.6 – Надземна і підземна ярусність у трав'яних фітоценозах

У рослинних співтовариствах тварини також входять переважно до певного ярусу. Серед комах, наприклад, виділяють такі групи: мешканці ґрунту – *геобій*, наземного поверхневого шару – *герпетобій*, мохового ярусу – *бріобій*, травостою – *філобій*, вищих ярусів – *аеробій*. Серед птахів є види, що гніздяться лише на землі (курачі, тетеруки, повзики, вівсянки і т. д.), інші – в

чагарниковому ярусі (співочі дрозди, снігурі, славки) або в кронах дерев (зяблики, корольки, щиглі, великі хижаки ті ін.). Проте необхідно зазначити, що деякі тварини можуть переміщатися з одного ярусу в інший. Так, сіра білка харчується на землі, а спить і виводить потомство на деревах. Птахи можуть відпочивати на одному ярусі, а харчуватися на інших. Сіра сова звичайна полює на ссавців у трав'янистому і приземному ярусах, а гніздиться в деревній зоні.

Види рослин і тварин у більшості випадків значно різняться за своїм відношенням до умов середовища. Рослини кожного пролеглого нижче ярусу більш тіньовитривалі, ніж розташовані над ними. Це зумовлено тим, що освітлення при переході від верхніх ярусів до нижніх слабшає і для світлових рослин стає недостатнім. Види різних ярусів у біоценозі знаходяться в тісному взаємовідношенні й взаємозалежності. Розростання верхніх ярусів співтовариства зменшує густину нижніх, часто до повного зникнення рослин, що входять до їх складу.

Разом з тим розрідження верхнього ярусу сприяє посиленню розвитку рослин нижніх ярусів унаслідок поліпшення світлового режиму, вологи, тепла, а також підвищення вмісту мінеральних речовин у ґрунті. Розростання нижніх ярусів позитивно впливає на тварин і в кількісному, і в якісному відношенні. Це особливо виражено в лісових біоценозах, де при розрідженні деревостою густо розростаються чагарники або світлолюбна трав'яниста рослинність. При повному ж злитті деревостою, наприклад у молодняках, може спостерігатися пригнічення навіть тіньовитривалих трав і мохів. Потрібно відмітити, що не завжди верхній ярус домінує над нижнім. Так, на верховому болоті пануюча роль належить сфагновому покриву.

У біоценозі вертикальний розподіл організмів обумовлює і певну структуру в горизонтальному напрямі. Розчленована в горизонтальному напрямі одержала назву *мозаїчності* і властива практично всім фітоценозам (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Мозаїчна будова липо-ялинового лісу: 1 – ялиново-волосисто-осинова ділянка; 2 – ялиново-моховита ділянка; 3 – густі групи ялинового підростання; 4 – ялиново-липовий; 5 – підростання ялини під осиною; 6 – осиново-яглицева ділянка; 7 – великопапоротевий у вікні; 8 – ялиново-щитниковий; 9 – хвощевий у вікні (за Н. В. Дилісом, 1971)

У їх межах виділяють такі структурні одиниці: мікрогруповання, мікроценози, мікрофітоценози, парцели і т. ін. Ці мікрогруповання різняться видовим складом, кількісним співвідношенням різних видів, зімкненою, продуктивністю та іншими властивостями.

Обумовлена мозаїчність такими причинами, як неоднорідність мікрорельєфу ґрунтів, середовищеутворювальний вплив рослин і їх біологічні особливості. Мозаїчність може виникнути як наслідок діяльності людини (вибіркова рубка, багаття та ін.) або тварин (викиди ґрунту і їх подальше заростання, утворення мурашників, толочення і збурювання травостою копитними тощо), вивалювання деревостою під час шквалів і т. ін.

Під впливом життєдіяльності окремих видів рослин зміни середовища створюють *фітогенну мозаїчність*. Наприклад, вона добре виражена у змішаних хвойно-широколистяних лісах. Порівняно з листяними породами ялина сильніше притіняє поверхню ґрунту, затримує кронами більше дощової вологи та сніг. Опадання ялини розкладається повільніше, сприяє підзоленню ґрунту. Нагадаємо, що в геоботаніці структурна частина фітоценозу одержала назву *синузії* (рис. 2.8).

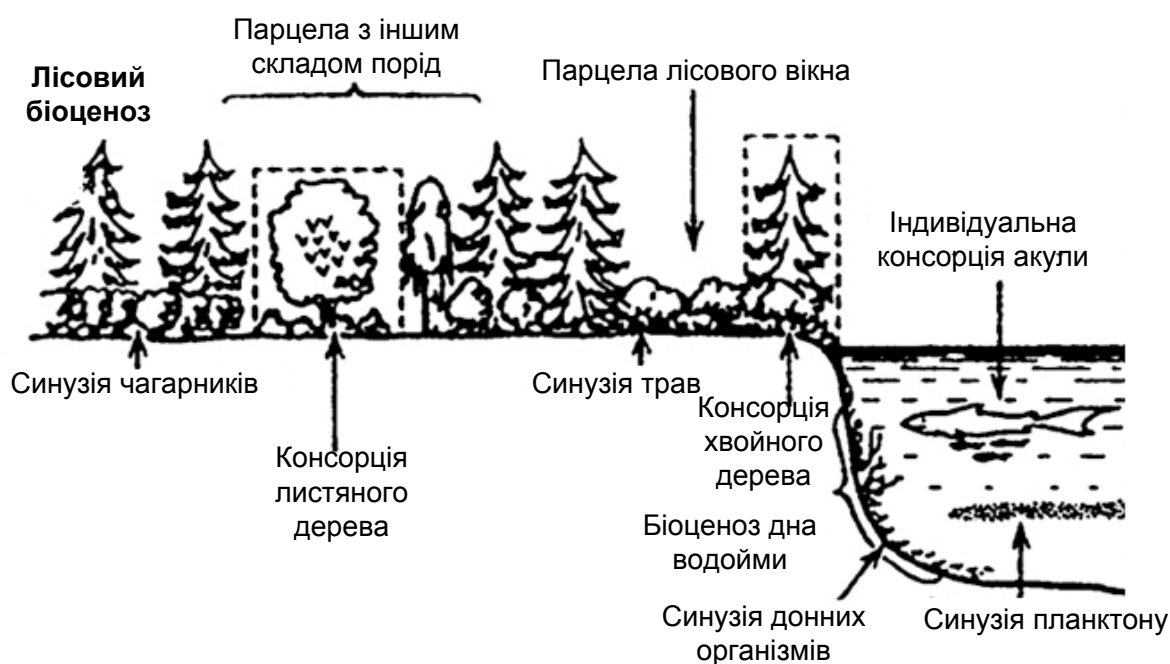


Рисунок 2.8 – Консорція, синузія і парцела (за М. Ф. Реймерсом, 1990)

2.2.3 Біогеоценозні екосистеми

Біогеоценоз (за В. Сукачовим) – це ділянка земної поверхні, де на певній відстані біоценоз і відповідна йому частина атмосфери, літосфери і гідросфери залишаються однорідними і мають однорідний характер взаємодії між ними і тому в сукупності утворюють єдиний, історично сформований, внутрішньо взаємозумовлений комплекс.

За В. Сукачовим, у біоценозі при взаємодії компонентів живої природи утворюються певні біоценозні блоки (див. рис. 2.9.). Біоценоз складається із

трьох елементів: фітоценозу, зооценозу та мікробоценозу. Абіотичне середовище, з яким взаємодіє біоценоз або його окремі елементи, В. Сукачов поділив на два блоки: едафотоп – ґрунтові умови, та кліматоп – метеорологічні умови.

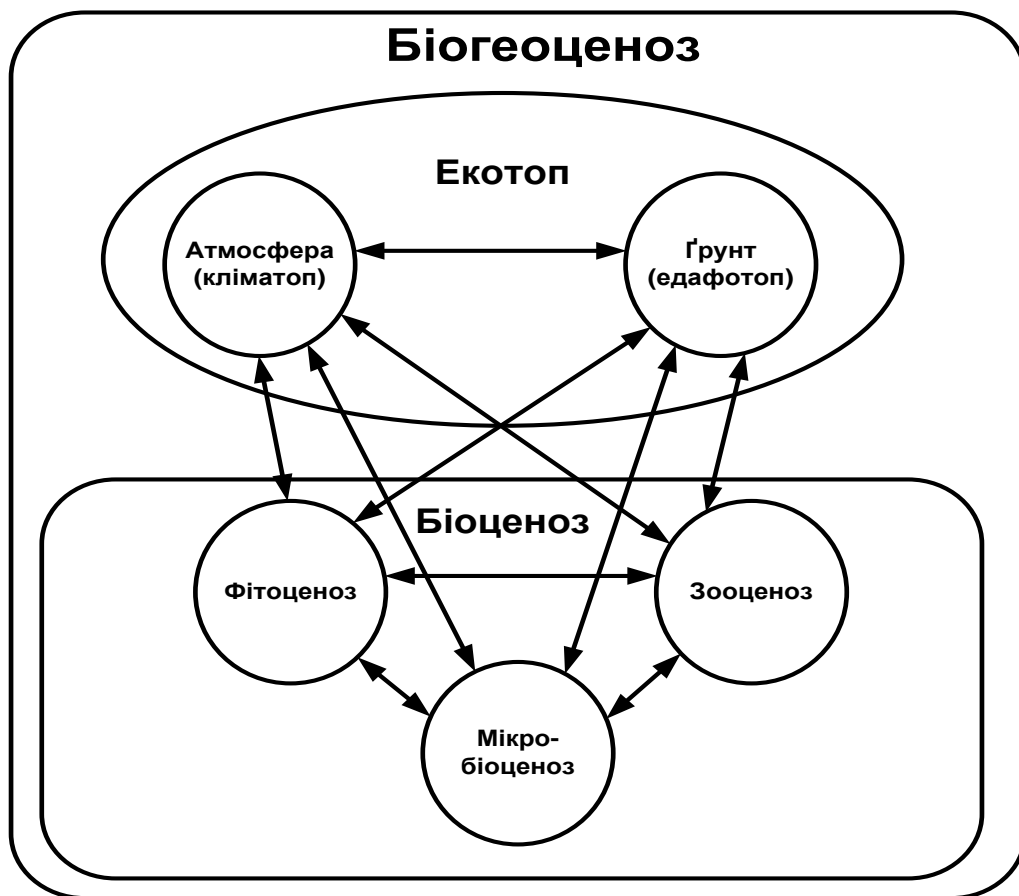


Рисунок 2.9 – Структура біогеоценозу за В. М. Сукачовим

Як бачимо із рис. 2.9, усі компоненти біогеоценозу є взаємозв'язаними. Отже, біогеоценоз як система взаємовідношень складових його компонентів, характеризується певним типом обміну речовиною й енергією між його компонентами та іншими компонентами природи і становить внутрішню діалектичну єдність компонентів, що знаходяться в постійному русі.

Порівнюючи терміни біогеоценоз та екосистема, можна виявити як ряд спільних рис, так і ряд розбіжностей. Хоча Ю. Одум вважає ці терміни синонімами, між ними є низка принципових відмінностей.

Лавренко Е. М. і Диліс М. В. (1968) запропонували таке визначення: «Біогеоценоз – це екосистема в межах фітоценозу», тобто ці категорії збігаються лише на рівні рослинних угруповань і принципово розходяться як вище, так і нижче цього рівня. Дійсно, після встановлення меж біогеоценозу цей природний комплекс можна назвати екосистемою. Будь-який біогеоценоз є екосистемою, але не кожна екосистема є біогеоценозом.

Розбіжності між категоріями «біогеоценоз» і «екосистема» на перший погляд мало помітні, але є істотними:

- біогеоценоз має чітко визначені географічні розміри, адже однорідність

середовища є обмеженою, а екосистеми – ні;

- біогеоценоз – це історично сформований взаємозумовлений комплекс, тоді як тривалість існування екосистем наперед не визначена;

- компоненти біогеоценозу є більш взаємозалежні один від одного, ніж компоненти екосистем;

- екосистеми можуть бути замкненими, тобто в межах їх може проходити лише кругообіг речовин без обміну енергією, а біогеоценоз – це завжди відкрита система, що обмінюється з довкіллям і речовиною, і енергією.

Цю категорію екосистем є підстави трактувати як функціональне поєднання консорцій та біогеоценотичних парцел, просторове розташування яких визначає вертикальну диференціацію біогеоценотичної товщі та біогеогоризонти. Іншими словами, на основі дотеперішньої екологічної (передовсім біогеоценологічної) літератури в межах біогеоценозу вирізняються три основні структурні компоненти – консорції, біогеопарцели та біогеогоризонти. Аналіз перших двох зроблено вище, тут зосередимо увагу на характеристиці структурно-функціональних особливостей біогеогоризонтів. Тому кожний біогеогоризонт виконує в екосистемі специфічну функцію, для його аналізу необхідно застосувати не лише морфологічні показники, а й функціональні.

Науку про біогеоценози називають біогеоценологією. Вона вивчає біоценотичні процеси, що відбуваються в кожному конкретному біогеоценозі (екосистемі), зокрема продуктивність, обмін речовиною та енергією. В. М. Сукачов висунув тезу: обмін речовиною та енергією є такою самою характерною властивістю біогеоценозу, як і склад рослин і тварин; специфіка взаємозв'язків і взаємодії між ними має принципове значення, оскільки саме участь усіх взаємодіючих організмів у речовинно-енергетичному обміні функціонально об'єднує їх в єдину систему, що містить їх та абіотичне середовище. Однак структура біогеоценозу, тобто склад утворюючих його видів, властивості кожного середовища та особливості взаємодії між ними визначають специфіку речовинно-енергетичного обміну. Біоценологію (синекологію) від біогеоценології відрізняє передусім те, що остання містить як складову частину досліджуваної системи абіотичний комплекс, біоценологія ж вивчає лише сукупність організмів. Важливою характеристикою екосистем є розмаїття видового складу.

Учені виявили деякі закономірності в існуванні екосистем різного рівня. Чим різноманітніші умови біотопів у межах екосистеми, тим більше видів містить відповідний біоценоз. Яскравим прикладом є тропічні ліси, які населяє більшість існуючих видів тварин і рослинності. Чим більше видів містить екосистема, тим менше особин нараховують відповідні видові популяції. Так, у системах із малою видовою розмаїтістю (пустелі, степи, тундри) деякі популяції досягають великої чисельності, а в тропічних лісах популяції зазвичай нечисленні. Чим більша розмаїтість біоценозу, тим більша екологічна стійкість екосистеми. Так, екосистема моря стійкіша за екосистему озера, тому що її населяють різноманітні види тварин, а рослинний світ її надзвичайно багатий. Експлуатовані людиною системи, що представлені одним видом або

дуже малою їх кількістю (агроценози з землеробськими монокультурами), нестійкі за своєю природою і не можуть самопідтримуватися. Тому людям потрібно бути особливо дбайливими щодо таких екосистем. Жодна частина екосистеми не може існувати без іншої. Якщо з якоїсь причини сталося порушення структури екосистеми, зникає група організмів, вид, то все угруповання може сильно змінитися або навіть зруйнуватися.

За наявністю структурних компонентів вирізняють *повночленні* та *неповночленні* біогеоценозні екосистеми. У перших з них наявні всі природні компоненти, внаслідок чого реалізується повноцінний цикл біогеохімічного обміну, синтезу та ресинтезу органічної речовини. В інших – відсутній якийсь із компонентів, наприклад рослинний покрив на ділянках пташиних базарів чи в печерних екосистемах. Гетеротрофні блоки таких систем існують за рахунок споживання речовинно-енергетичних ресурсів сусідніх водних чи наземних екосистем.

Доцільно також розрізнити біогеоценози за стійкістю до впливу зовнішніх чинників – *стійкі* та *нестійкі* (лабільні), а також за тривалістю зберігання певного постійного стану – *стабільні* й *нестабільні* біогеоценози. Стейкими потрібно вважати такі біогеоценози, що слабо реагують на певні види природного або антропогенного збурення (наприклад, низову пожежу, випасання худоби, затоплення під час повені, сильний вітер, суховій, сильний мороз, посуху, грибкові захворювання тощо) і швидко відновлюють свої структурно-функціональні параметри після такого впливу. До *лабільних* належать біогеоценози, що під впливом певного виду зовнішнього збурення втрачають здатність нормального функціонування, позбуваються якогось структурного блоку, втрачають здатність до відновлення попередньої структурно-функціональної організації. Наприклад, нестійкими є штучні смеречники на місці чистих і мішаних букових лісів до шквалів, шкідників і хвороб, соснові культури на місці дубових лісів Прикарпаття – до сніголаму, більшість агробіогеоценозів – до затоплення, болотних типів біогеоценозів – до осушення тощо.

2.2.4 Ландшафтні екосистеми

Під ландшафтною екосистемою розуміємо сукупність на однорідній за геологічними, геоморфологічними, ґрунтово-гідрологічними, кліматичними показниками ділянці земної поверхні біогеоценозних екосистем, поєднаних між собою генетичними (за походженням), історичними (історія розвитку та освоєння), геохімічними (геохімічне сполучення, стік води, перенесення органічних і мінеральних речовин) та біотичними (міграція тварин, перенесення діаспор і живого рослинного матеріалу) зв'язками й охоплені певним типом господарського використання. У територіальній структурі ландшафтних екосистем можуть бути, наприклад на Поділлі, корінні грабово-дубові ліси, похідні на їх місці грабняки і ліщинники, чисті дубняки, післялісові луки, рільні землі, шляхи сполучення, населені пункти, сільськогосподарські та промислові підприємства, річки та озера. Найменшою ландшафтною

екосистемою потрібно вважати таку територіальну одиницю, в складі якої виділяється не менше двох споріднених між собою біогеоценозів, найбільшою – природний територіальний комплекс, який за розмірами не перевищує фізико-географічного округу, або **макрогеохори** за визначенням В. Б. Сочави.

З огляду на те, що для означення цієї категорії екосистем використано епітет «ландшафтна», повинні зазначити, що ми не хотіли б внести додаткову плутанину в інтерпретацію поняття «ландшафт». Завданням слова «ландшафтна» є, з одного боку, зосередити увагу на загальній територіальній комплексності та краєвидності цієї одиниці, з іншого – підкреслити, що до цієї категорії екосистем можна зарахувати природно-територіальні комплекси, які за розмірами відповідають географічному ландшафтові. За П. Г. Шищенком, географічний ландшафт – це природний чи антропогенний (змінений під впливом діяльності людини) територіальний або акваторіальний комплекс, що є генетично однорідною ділянкою (сегментом) ландшафтної сфери з єдиним геологічним фундаментом, однотипним рельєфом, поєднанням ґрунтів та біогеоценозів і характерною для неї морфологічною структурою. Останню визначають за особливостями взаємодії та взаємозв'язків між речовинними компонентами ландшафту і факторами його утворення, просторового поєднання його морфологічних одиниць (ландшафтних місцевостей, урочищ, фацій), їх динамікою та розвитком у часі. Під природно-територіальним комплексом у географії розуміють відносно однорідну частину географічної оболонки, що характеризується спільними рисами морфології, структури, функціонування та інтенсивності сучасних природних процесів. Найменшим природно-територіальним комплексом вважають фацію, найбільшими – географічні ландшафти, їх види, типи та класи (Маринич, 1993). За просторовими межами до категорії «ландшафтна екосистема» належить будь-який природно-територіальний комплекс (рангу фізико-географічних фацій, урочищ, місцевостей, ландшафтів), потрактований з екосистемологічних позицій, тобто як функціональна, самоорганізована, саморегульована, енергетична система, носієм організованості якої є жива речовина, за В. І. Вернадським.

Залежно від наукових завдань чи практичних потреб ландшафтними екосистемами можна називати територіальні об'єднання споріднених біогеоценозів, наприклад схилових, плакорних, заплавних, басейнових (басейн озера, річки чи їх частин), окремих гір, гірських хребтів, гірських улоговин, горбів, горбистих пасем чи їх частин тощо). Зовнішні межі ландшафтних екосистем визначаються за зовнішніми межами зовнішніх у природно-територіальному комплексі біогеоценозних екосистем.

Важливою ознакою ландшафтних екосистем є внутрішні міжбіогеоценозні (міжекосистемні) зв'язки і міжбіогеоценозний (міжекосистемний) речовинний, енергетичний та інформаційний обмін. У зв'язку з цим вертикальні (верхня і нижня) межі ландшафтних екосистем завжди перевищують вертикальні межі біогеоценозів і можуть знаходитися на висоті десятків – сотень метрів над поверхнею землі й кількох – кільканадцяти метрів під цією поверхнею. Для орієнтації зазначимо, що згідно з

В. Б. Сочавою, максимальна висота верхньої межі найбільшої геохори топологічної розмірності – природного округу, який відповідає за своєю суттю географічному ландшафтові, сягає 2000 м від поверхні Землі.

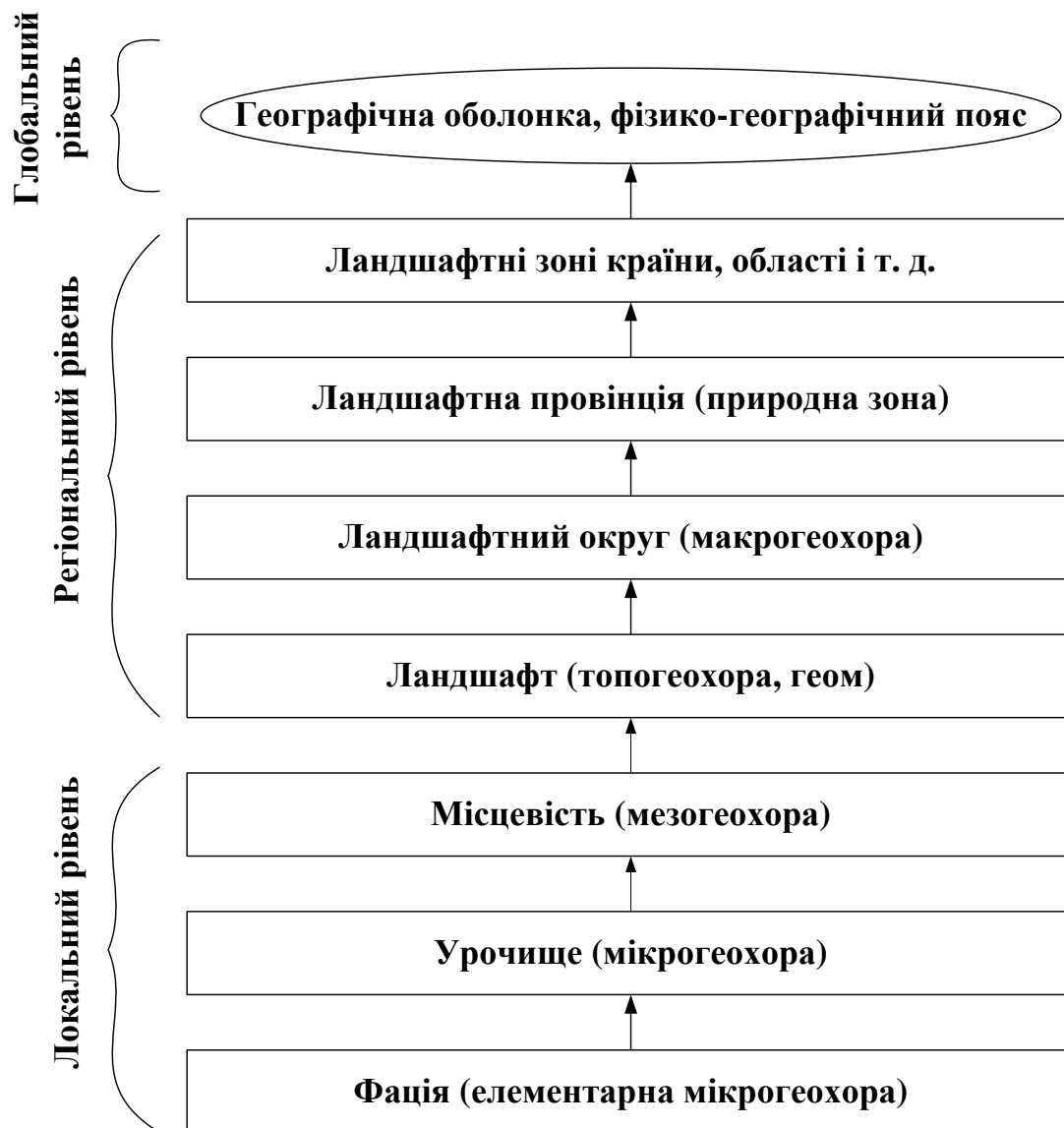


Рисунок 2.10 – Схема ієрархії геосистем

Для зіставлення розмірностей ландшафтних екосистем з одиницями фізико-географічного поділу території і для порівняльного аналізу структурно-функціональної суті згаданих одиниць доцільно звернути увагу на дворядну класифікацію геосистем В. Б. Сочави. Основною одиницею класифікації геосистем цей автор розглядає «гомогенний ареал геосистеми, тобто геомер, або біогеоценоз». Однорідні елементарні геомери об'єднуються у фації, а ці також за ознакою однорідності, але в порядку узагальнення, – в таксономічні одиниці вищого рангу – групи та класи фацій, та ще вищі таксономічні одиниці (рис. 2.10). Натомість найменше за кількістю територіальне поєднання різномірних елементарних геомерів, у якому забезпечуються умови функціонування і збереження специфіки кожного з них на загальному фізико-географічному

фоні, є елементарною геохорою, або елементарним гетерогенним ареалом. Кожна елементарна геохора, у свою чергу, є частиною геохори вищого рангу – мікрогеохори. Останні, за ознакою територіальної сумісності та спільності природних умов, об'єднуються в мезо-, топо- й макрогеохори, а ті – в провінції і ще більші територіальні підрозділи.

Таким чином, територіальні межі всіх згаданих геохор, починаючи від елементарної до макрогеохори, можна використати також для розмежування різнорангових ландшафтних екосистем. Або, іншими словами, екосистемологічний аналіз цих геохор дає підстави для потрактування їх як відповідні ландшафтні екосистеми.

Поняття «макрогеохора» В. Б. Сочава ототожнює з поняттям «ландшафт». Він відзначає, що «макрогеохора, природний округ і ландшафт (як регіональна таксономічна одиниця) просторово збігаються, і всі три назви означають одну й ту саму територію, але не завжди є синонімами в повному розумінні цього слова».

Провідними ознаками ландшафтних екосистем є територіальне й функціональне поєднання біогеоценозних систем і міжбіогеоценозний (міжекосистемний) речовинно-енергетичний обмін. Тому основним їх структурним блоком, безумовно, є біогеоценоз. Важливішим чинником різноманітності ландшафтних екосистем є рельєф.

За своєю будовою великі ландшафтні екосистеми – дуже складні. В їх межах об'єднуються лісові й лучні, рівнинні й горбисті, сухопутні й водні, річкові та озерні, природні й антропогенні, аграрні й урбаністичні та інші екосистеми. Від співвідношення їх площ залежать загальні функціональні риси та корисні для людини функції. Функціональні особливості цих екосистем відіграють визначальну роль у підтриманні стабільного розвитку природно-територіальних комплексів, формуванні напрямів розвитку народного господарства, його інфраструктури.

Серед функціональних властивостей провідне значення мають енергетична (здатність використання сонячної радіації для накопичення первинної продукції), біопродукційна (спроможність накопичувати корисні види біотичної продукції), водотрансформаційна (спроможність ефективної трансформації атмосферних опадів, перетворення поверхневого стоку води у внутрішньогрунтовий, протидіяння проявам руйнівних стихійних явищ: поверхневої та лінійної ерозії, повеней, зсувів, резервування в біогеоценотичній товщі запасів води для забезпечення вегетації рослин тощо), оздоровча (здатність забезпечити рекреаційні й естетичні потреби людини), захисна (властивість зменшити шкідливий вплив на довкілля зовнішніх шкідливих чинників, зокрема вітру), очисна (спроможність зменшити шкідливий вплив на довкілля і здоров'я людини техногенних забруднень), організаційна (здатність до самопідтримання стійкості та стабільності екосистеми, збереження саморегуляції спонтанних процесів і самозбереження) тощо. В ландшафтних екосистемах, насичених урбаністичними, промисловими та аграрними комплексами, особливе функціональне значення має потужність речовинно-енергетичних потоків зі згаданих антропогенних систем до природних

(передусім рідких, твердих, газоподібних та інформаційних забруднень) і здатність останніх долати ці антропогенні забруднення.

Для характеристики територіального розмаїття ландшафтних екосистем, які за своїми розмірами можуть коливатися від десятків до сотень тисяч гектарів, ми вживатимемо такі назви, що відображатимуть їх просторову, структурну та екологічну специфіку (Карпатська і Кримська гірські ландшафтні екосистеми, басейнові екосистеми південно-західного макросхилу Українських Карпат, басейнова екосистема верхів'я Дністра, басейнова екосистема озера Світязь, ландшафтна екосистема Розточчя, ландшафтна екосистема високогір'я Говерли, ландшафтна екосистема північної частини Пустомитівського адміністративного району, ландшафтна екосистема Львова та його зеленої зони, лісу з похідними на його місці зрубами, луками, чагарниками, культурами смереки та рільними землями тощо). Можна вживати термін Ю. П. Бялловича «біогеосистема» (наприклад біогеосистема вологої мезотрофної ялицевої діброви у комплексі з прилеглими до неї у нижній частині схилу зрубами та луками).

2.2.5 Провінційні екосистеми

Провінційну екосистему можна характеризувати як сукупність ландшафтних екосистем у межах фізико-географічної провінції, або як екологічну систему, що за просторовими межами збігається з межами згаданої провінції. За аналогією з визначенням фізико-географічної провінції, її можливо описати як частину біомної екосистеми (яка просторово збігається з фізико-географічною зоною) в межах певної рівнинної або гірської країни. Її виділяють за ознаками геолого-геоморфологічної будови території, співвідношення низовин і височин, гірських хребтів та улоговин між ними, віддаленості від океанів і ступеня континентальності клімату, й також за видовим складом, будовою та співвідношенням площ плакорних екосистем, особливостями неплакорних угруповань, наявністю ендемічних видів і раритетних екосистем. На доцільність вирізнення провінційних екосистем звертають увагу американські екологи (Smith, 1990).

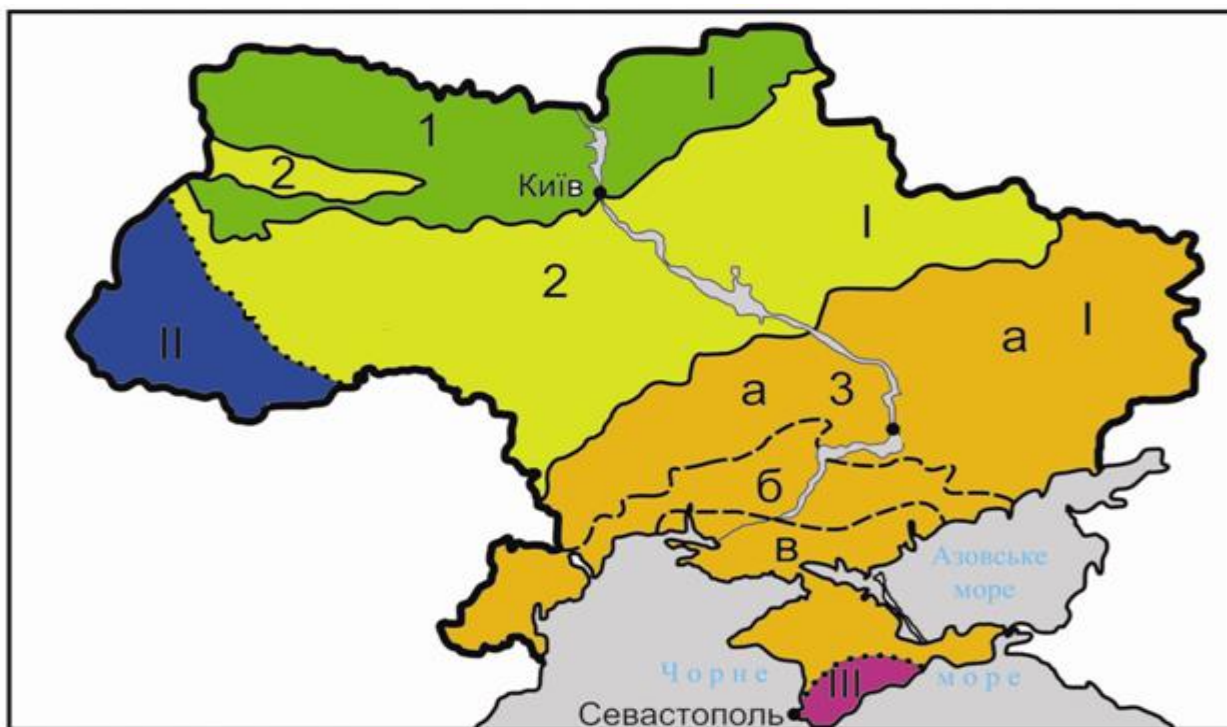
Характерними для провінційної екосистеми є особливості трансформації сонячної енергії, повітряних мас та атмосферних опадів, зумовленої рельєфом території, просторовою структурою біогеоценотичного покриву і глибиною його антропогенних перетворень, а також речовинно-енергетичного обміну в екосистемах і між ними, що визначає структуру ґрунтового покриву, величину запасів вільної енергії, темпи геохімічного та біотичного кругообігів і біотичну продуктивність екосистем.

Вертикальні межі провінційних екосистем певно можна розсунути до 2–3 км, відмежовуючи ними простір, в якому відбувається латеральний і радіальний рух біотичних (пилки, діаспори, комахи, птахи) та абіотичних (повітряні маси, волога, пил) її компонентів і мас.

За взірцем фізико-географічного районування (Маринич, Шищенко, 1993) у межах України можна виділити 12 провінційних екосистем (Поліська,

Західно-Українська лісостепова, Дністровсько-Дніпровська лісостепова, Лівобережно-Дніпровська лісостепова, Середньоросійська лісостепова, Дністровсько-Дніпровська північностепова, Донецька північностепова, Задонецько-Донська північностепова, Причорноморська середньостепова, Причорноморсько-Приазовська сухостепова і Кримська степова) та дві гірські країни – Кримські гори й Українські Карпати (рис. 2.11). Вони за межами значною мірою збігаються з геоботанічними підпровінціями.

Основними природними чинниками, що зумовлюють специфіку і просторову структуру цих екосистем, є клімат і рельєф, а головними структурними компонентами – ландшафтні екосистеми, а також окремі, неповторні в інших провінціях, унікальні раритетні біогеоценозні екосистеми. Загальними біоморфологічними ознаками провінційної екосистеми є співвідношення площ різних високого рангу синтаксонів – рослинних формацій і типів рослинності (лісових, чагарникових, лучних, степових тощо), наземних і водно-болотних екосистем, насичених відповідним складом консументів і редуцентів та ендемічних видів.



Межі фізико-географічних: ••••-країн, ~-зон, - - - - -підзон

Рисунок 2.11 – Фізико-географічне районування України: I – Східно-Європейська рівнинна ландшафтна країна: 1 – зона мішаних лісів, 2 – зона лісостепу, 3 – зона степу: а – Північностепова підзона, б – Середньостепова підзона, в – Південностепова підзона. II – Карпатська гірська ландшафтна країна; III – Кримська гірська ландшафтна країна

У літературі не знаходимо інформації про функціональні особливості провінційних екосистем. Результати наших досліджень й узагальнення даних

геоботанічних, екологічних і фізико-географічних праць дають підстави для попередніх висновків про те, що провідними їх функціями мало б бути формування такої структури біогеоценотичного покриву, що найбільше відповідає геолого-геоморфологічній будові території та кліматичним умовам, і збереження видової та ландшафтної біорізноманітності, передусім ендемічних і раритетних таксонів і синтаксонів.

2.2.6 Біомні екосистеми

Біом – термін в екології, яким позначають велике регіональне угруповання рослинних та тваринних співтовариств, адаптованих до регіональних фізичних особливостей навколишнього середовища, клімату та ландшафту. Біом складається із угруповань у довготривалому стабільному стані, а також усіх асоційованих з ними перехідних, ушкоджених та деградованих флори, фауни та ґрунтів. Найчастіше може бути ідентифікований за типом флористичного клімактеричного співтовариства.

Важливою характеристикою біому є біорізноманіття, особливо різноманітність фауни та субдомінантних форм рослин, що є функцією від абіотичних факторів. Також важливим кількісним індикатором, що характеризує біом, є продукування біомаси домінантною рослинністю. Біорізноманітність має тенденцію до збільшення при збільшенні загальної біопродуктивності, вологості та температури.

Основними типами біомів є суходольні та водні.

Біоми, крім загальної функціональної класифікації, можуть мати також і місцеві назви. Наприклад, трав'янисті або чагарникові біоми помірного поясу мають назви: степ – в Азії та Східній Європі, савана або вельд – у Південній та Східній Африці, прерія – в Північній Америці, пампа – в Південній Америці, аутбек або скреб – в Австралії. В деяких випадках біом як такий (а не окремі види) є об'єктом охорони, особливо в рамках національних програм збереження біорізноманіття.

Згідно з класифікацією М. А. Голубця до регіональних належать біомні та субстратні системи.

Біомна екосистема – це сукупність провінційних систем, яка за територіальними межами відповідає фізико-географічній зоні, зумовлена інтенсивністю надходження сонячної радіації до земної поверхні та мікрокліматичними чинниками й характеризується певним клімаксом типом рослинності (деревна, чагарникова, трав'яна тощо).

Рівнинну частину України утворюють три біомні екосистеми: мішаних лісів, лісостепова і степова. Перша з них займає 113 км² (близько 20 % території України) і характеризується рівнинним рельєфом, помірно-континентальним кліматом, позитивним балансом вологи, долинами, легкими і заболоченими ґрунтами. Лісистість – близько 30 %. У цій екосистемі знаходиться 42 % лісів України.

Наземні біоми:

- тундра: арктична та альпійська;

- бореальні голчасті ліси;
- листопадний ліс помірної зони;
- теп помірної зони;
- тропічний грасленд і савана;
- чапараль – райони з дощовою зимою і сухим літом;
- пустеля – трав'яна і чагарникова;
- напіввічнозелений тропічний ліс: виражений вологий і сухий сезони;
- вічнозелений тропічний дощовий ліс.

Типи прісноводних екосистем:

- лентичні (стоячі води): озера, ставки тощо;
- лотичні (проточні води): ріки, потоки тощо;
- заболочені угіддя: болота і болотисті ліси.

Типи морських екосистем:

- відкритий океан (пелагічна);
- води континентального шельфу (прибережні води);
- райони апвелінгу (родючі райони з продуктивним рибицтвом),
- естуарії (прибережні бухти, проливи, гирла рік, солоні марші тощо).

Залежність розподілу згаданих біомів від середньорічних температур і суми опадів зображена на рис. 2.12. В. Б. Сочава (1978), К. М. Ситник (1987) цілком слушно трактують біом як синонім природної фізико-географічної зони, утвореної внаслідок складної взаємодії між кліматом, живими організмами та ґрунтом (тундровий біом, степовий біом тощо).

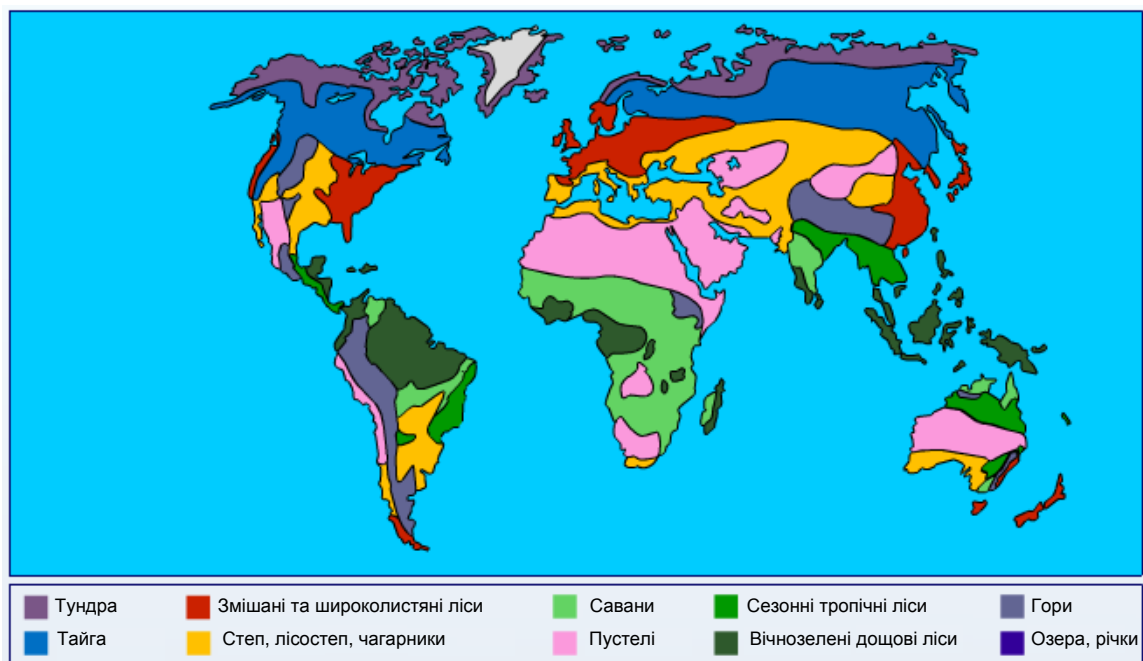


Рисунок 2.12 – Карта наземних біомів

У зв'язку з тим, що терміном «біом» переважно означають територіальну сукупність живих істот (рослинних і тваринних організмів) – біоту зональної

фізико-географічної одиниці, часто не звертаючи уваги на біогеохімічну, трансформаційну й матеріально-енергетичну суть останньої, для потреб екосистемології та відображення згаданої суті його необхідно доповнювати ознакою екосистемності. У зв'язку з цим біомну екосистему потрібно трактувати як сукупність провінційних екосистем, яка за територіальними межами відповідає фізико-географічній зоні, зумовлена інтенсивністю надходження сонячної радіації до земної поверхні та макрокліматичними чинниками й характеризується певним клімаксімним типом рослинності (деревним, чагарниковим, трав'яним тощо).

Біомна диференціація біогеоценотичного покриву Землі та біосфери зумовлена сферичною формою планети та її розташуванням відносно Сонця, що супроводжується різним кутом надходження сонячних променів до земної поверхні та різною інтенсивністю сонячної радіації на різних географічних широтах. Найменше її на високих широтах, найбільше – на екваторіальних, що спричиняє істотні відмінності в радіаційному, тепловому і водному балансах екосистем, різну тривалість періоду вегетації, різні темпи біотичного кругообігу і, врешті-решт, широтну зональність клімату, рослинного і тваринного світу, ґрунтів, структури й продуктивності екосистем, їх потенційних можливостей для задоволення народногосподарських потреб. Горизонтальні межі біомних екосистем найдоречніше визначати за межами фізико-географічних зон, верхню їх межу потрібно підняти до рівня верхньої межі тропосфери, в якій відбувається формування гідротермічного режиму екосистеми, а нижньою охопити найглибші горизонти залягання підземних вод. Рівнинна частина України належить до трьох біомних екосистем: мішаних лісів (або за ознаками плакорної клімаксної рослинності – широколистянолісової), лісостепової і степової.

Структурними блоками біомних екосистем є провінційні та ландшафтні екосистеми. З огляду на їх величезні просторові (латеральні та радіальні) розміри, а також глобальний прояв їх функцій і значення у функціональній організації біосфери, виділення в їх межах структурних блоків меншої розмірності непотрібне. У формуванні біомно-екосистемної організації консорційна, парцелярна і біогеоценозна різноманітності стають неістотними. Основним критерієм вирішення біомних екосистем є життєва форма автотрофних організмів (дерево, чагарник, трава тощо), які домінують у клімаксімних екосистемах, чи сформовані ними панівні типи рослинності (мохово-лишайниковий, чагарниковий, лісовий, степовий, напівпустельний тощо).

Головними факторами, що спричиняють просторову структуру біомної екосистеми, є зональний радіаційний та гідротермічний режими (зональний клімат), відстань від берегів океану (континенталізація клімату) і рельєф місцевості (зумовлює висотну диференціацію ландшафтних і гірських провінційних екосистем). Основною функцією біомних екосистем є збереження зональної специфіки і просторової структури біомних екологічних комплексів відповідно до широтного розподілу енергетичних ресурсів, а також зональної різноманітності біотичних систем і забезпечення внутрішньобіомного і

міжбіомного речовинно-енергетичного та інформаційного обміну, від якого залежать цілісність і стабільність біосфери.

2.2.7 Субстратні екосистеми

Дотепер у літературі немає ні поняття, ні структурно-функціональної характеристики цих екосистем. За умови, коли перед людством постають проблеми керування екологічними, соціальними, економічними, демографічними та іншими процесами в масштабах планети, вивчення структурних змін у півці життя материків та океанів, їх впливу на зміни кліматичного режиму біосфери, латеральні речовинно-енергетичні потоки в межах біосфери, на її продукційні, організаційні, біогеохімічні, енвайронментальні та інші функціональні показники, заслуговують на увагу. Екосистемологія для цього може використати матеріали кліматології, землезнавства, ґрунтознавства, біогеографії, ресурсознавства, океанології, созології та інших наук. Проте вона мусить виробити свої власні підходи й методи вивчення цих складних і функціонально важливих глобальних структур.

Серед головних функцій субстратних екосистем потрібно назвати збереження генофонду рослинних, тваринних, мікробних організмів і грибів, біотичної й ландшафтної різноманітності та унікальних багатств зоогеографічних і флористичних царств, охорона шляхів міжконтинентальної і водної міграції тваринних організмів, передусім перелітних птахів і риб. Це також підтримання біогеохімічних, водотрансформаційних і газових функцій біогеоценотичного покриву материкових та океанічних екосистем, від яких залежить потужність великого геологічного кругообігу, хімічний склад атмосфери та гідросфери, продукційна, ресурсна, редуційна і захисна характеристики цих екосистем і загалом біосфери.

Спеціальної екосистемологічної інтерпретації заслуговують не лише вирубування вологих тропічних лісів на Американському континенті. Не менш шкідливими є екстенсивна лісоексплуатація і щорічні великомасштабні пожежі в лісових біомних екосистемах Північної Азії, а також загальне знеліснення усіх континентів. Важливою також є оцінка наслідків забруднення атмосфери та гідросфери відходами промислового виробництва, насамперед сучасних північноамериканської та європейської цивілізацій, що супроводжується зменшенням концентрації озону в атмосфері, збільшенням у ній вмісту двооксиду вуглецю і загрозою парникового ефекту, підкисленням ґрунтів і лентичних прісноводних екосистем, погіршенням стійкості, стабільності та корисних функцій наземних і водних екосистем.

2.2.8 Глобальна екосистема – біосфера

Як найбільша і неповторна екосистема біосфера характеризується найскладнішою будовою. Вона є сферою життя, в ній повинні мати можливість існувати всі без винятку біотичні системи – від найдрібніших консорційних, до біосферних, відбуватися всі біотичні процеси від молекулярних до

біогеохімічних. Тому, за потреби, її структурними компонентами можна розглядати навіть консорції і біогеоценози, але для пізнання закономірностей її глобальної просторової і функціональної структури потрібно аналізувати глобальні блоки адекватних потужностей.

Основними компонентами її латеральної будови є біомні та провінційні екосистеми. В окремих випадках для аналізу можна використовувати показники й великих ландшафтних екосистем. Головними чинниками горизонтальної структури біосфери є сферична форма планети, що зумовлює надходження до діяльної поверхні Землі на різних географічних широтах різної кількості сонячної радіації, і клімат територій, формування якого зумовлене переважно довготним переміщенням повітряних мас – з океанів на суші та із суш на океани. За взаємодії цих двох чинників формується планетна картина розподілу тепла й вологи, лише частково модифікована макрорельєфом території. Вона спричиняє глобальну зональність рослинного покриву, тваринного світу і ґрунтів, енергетичну й біогеохімічну специфіку біомних і провінційних екосистем, їх продуктивність та інші корисні функції.

Область поширення життя на Землі охоплює нижню частину повітряної оболонки (атмосфери), всю водну оболонку (гідросферу) і верхню частину твердої оболонки (літосфери) (рис. 2.13).

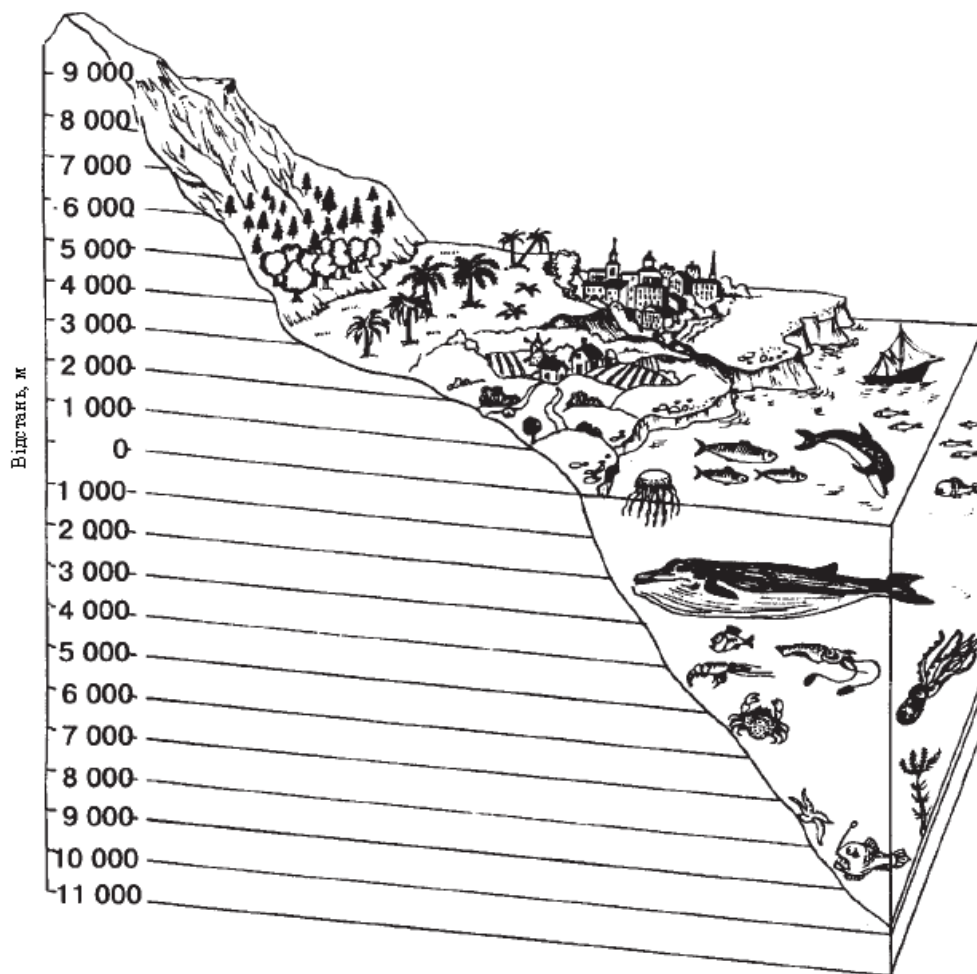


Рисунок 2.13 – Поширення живих організмів у біосфері

Вернадський чітко позначає верхню і нижню межі поширення життя. Верхній —обумовлюється променистою енергією, що надходить з космосу, згубною для живих істот. Йдеться про жорстке ультрафіолетове випромінювання; воно затримується озоновим екраном, нижня межа якого проходить на висоті близько 15 км. Це верхня межа біосфери. Нижня межа життя пов'язана з підвищенням температури в земних надрах. На глибині 3–3,5 км температура досягає 100 °С. Найбільшу протяжність по вертикалі біосфера має в океані: від поверхні до максимальних глибин у ньому мешкають живі істоти.

Для біосфери характерна не лише наявність живої речовини. Вона має також такі три особливості: по-перше, на неї падає могутній потік сонячної енергії; по-друге, в ній в значній кількості міститься рідка вода; по-третє, в біосфері проходять поверхні розділу між речовинами, що знаходяться в трьох фазах: твердій, рідкій і газоподібній. Усе це слугує передумовою для активного обміну речовиною та енергією, в якій велику роль відіграють організми.

Неабияке функціональне значення має радіальна структура біосфери. До її складу входять пронизані життям нижні шари атмосфери, верхні шари літосфери і ціла гідросфера (рис. 2.14). Власне в товщі цих трьох сфер (у межах біосфери) В. І. Вернадський вирізнув визначальний для живої системи, організаційний блок – живу речовину, функціонування якої спричиняло структурно-функціональну суть біосфери протягом мільярдів років її існування.

У радіальній структурі біосфери є ще два надзвичайної ваги компоненти – це плівка життя та озоновий екран. Плівка життя, за В. І. Вернадським (1967), сформована в зоні стику вищезгаданих геосфер, що знаходяться в трьох основних станах – рідкому, твердому й газоподібному. Вона тонким шаром (від кільканадцяти сантиметрів до одної-двох сотень метрів) покриває земну кулю, в ній зосереджене життя рослин, тварин і мікроорганізмів, поза нею життя знаходиться в розсіяному стані. Саме вона виконує вирішальні енергетичну, організаційну, середовищеутворювальну, газову, біогеохімічну, продукційну та інші функції в біосфері. Еволюційні зміни в цій плівці зумовлювали еволюцію біосфери загалом. В антропогені вона стала основним середовищем життя й виробничої діяльності людини, добування харчової продукції та органічної сировини для різних галузей промисловості.

Завдяки потужним механізмам саморегуляції в біосфері не лише відбувалися прогресивні еволюційні зміни її живого блоку. Еволюційними перетвореннями й ускладненнями була охоплена ціла система, наслідком чого стало формування незамінних захисних блоків неживої речовини типу озонового шару чи сприятливого для існування сучасної плівки життя складу атмосфери, гідросфери і верхніх шарів літосфери.

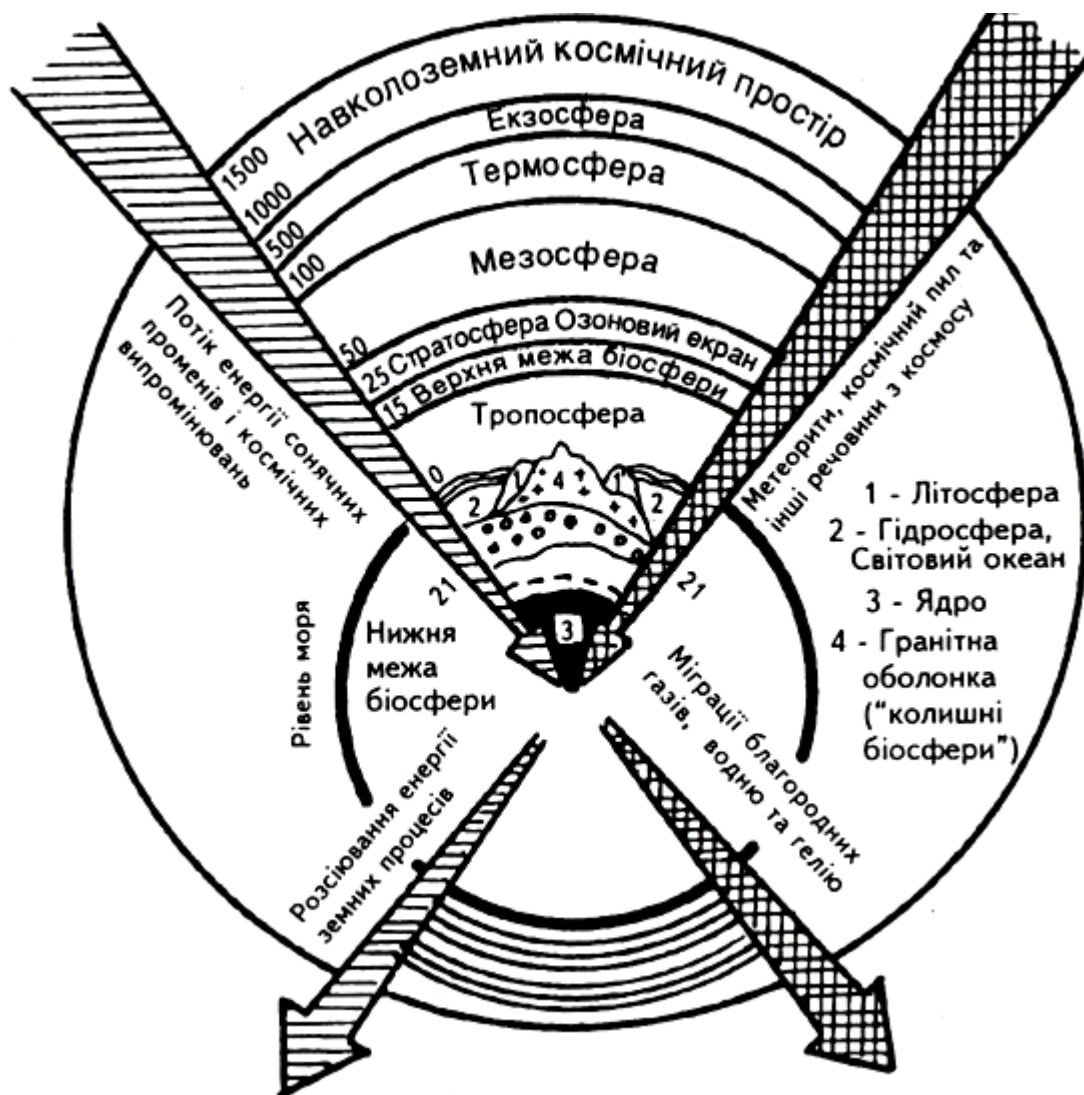


Рисунок 2.14 – Структура біосфери та її оточення (за Назаровим, 1974)

Порівняно з екосистемами менших розмірів біосфера має ряд специфічних рис:

1) біосфера є унікальною, незамінною і неповторною біотичною системою. Дрібних екосистем типу консорції чи біогеоценозу є безліч, вони – взаємозамінні;

2) біосфера відрізняється від інших екосистем практично безмежною тривалістю існування. Час існування інших екосистем обмежений: для індивідуальних консорцій він визначається тривалістю від кількох місяців до сотень і кількох тисяч років, для біогеоценозів – від тисяч до мільйонів років, для екосистем вищих ступенів – до десятків мільйонів років;

3) біосфера зберігає безмежно великий запас генетичної інформації, що накопичувався мільярди років, унаслідок чого ця інформація є практично невичерпною. Запаси інформації підпорядкованих їй екосистем, безперечно, менші хоча б через те, що пам'ять біосфери – це інтегральна пам'ять усіх екосистем Землі;

4) біосфера є найдосконалішою саморегульованою системою з найповнішими механізмами самозахисту від руйнівного впливу зовнішніх космічних і внутрішньопланетних збурень. У процесі еволюції

органічного світу в ній виробився не лише ефективний механізм синтезу органічної речовини за рахунок використання сонячної енергії, а й накопичення в атмосфері вільного кисню, формування озонового екрана як одного з найважливіших засобів захисту живого в біосфері. На відміну від біосфери малі екосистеми існують не в ентропійному абіотичному середовищі, а в організованому біотичному середовищі біосфери і захищені від зовнішніх збурювальних впливів не лише своїми внутрішніми механізмами, а й біосферними;

5) на відміну від малих екосистем біосфера характеризується величезними запасами вільної енергії, не лише тієї, що накопичена в сучасних підпорядкованих їй екосистемах, а й вільної енергії, накопиченої екосистемами минулих епох;

б) біосфера вирізняється величезним різноманіттям життєвих форм, видів, внутрішньовидових структур й екосистем, просторовою і функціональною асиметрією, потужними механізмами самозбереження, прогресивного саморозвитку, постійним зростанням організованості та неентропійності й практично незнищеністю.

Тому підходи до аналізу структурно-функціональної суті та еволюції біосфери, критерії і розмірності оцінки цього складного глобального явища мають бути адекватними його обсягові, а не запозиченими з характеристик нижчих ступенів чи рівнів організації.

2.3 Енергетичний баланс екологічних систем та їх продуктивність

2.3.1 Енергетичний баланс екологічних систем

Енергію визначають як здатність виконувати роботу. Властивості енергії описуються двома законами термодинаміки. **Перший закон термодинаміки**, або закон збереження енергії, гласить, що енергія не зникає і не утворюється заново, вона лише може переходити з однієї форми в іншу. **Другий закон термодинаміки**, або закон ентропії, формулюється по-різному, зокрема: процеси, пов'язані з перетворенням енергії, можуть проходити самоплинно лише за умови, що енергія переходить з більш концентрованої форми до більш розсіяної, тобто деградує. Другий закон можна сформулювати і так: будь-яке перетворення енергії з однієї форми в іншу неминуче супроводжується розсіюванням її частини у формі, недоступній для подальшого використання. Одним із наслідків цього є неможливість створення вічного двигуна.

Ентропія (від грецького *entropia* – перетворення, поворот) – міра кількості зв'язаної енергії, що стає недоступною для використання. Цей термін також використовується як міра зміни неупорядкованості системи, що відбувається при деградації енергії.

Енергетичний підхід до вивчення екологічних процесів значною мірою сприяв формуванню екології як науки, оскільки саме він дав змогу вивчати дивовижне розмаїття життя в усіх його проявах через установлення кількісних закономірностей як міжорганізмів, так і міжпопуляційних відносин,

визначати енергетичні баланси біо- й екосистем різного рівня організації. Колосальна кількість публікацій цього напрямку сприяла з'ясуванню загальних закономірностей трансформації енергії як окремими організмами, популяціями, угрупованнями, так і складових енергетичного балансу біосистем різного рівня організації. Але при цьому практично не враховується вплив якості середовища на жоден продукційно-енергетичний параметр. У практиці біопродукційних досліджень часто майже всі величини одержують розрахунковими методами, використовуючи продукційно-біомасові (P/B) коефіцієнти, одержані (у більшості випадків) десятки років тому за умов зовсім іншого екотоксикологічного стану екосистем. Це не лише унеможливорює одержання об'єктивної інформації з продукційних параметрів різних видів, популяцій і трофічних рівнів, беручи до уваги значне погіршення стану середовища останніми десятиліттями. Тим паче що за рівнем забруднення окремі екосистеми відрізняються настільки істотно, що його неврахування зводить нанівець цінність проведених таким чином біопродукційних досліджень.

Важливим етапом розвитку цієї проблеми є з'ясування понять «норма» і «патологія» екосистем. У цьому аспекті першочерговим завданням потрібно визнати розроблення кількісних критеріїв, які спроможні давати об'єктивну оцінку стану якості середовища за ступенем його адекватності особливостям живої матерії.

Основним джерелом енергії для багатьох процесів у екосистемі є сонячна. Порівняно з нею енергії до екосистеми від інших джерел надходить дуже мало (теплової енергії з надр Землі – 0,04 % сумарної сонячної радіації, тектонічних рухів – 0,0005 %). Тому сонячна енергія і використовується в екосистемі найбільш ефективно: вона здатна трансформуватися в інші види енергії (теплову, хімічну, механічну), завдяки їй відбувається продукування біомаси, вологообіг, циркуляція повітряних мас тощо.

Загальну схему потоку і трансформації сонячної енергії в екосистемі наведено на рис. 2.15. На верхню межу атмосфери надходить 2 кал/см²·хв сонячної енергії. Проходячи крізь атмосферу, вона послаблюється атмосферними газами та пилом. При цьому ступінь послаблення залежить від довжини хвилі (частоти) світла. З екологічної точки зору найбільш важливими обставинами диференційованого послаблення випромінювання є дві:

1) ультрафіолетове випромінювання (найбільш небезпечне для протоплазми) практично не проходить крізь озоновий шар, що й забезпечує можливість життя на планеті;

2) менше за все послаблюється видиме світло, що необхідне для фотосинтезу, а тому він може відбуватись і в похмурі дні.

За кількістю енергії, яку отримує екосистема, розрізняють такі: мегатермні (радіаційний баланс $RB > 80$ ккал/см² на рік, поширені в екваторіальній зоні); макротермні ($RB 50-70$, поширені в тропіках); мезотермні ($RB 50-70$, суб- і середземномор'я); субмезотермні ($RB 40-50$, неморальна зона); субмікротермні ($RB 30-40$, суббореальна зона); мікротермні ($RB 20-30$, бореальна зона); нанотермні ($RB < 20$ ккал/см² на рік, поширені в суб- та арктичній зонах).

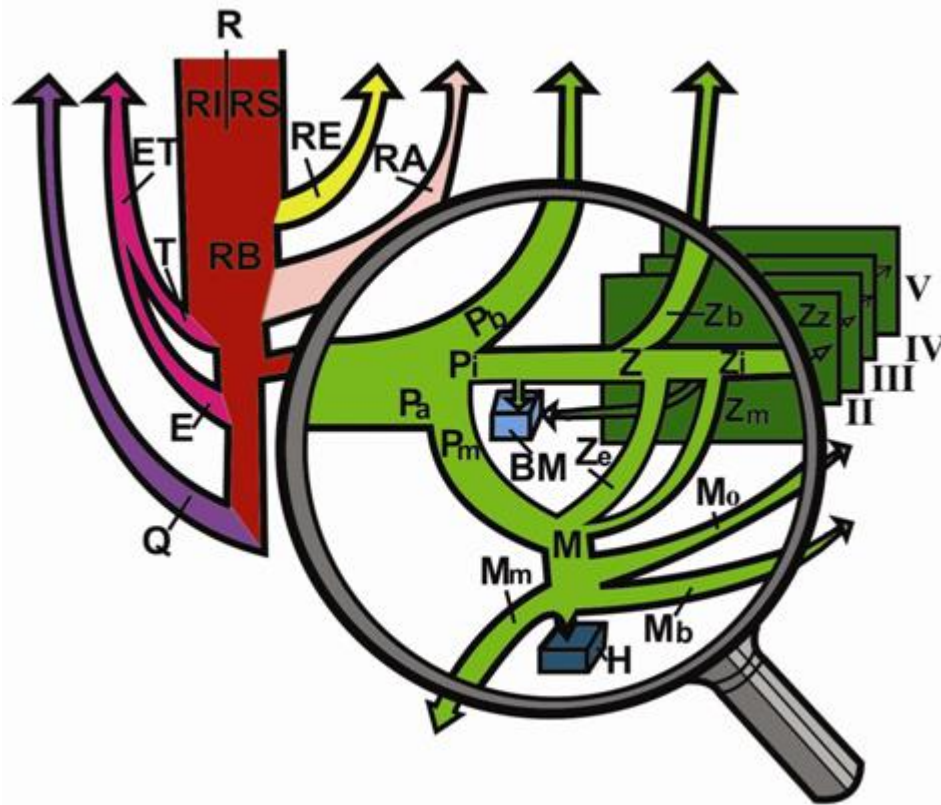


Рисунок 2.15 – Схема потоку енергії в екосистемі.

Сонячна радіація: R – сумарна, RI – пряма, RS – розсіяна, RA – відбита; RE – ефективне випромінювання; RB – радіаційний баланс; T – витрати тепла на транспірацію; E – те саме на фізичне випаровування; Q – турбулентна віддача тепла атмосфері; P – енергія на фотосинтез; P_b – енергія дихання рослин; P_a – чиста первинна продукція; P_m – втрата енергії з опадом; P_i – енергія у фітомасі; BM – енергія, накопичена в прирості біомаси; Z – енергія, що надходить до травоядних тварин (консументів 1-го трофічного рівня); Z_b – енергія дихання тварин; Z_i – енергія синтезу нової зоомаси; Z_m – енергія, що втрачається разом із загибеллю тварин; Z_z – енергія, що переходить до наступного трофічного рівня; M – енергія мортмаси; M_b – енергія на дихання сапротрофів; M_c – енергія окиснення мортмаси; M_m – енергія мінералізації мортмаси; H – енергія, накопичена в гумусі

За ступенем поглинання сонячної радіації рослинним покривом (перехопленням світла фітогеогоризонтами та ступенем освітленості поверхні ґрунту) екосистеми можна поділити на: геліоморфні (геосистеми лише з трав'яним покривом чи позбавлені його); субгеліоморфні (чагарники, рідколісся); семігеліоморфні (світлохвойні, дрібнолисті ліси); сціоморфні (зімкнені темнохвойні та широколисті ліси). Від типу затіненості геосистеми істотно залежать видовий склад, продуктивність, конкурентні відношення та деякі інші ознаки нижніх фітогеогоризонтів.

Практично будь-який аспект діяльності людини в екосистемі призводить до зміни у ній інтенсивності енергетичних потоків. Причому змінюються величина та співвідношення не лише внутрішньогосистемних потоків, а й вхідних та вихідних. Через забруднення атмосфери аерозолями дещо збільшується відбита радіація, тому до геосистем може надходити менше сумарної радіації. Так, смог здатний зменшити її на 30–40 %. У потоці сумарної радіації збільшується частка розсіяної, що призводить до деякого нівелювання

експозиційних відмінностей геосистем схилів.

В агроекосистемах значне збільшення надходження енергії пов'язане із внесенням органічних добрив. Частина цієї додаткової енергії йде на формування врожаю, невелика частина консервується в гумусі, а значно більша (на схилах – до 60–70 %) непродуктивно втрачається геосистемою разом із виносом поверхневим та ґрунтовим стоками.

Трансформація характеру діяльної поверхні екосистеми внаслідок розорювання, зведення лісів, меліорації тощо призводить до зміни величини альbedo, а через неї – і до зміни структури радіаційного балансу. Так, альbedo систем із степовою рослинністю становить 19–23 %, а свіжозораних агроугідь на їх місці – 5 %; широколистих лісів 12–17 %, а полів зернових культур на їх місці – 22–28 %. Відповідно змінюється і частка відбитої радіації.

Зміни вертикальної структури екосистеми, пов'язані зі зведенням природної рослинності, призводять до трансформації трофічної структури систем, а відтак – і потоків енергії між біотичними елементами. Найістотнішими тут є щорічні втрати енергії, накопичені геосистемою у фітомасі. Внаслідок цього зменшується потік енергії, що надходить до детритного циклу – основи процесу продукування гумусу. Загалом трофічна структура агрогеосистем сильно спрощується, інтенсивність потоків енергії від продуцентів до первинних консументів значно зменшується, а сама сітка цих потоків стає менш розгалуженою. Це, зокрема, зумовлює низьку стійкість агрогеосистем порівняно з природними.

Важливим елементом біотичної структури екосистем є своєрідність ланцюгів живлення в кожній з них.

У природі не існує такого виду, який не був би пов'язаний з іншим. Як уже зазначалося, живлячись за рахунок інших істот, організми дістають енергію. Внаслідок цього у природі виникають ланцюги живлення. Ряди взаємозв'язаних видів, у яких кожний попередній є об'єктом живлення наступного, називають ланцюгами живлення. Розрізняють ланцюги живлення різних типів. Тип ланцюга залежить від початкової ланки.

Рух енергії в екосистемах відбувається за допомогою двох зв'язаних типів харчових мереж: пасовищної і детритної.

У пасовищній харчовій мережі живі рослини поїдаються фітофагами, а самі фітофаги є їжею для хижаків і паразитів.

У детритній харчовій мережі відходи життєдіяльності та мертві організми розкладаються детритофагами й деструкторами до простих неорганічних сполук, які знову використовуються рослинами.

Тобто початковою ланкою в ланцюгах живлення можуть бути рослини, мертві рослини, рештки чи послід тварин. Наприклад, рослини – попелиці – дрібні комахоїдні птахи – хижі птахи; рослини – зайці – лисиці – вовки. У цих випадках ряди починаються з рослин. До іншого типу рядів живлення належать ряди, що розпочинаються з посліду тварин із невикористаними запасами речовин: коров'ячий послід – личинки мух – комахоїдні птахи – хижаки. Прикладом ланцюгів живлення, які починаються з рослинних решток, може бути: рослинний перегній – дощові черв'яки – кроти. Ланцюг живлення можна

увияти у вигляді *піраміди чисел*, фундамент якої становлять численні види рослин, наступні рівні утворюють рослиноїдні та м'ясоїдні тварини, чисельність яких швидко зменшується в напрямку до вершини, яку посідають нечисленні великі хижаки.

Є три основних типи пірамід:

- піраміда чисел показує чисельність окремих організмів;
- піраміда біомаси характеризує загальну суху вагу, калорійність або іншу міру загальної кількості живої речовини;
- піраміда енергії відповідає величині потоку енергії або «продуктивності» на послідовних трофічних рівнях.

Піраміди чисел і біомаси можуть бути оберненими (або частково оберненими), тобто основа може бути меншою, ніж один або кілька верхніх поверхів. Так буває, коли середні розміри продуцентів менші, ніж розміри консументів. Навпаки, екологічна енергетична піраміда завжди звужується догори за умови, що будуть враховані всі джерела енергії живлення в системі.

Як приклад використання енергетичного балансу під час вирішення екологічних завдань розглянемо таку задачу: скільки людей протягом року зможуть прогодуватися з 1 га морської акваторії, багатой планктоном, якщо людині на рік необхідно отримувати з їжею $4,19 \cdot 10^6$ кДж енергії, а біопродуктивність 1 м² акваторії з урахуванням трофічних ланцюгів становить 600 г/м²·рік доступної для людини сухої речовини (1 г сухої речовини в середньому акумулює 20 кДж енергії)?

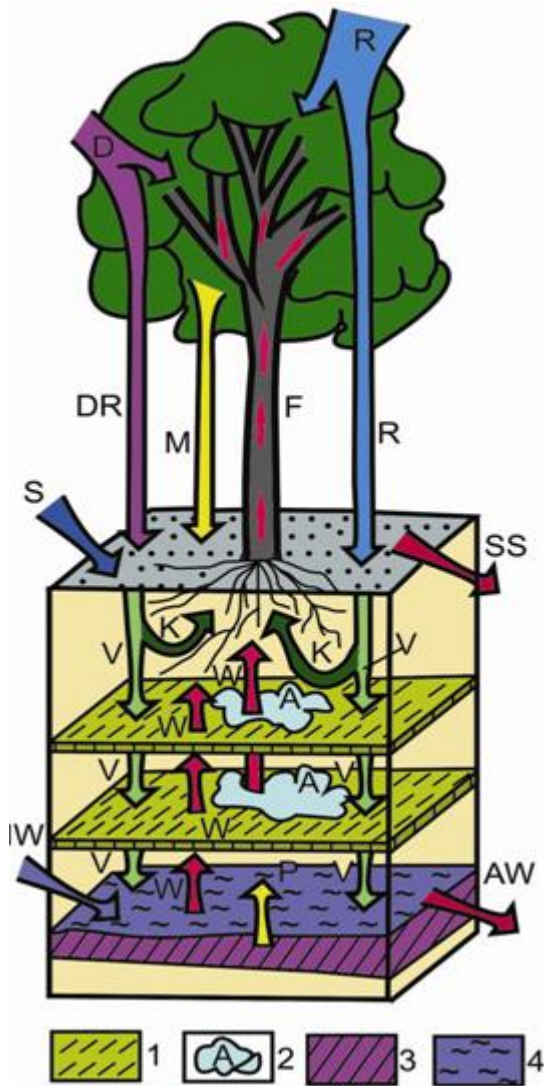
Для розв'язання цієї задачі визначаємо річну енергетичну продуктивність 1 га акваторії: $(600 \text{ г/м}^2 \cdot 20 \text{ кДж/г}) \cdot 10000 \text{ м}^2 = 120000000 \text{ кДж}$.

Потім визначаємо кількість людей, які зможуть задовольнити свої потреби з цієї акваторії: $120000000 \text{ кДж} / 4190000 \text{ кДж} = 29$ осіб.

Хімічні елементи, що становлять географічну оболонку, по-різному проявляють себе в екосистемах. Це стосується як їх мас у екосистемі, так і особливостей поведінки – міграції між елементами вертикальної структури, здатності включатися в кругообіги, поглинатися рослинами тощо. Кожний елемент в екосистемі має власну частину. Проте виділяються деякі загальні закономірності потоків різних речовин в екосистемах, тому й існують загальні підходи до їх дослідження.

Загальну схему потоків мінеральних речовин у геосистемі наведено на рис. 2.16. Як бачимо, основні вхідні потоки речовин до геосистеми надходять з атмосферними опадами R та пилом D за рахунок вивітрювання первинних мінералів гірських порід W, розчинення солей осадових порід S, унаслідок господарської діяльності A.

З атмосферними опадами на поверхню Землі щорічно потрапляє 1800 млн т, або 12 т/км², розчинних речовин, а на територію України – 7,3 млн т, або 12,1 т/км². Найбільше цим шляхом надходить сірки (до 2,6 т/км² у південних районах України), дещо менше – кальцію та азоту. За рахунок осаду з атмосфери пилу до екосистем щорічно надходить до 10 т/км² речовин, а в промислових регіонах – у десятки разів більше.



1 – ландшафтно-геохімічні бар'єри;
 2 – мінеральні речовини, що нагромаджуються на бар'єрі;
 3 – осадові галогенні породи;
 4 – водоносний горизонт з мінералізованими породами.
 R – надходження речовин з атмосферними опадами;
 D – надходження речовин із пилом;
 DR – вимивання дощами речовин, затриманих листяною поверхнею;
 P – розчинення солей осадових галогенних порід;
 S – надходження речовин із поверхневим стоком;
 IW – надходження речовин із боковим притоком ґрунтових вод;
 AW – винесення речовин із боковим притоком ґрунтових вод;
 M – мінеральні речовини опаду;
 V – низхідний потік речовин з водним розчином;
 K – поглинання речовин коренями рослин;
 F – транспортування речовин рослиною;
 A – нагромадження речовин на ландшафтно-геохімічних бар'єрах;
 W – висхідний потік речовин із водним розчином;
 SS – внесення речовин поверхневим стоком

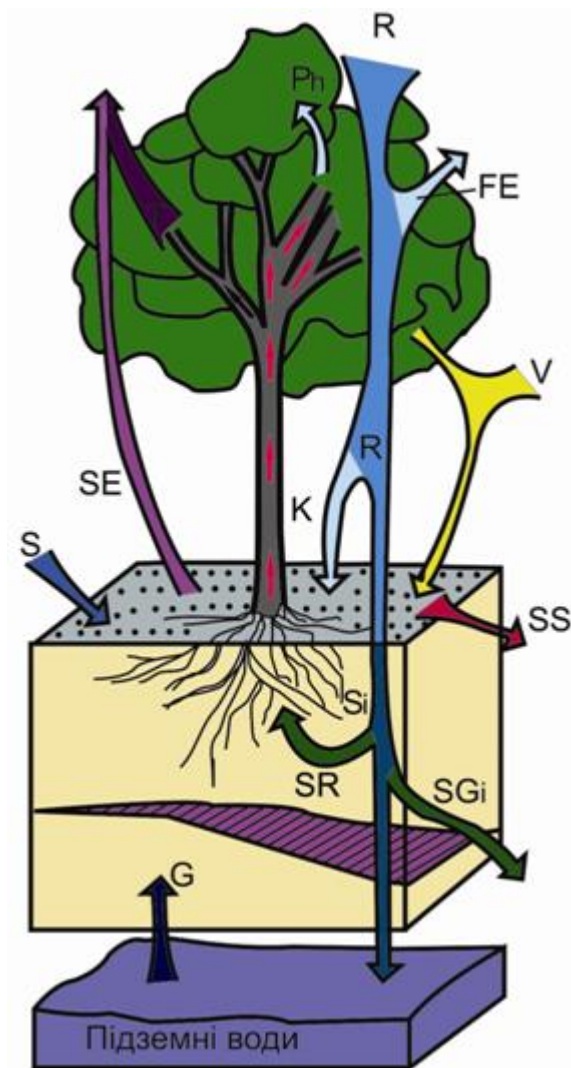
Рисунок 2.16 – Схема потоків мінеральних речовин у геосистемі (за М. Д. Гродзинським, 1993)

Утворення легкорозчинних солей під час вивітрювання первинних мінералів – процес, що відбувається в усіх екосистемах, але дуже повільно. Надходження ж до екосистем солей унаслідок розчинення солей осадових порід може бути значним у регіонах, де породи галогенної формації залягають близько до поверхні. В Україні такими регіонами є Прикарпаття та Закарпаття, Дніпровсько-Донецька западина, Донбас та інші, де значно поширені соляні відклади (купольні структури, штоки тощо).

Мінеральні речовини, що надійшли до геосистем, можуть знаходитись у вигляді її резервного фонду або здійснювати кругообіг у її вертикальному профілі. Резервний фонд становлять речовини, що знаходяться у нерухомих формах, а також легкодоступні речовини, накопичені в геосистемі в надмірних кількостях, через що вся їх маса не може бути охоплена кругообігом. Речовини

резервного фонду частково поповнюються за рахунок мігруючих речовин і також можуть включатися в міграційні процеси. Ці процеси зумовлені двома основними факторами: потоком води та її властивостями як хімічної речовини (гідрогенезом); синтезом та розчиненням органічної речовини (біогенезом).

Роль води як фактора міграції речовин полягає не лише в її мобільності в екосистемі. У її водному середовищі відбувається переважна більшість хімічних реакцій. Потік води у вертикальному профілі геосистеми супроводжується процесами розчинення, вилужування, іонного обміну, адсорбції, внаслідок чого хімічні елементи та сполуки певних геомас переходять до водного розчину й далі переміщуються з ним (рис. 2.17). Внаслідок випаровування вологи, кристалізації, сорбції та інших гідрогенних процесів з водного розчину випадають мінеральні речовини, акумулюючись у певних геомасах або геогоризонтах. Нарешті, практично лише з водним розчином мінеральні речовини з ґрунту можуть потрапити до рослин і далі взяти участь у біогенній міграції по трофічній сітці геосистеми.



- R – атмосферні опади;
- V – конденсація водяної пари;
- S, SS – води поверхневого стоку;
- T – транспірація;
- SE – фізичне випаровування з поверхні ґрунту;
- FE – випаровування з поверхні фітогеогоризонтів (інтерцепційна втрата);
- S_i – низхідний потік вологи в ґрунті;
- SR – усмоктування вологи корінням;
- K – транспорт вологи до транспіруючих поверхонь рослин;
- P_h – втрати вологи на фотосинтез;
- SG_i – відтік ґрунтових вод за межі геосистеми;
- G – поповнення ґрунтових вод геосистеми підземними

Рисунок 2.17 – Схема потоків води в геосистемі

Фізико-хімічні, термодинамічні та інші умови геогоризнту, крізь який проходить потік водного розчину, визначають ступінь рухомості кожного з хімічних елементів та їх сполук. Практично в усіх геосистемах у вертикальній структурі виділяються суміжні геогоризнти, що значно відрізняються один від одного за цими умовами. Тут різко змінюються умови міграції різних речовин – одні з них випадають із розчину і концентруються, інші мігрують менш інтенсивно і накопичуються частково, треті не реагують на зміну умов міграції. В геохімії ландшафту місця, де різка зміна умов міграції призводить до накопичення елементів, називаються *ландшафтно-геохімічними бар'єрами* (термін увів О. І. Перельман). Залежно від параметрів, значення яких різко змінюються на бар'єрі, виділяють їх різні типи. При цьому на кожному з типів бар'єрів накопичується характерна асоціація хімічних елементів (табл. Б. 5, додаток Б). У різних геосистемах кількість та склад ландшафтно-геохімічних бар'єрів неоднакові. Так, у лісових геосистемах України переважають кислі та глейові бар'єри, степових – лужні, випаровувальні та ін.

Із ландшафтно-екологічної точки зору, крім типу бар'єра, важливо враховувати і його місцеположення у вертикальній структурі геосистеми. Так, бар'єри, розміщені в ґрунті нижче його кореневмісного шару, в екологічному плані можуть відігравати позитивну роль – токсичні елементи, що тут накопичуються, рослинами споживатися не можуть, і водночас цей бар'єр перешкоджає досягненню токсичними елементами ґрунтових вод, лімітуючи їх забруднення. Такий бар'єр виконує функцію консерватора («кладовища») забруднень у геосистемі. Натомість бар'єри, розташовані у межах кореневмісного шару ґрунту, можуть бути вкрай небезпечними для рослин.

Напрямок гідрогенних потоків речовин у геосистемі відповідає напрямку потоку вологи. За переважання низхідних потоків води речовини можуть виноситися за межі ґрунту і досягати рівня ґрунтових вод. Унаслідок цього розсолюються ґрунти, підвищується мінералізація ґрунтових вод, а при інтенсивних потоках вологи в піщаних ґрунтах зростає дефіцит поживних речовин. Проте частіше хімічні елементи накопичуються на бар'єрах у педогеогоризнтах та в зоні аерації. При висхідних потоках води внаслідок фізичного випаровування ґрунтових вод вміст солей у ґрунті та підґрунті зростає, що призводить до засолення геосистем.

Важливим фактором міграції речовин в екосистемі є життєдіяльність рослин. Встановлено, що практично всі хімічні елементи, що містяться в географічній оболонці, необхідні рослинам і споживаються ними. З них незамінні лише деякі: N, P, K, S, Ca, Mg (макроелементи – споживаються у великих кількостях) та Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B та Cl (мікроелементи – споживаються у менших кількостях).

Із атмосфери надземні органи рослин засвоюють мінеральні речовини в дуже незначних кількостях, а основна їх маса поглинається з ґрунту. Корінь одержує мінеральні речовини шляхом: поглинання іонів з ґрунтового розчину; обмінного поглинання сорбованих іонів (віддає іони H^+ та HCO_3^- , а замість них отримує іони поживних солей); розчинення зв'язаних запасів мінеральних речовин (виділяючи органічні кислоти, корінь вивільняє з хімічно зв'язаного

стану елементи, зокрема важкі метали, і потім легко поглинає їх). Потрапивши до кореня, іони переносяться до інших органів рослин. Це перенесення потребує витрат енергії, джерелом якої є дихання рослин, тому інтенсивність поглинання ними мінеральних речовин визначається едафічними факторами дихання (оптимальним температурним режимом, освітленістю, співвідношенням між вологістю та аерацією ґрунту тощо).

Із розрахунків мас хімічних елементів, які щорічно залучаються до техногенних потоків, відомо, що з 60-х років ХХ ст. геохімічна діяльність людини за потужністю не поступається природним процесам. За рахунок цієї діяльності поверхня суші щорічно збагачується на мільйони тонн Р, Ті, Сu, Мп, Zn, Рb та інших елементів, на десятки тисяч тонн Rb, Н, Zr. Основні джерела надходження забруднень до геосистем – атмосфера, внесення добрив та обробка агрогеосистем пестицидами та отрутохімікатами, забруднені підземні води, захоронені в ґрунті та породах зони аерації техногенні речовини, зрошення стічними та забрудненими річковими водами.

Потрапляючи до атмосфери, забруднювальні речовини (це 90 % газів і 10 % твердих частинок) досить швидко розсіюються. Середня тривалість знаходження газів у тропосфері становить 2–4 місяці, аерозолів – 4 місяці біля тропосфери, 1 місяць у верхньому та 6–10 діб у нижньому шарах тропосфери. Ці дані потрібно розглядати як орієнтовні, оскільки тривалість перебування викидів в атмосферу визначається багатьма метеорологічними умовами, що дуже мінливі в просторі й часі. Атмосферні забруднення можуть проникати в рослини внаслідок їх газообміну, осаду на поверхні листя та пагонах. За тривалої дії навіть невисоких концентрацій забруднень у рослин виникають хронічні пошкодження (депресія фотосинтезу, порушення росту, відмирання клітин тощо). Різні рослини неоднаково реагують на атмосферні забруднення. Найбільш чутливі до них лишайники, з дерев – ялина (до дії HF, SO₂, HCl), сосна (до HF, NH₃, SO₂), горіх (HF, NH₃). Стійкими вважаються туя, деякі види дубів, кленів, граб.

Чутливість рослин до атмосферних забруднень залежить від едафічних факторів. Установлені такі основні закономірності: *температура* – з її підвищенням чутливість рослин дещо зростає; *вологість повітря* – в діапазоні 30–60 % чутливість рослин зростає слабо, понад 60 % – різко; *вологість ґрунту* – чим вологіший ґрунт, тим чутливість більша, проте сукулентні галофіти на цей параметр практично не реагують; *наявність поживних елементів у ґрунті* – рослинність бідних, особливо піщаних ґрунтів чутлива до атмосферних забруднень, чим вищий у ґрунті вміст N, P, K та CaCO₃, тим чутливість менша; за нестачі в ґрунті певного елемента стійкість рослин до атмосферного забруднення менша.

Потрапляючи на поверхню ґрунту, забруднювальні речовини включаються у вертикальні потоки і при цьому можуть значно трансформувати їх налагоджений механізм. Це пов'язано з тим, що багато забруднювальних речовин здатні руйнувати деякі важливі ландшафтно-геохімічні бар'єри, створювати нові, змінювати тип тих, що були раніше, внаслідок зміни кислотно-лужних або окисно-відновних властивостей ґрунту змінювати і

швидкість міграції різних речовин. Проходячи крізь ґрунт, забруднені води можуть частково або й повністю очищуватися, проте сам ґрунт при цьому забруднюється. Хімізм цього забруднення та вертикальний розподіл акумульованих речовин залежать від типу ландшафтно-геохімічних бар'єрів та їх місцеположення в геосистемі.

Будь-яку забруднювальну речовину, що потрапила до ґрунту, можуть поглинати живі організми. З рослин-автотрофів, що акумулюють забруднювальні речовини, починається забруднення всієї трофічної сітки геосистеми. Накопичення токсичних речовин у живих організмах збільшується з кожним наступним трофічним рівнем). Тому навіть незначна концентрація забруднювальних речовин у рослинах може викликати токсикацію тварин вищих трофічних рівнів.

Завдяки живим організмам забруднення залучається до кругообігу мінеральних речовин, і виведення їх з геосистеми ускладнюється. Однак геосистеми мають певні механізми, що дозволяють їм знешкодити забруднення або вивести їх з кругообігу та з геосистеми взагалі. Сукупність цих механізмів називається *самоочищенням геосистем*.

Самоочищення геосистем може реалізовуватись у трьох групах процесів: винесення забруднень за межі геосистем ґрунтовими водами, вітром та з урожаєм; зв'язуванням забруднень у важкодоступні (зокрема нерозчинні) форми, так що їх споживання живими організмами стає практично неможливим; розкладання токсичних речовин на сполуки та елементи, які не є небезпечними для живих організмів.

Як умовну форму самоочищення геосистеми можна також вважати концентрацію забруднень на ландшафтно-геохімічних бар'єрах, що розташовані між ґрунтовим профілем та капілярною каймою ґрунтових вод (у так званому «мертвому горизонті»). Тут забруднювальні речовини можуть накопичуватися в легкорозчинній формі й у значних кількостях, але при цьому вони нешкідливі ні для рослин, ні для ґрунтових вод. Для коренів рослин забруднювальні речовини недосяжні, а проникнення їх до ґрунтових вод блокується ландшафтно-геохімічним бар'єром та (або) непромивним водним режимом геосистеми.

У водних екосистемах, особливо океанічних, процеси накопичення та передачі енергії мають свої структурно-функціональні особливості. Так, життя розподілене в океані дуже нерівномірно. Ще В. І. Вернадський виділяв дві форми концентрації живої речовини: *життєві плівки* та *згущення життя*. *Життєві плівки* охоплюють поверхню і дно океану. На межі газоподібного і рідкого середовищ розташовується планктонна плівка життя, на межі рідкого і твердого середовищ – донна. *Згущення життя* В. І. Вернадський розділяв на три типи: прибережні, саргасові, рифові. Пізніше були відкриті ще два типи: апвелінгові і гідротермальні рифтові (рис. 2.18). Решта частини океаносфери є зоною розрідження живої речовини.

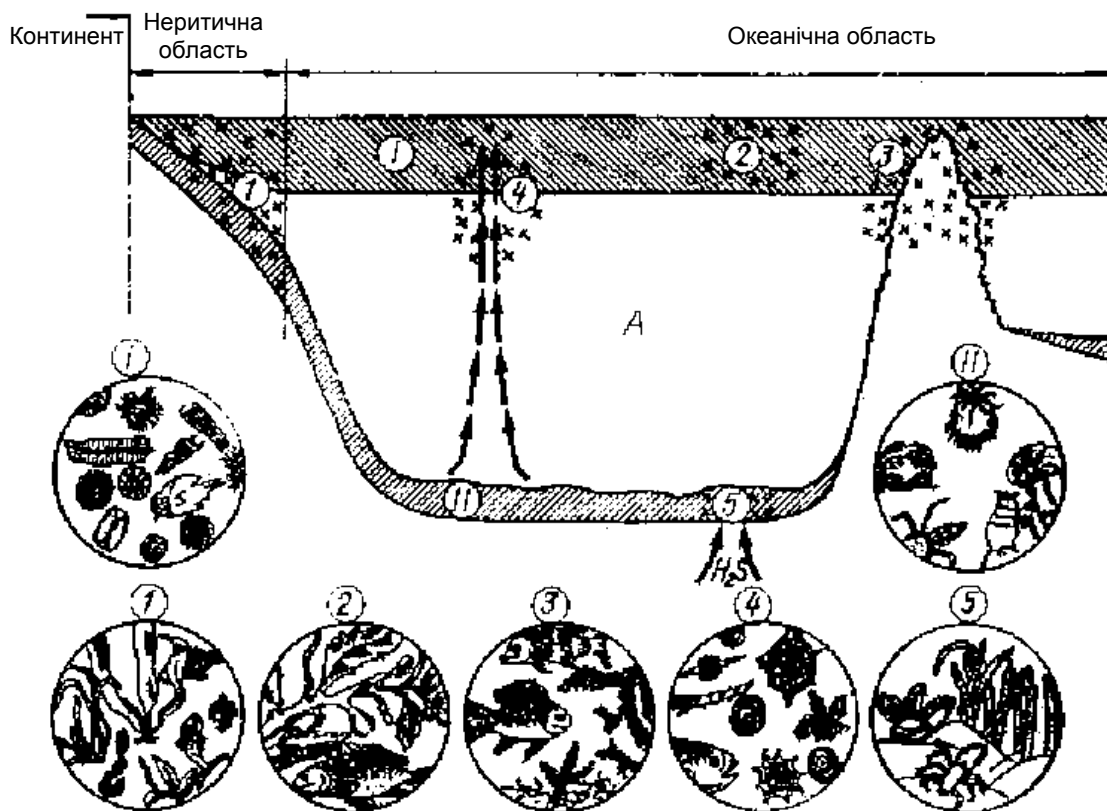


Рисунок 2.18 – Плівки і згущення життя в Світовому океані, за А. В. Лапо: I – планктонна плівка життя; II – донна плівка життя; III – згущення життя: 1 – прибережне; 2 – саргасове; 3 – рифове; 4 – апвелінгове; 5 – гідротермальне рифове; IV – апвелінг; А – область розрідження живої речовини

Між розподілом біомас планктонної і донної плівок життя у відкритому океані існує тісна кореляційна залежність: акваторіям із високою продуктивністю планктону відповідають ділянки з підвищеною біомасою бенталі.

Для забезпечення екологічної рівноваги всієї біосфери ці плівки і згущування життя в океані відіграють ключову роль. Жива речовина океану робить свій внесок не лише в продукування біомаси, а й у підтримання газового складу атмосфери, регулювання хімічного складу океанічних вод, процесів утворення осадових гірських порід, формування берегів і підводного рельєфу.

Океан неоднорідний і за фізико-географічними умовами. Елементи його структури, що відрізняються за характером природних процесів, розділяють так звані активні граничні поверхні, що є водночас областями біологічних процесів, що бурхливо проходять: контакт поверхневої товщі океану з атмосферою; контакт океану із сушою (морські мілководдя, шельф); контакт океану із дном.

Єдність океану підтримується цілісністю його екологічної системи. Океан заповнений життям від поверхні до максимальних глибин. Проте весь процес біологічного кругообігу починається у верхньому, освітлюваному Сонцем шарі води. Головним виробником первинної біологічної продукції в океані є фітопланктон – мікроскопічні водорості (продуценти), що плавають у товщі води. Подальші ланки кругообігу складаються з дрібних тварин, що харчуються

фітопланктоном, різних хижаків, що поїдають свої жертви, детритофагів і мікроорганізмів-редуцентів (рис. 2.19). У ланцюжку харчових зв'язків приріст біомаси кожного подальшої ланки приблизно в 10 разів менший, ніж попередньої (рис. 2.20).

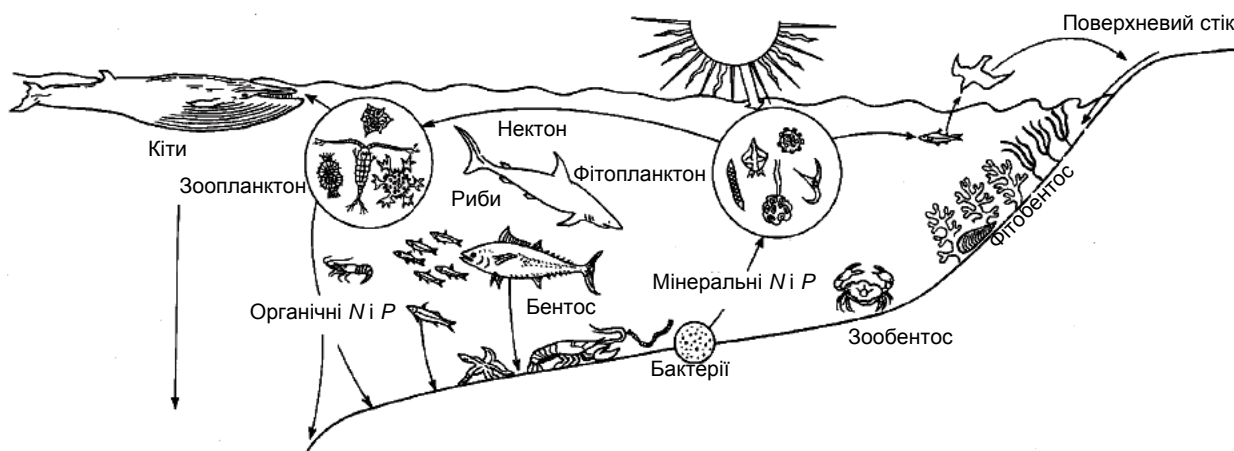


Рисунок 2.19 –Екологічна система океану. Стрілками показані трофічні зв'язки, кругообіг речовини та енергії (за П. Дювіньо і М. Танг)

Одна з особливостей техногенезу – активне розсіяння металів, саме тому сьогодні відбувається інтенсивна «металізація» загального фону геохімічного середовища. Більше 30 хімічних елементів небезпечні для морських організмів і людини, причому велику частину становлять перехідні й важкі метали. Багато з них біофільні, тобто морські організми накопичують їх у своїх тканинах, у концентраціях, що у десятки, сотні тисяч разів перевищують вміст металів у морській воді.

Небезпека полягає в тому, що вміст важких металів та отрутохімікатів збільшується з просуванням по трофічному ланцюжку. В 1 кг великої хижої риби їх міститься приблизно стільки ж, скільки їх сконцентровано в 10 000 кг фітопланктону. Порівняно з пірамідою біомас піраміда вмісту важких металів та отрутохімікатів в екосистемі виявляється перевернутою (див. рис. 2.20).

Ця закономірність накопичення забруднювальних речовин і екотоксикантів спостерігається і в наземних системах.

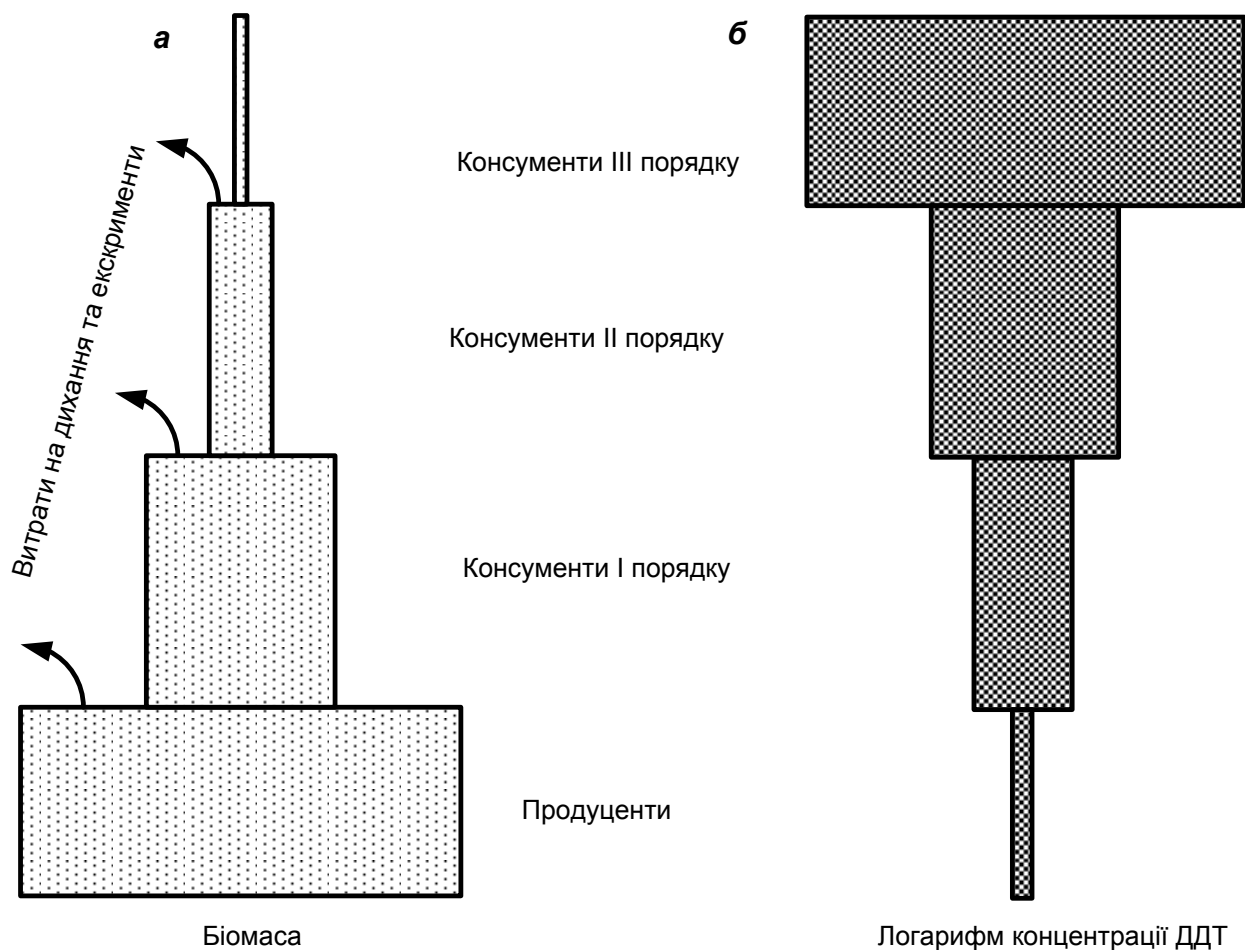


Рисунок 2.20 – Піраміда чисел в екосистемі океану (за G. M. Woodwell):
 а – піраміда біомас; б – перевернута піраміда концентрації забруднювальних речовин (ДДТ) у ланках харчового ланцюга

2.3.2 Біологічна продуктивність екологічних систем

Завдання вивчення продуктивності полягає у з'ясуванні швидкості, з якою різні біосистеми за тих чи інших умов синтезують (чи можуть синтезувати) подібну собі речовину, використовуючи для цього асимільовані сполуки та енергію. Будь-яка біологічна система існує лише за неперервного обміну речовин з навколишнім середовищем.

Продуктивність біологічної системи – її здатність виробляти подібну собі речовину. Всі біосистеми характеризуються продуктивністю, і системи одного типу порівнюють за рівнем продуктивності (швидкістю продукування), про що роблять висновки за величинами продукційних показників. До основних продукційних показників належать продукція та питома продукція (Заїка, 1983).

Продукція (P) – вся вироблена даною біосистемою за даний відрізок часу речовина з урахуванням витрат на обмін. Зазвичай мається на увазі органічна речовина, синтезована системою, але оцінка продукції найчастіше здійснюється в термінах «живої маси», включаючи скелетні та інші подібні утворення.

Крім потоків енергії і кругообігів речовин, екосистемам притаманні розвинені інформаційні мережі, які включають потоки фізичних і хімічних сигналів, що забезпечують взаємозв'язки елементів системи між собою і функціонування її як єдиного цілого. Саме тому є всі підстави вважати, що екосистеми мають кібернетичну природу. Проте необхідно підкреслити, що на відміну від створених людиною кібернетичних пристроїв її управляючі функції зосереджені всередині неї дифузно (а не спрямовані назовні й спеціалізовані).

Оскільки будь-яка реальна біосистема відтворює себе безперервно, то при кількісній оцінці продукції виникає питання про даний відрізок часу, для якого оцінюється продукція біосистеми. Причому цей період часу повинен вибиратися так, щоб була можливість оцінити особливості функціонування системи в часі й порівняти її з іншими системами.

Для детального вивчення продукційного процесу в біосистемі необхідно одержати інформацію в масштабі часу (доба, місяць або рік), характерному для індивідуального існування системи та її основних компонентів. Для видів із коротким життєвим циклом (1–2 роки) з метою порівняння найзручніше використовувати як основну одиницю часу добу. Оскільки продукція вимірюється або обчислюється за певний період часу, що беруть за одиницю, вона може одночасно розглядатися і як швидкість продукції (швидкість продукування). Хоча ці визначення можна розглядати як синоніми, але у ряді випадків, наприклад коли вивчається залежність місячної продукції від мінливості добової, зручніше користуватися поняттям швидкості продукції.

Крім тимчасових, продукція має також просторові межі. Вона оцінюється для біосистем або в природних межах, або з розрахунку на одиницю простору (об'єму або площі). Так вивчають продукцію популяцій у їх ареалах, співтовариств у межах їх біотопів, на квадратному метрі поверхні, в кубометрі води.

Питома продукція (С) – продукція за одиницю часу в перерахунку на одиницю біомаси (В) продукуючої біосистеми. Причому розрахунок питомої продукції проводиться обов'язково на одиницю середньої біомаси. Залежно від обраної одиниці часу одержують годинну, добову, місячну питому продукцію. Найбільш прийнятним порівняльним показником є добова питома продукція, причому порівнюватися можуть лише системи одного типу: особини з особинами, популяції з популяціями.

Величина продукції – функція питомої продукції та біомаси системи. Знання динаміки біомаси і характеру змін питомої продукції дозволяє легко оцінити продукцію. Вивчення закономірностей, що визначають рівень питомої продукції систем, є ключем до вирішення багатьох питань продуктивності.

Згідно із загальним визначенням продукції ця величина визначається таким чином:

$$P_t = B_2 - B_1 + B_e, \quad (2.1)$$

де B_1 , B_2 – початкова та кінцева біомаси; B_e – сумарна елімінація біомаси; P_t – продукція популяції за час t .

Диференціюючи це рівняння, перейдемо до опису швидкості процесів:

$$\frac{\partial P_t}{\partial t} = \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial B_e}{\partial t}. \quad (2.2)$$

Таким чином, швидкість утворення продукції дорівнює сумі швидкостей зміни біомаси та елімінації. Продукція за період часу $(t_2 - t_1)$ чисельно дорівнює певному інтегралу цього рівняння:

$$P_t = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt. \quad (2.3)$$

Питому продукцію розраховують за формулою

$$C_t = \frac{P_t}{B}. \quad (2.4)$$

За рівнянням можна розрахувати питому продукцію для всього досліджуваного періоду, або для будь-якої його частини. Для порівняння краще визначати добову продукцію, для чого одержану величину потрібно розділити на число діб t , при цьому C матиме розмірність доби⁻¹:

$$C = \frac{P_t}{B \cdot t}. \quad (2.5)$$

Знання законів мінливості C дає можливість більш повно порівнювати продуктивність популяцій і прогнозувати продукцію. Якщо рівень C зберігається протягом певного періоду часу, то при порівнянній біомасі популяція з більшою біомасою дасть більше продукції. Отже, проводити оцінку продукції можна лише за біомасою, користуючись середніми значеннями C , яка повинна обчислюватися як відношення продукції до середньої біомаси.

Як приклад визначимо, яка площа культурного біоценозу з біопродуктивністю 800 г/рік сухої біомаси з кожного м² зможе прогодувати 1 людину масою 70 кг (з них 63 % становить вода). Для розв'язання цієї задачі спочатку побудуємо ланцюг живлення культурного біоценозу:

рослини (конюшина) → консументи I порядку (теля) → людина.

Потім визначимо частку сухої органічної речовини в тілі людини:

$$70 \text{ кг} \cdot (100 \% - 63 \%) / 100 \% = 25,9 \text{ кг}.$$

Ураховуючи, що в середньому передається на кожній ланці 10 % енергії, тоді щоб прогодуватися людині масою 25,9 кг сухої речовини потрібно 259 кг м'яса або 2590 кг конюшини площею біоценозу $2590 \text{ кг} / 0,8 \text{ кг/ м}^2 = 3237,5 \text{ м}^2$.

2.4 Екологія популяцій

Першою надорганізмовою біологічною системою є популяція. Термін «популяція» запозичений з демографії В. Югансеном у 1905 році для позначення групи особин одного виду, а інколи навіть однорідної сукупності особин різних видів. Таким чином, терміном «популяція» почали позначати не довільно обрану групу особин, а реально існуючу частину виду, що

відрізняється від сусідніх угруповань певними груповими біологічними ознаками. **Популяція** – це не випадкове і тимчасове, а тривале у часі й просторі угруповання особин одного виду, пов'язаних більш тісними родинними зв'язками і більш схожими між собою, ніж із представниками інших подібних угруповань. Отже, популяція – це сукупність особин певного виду, які здатні до вільного схрещування, населяють певний простір протягом багатьох поколінь і відокремлені від інших подібних угруповань.

Найбільш істотними ознаками популяцій є динаміка чисельності особин, співвідношення статей, віковий склад, територіальна структура і щільність заселення.

Узагальнюючи ознаки, можна зробити висновок, що кожна популяція має певні властиві їй темп і ритм обміну речовин в екосистемі. Вона може складатися з дрібніших угруповань, мікропопуляцій, колоній, зграй тощо, але такі угруповання нестійкі в часі й періодично включаються у загальний популяційний ритм. Отже, кожен вид має структуру, властиву лише йому. Вивчення популяційної структури виду має надзвичайно важливе теоретичне і практичне значення у ході здійснення заходів із раціонального природокористування. Важливо знати загальнобіологічні властивості виду, а також як впливає зовнішнє середовище на його формування. Популяція завжди перебуває під впливом багатьох факторів, і реакція на конкретний фактор залежить від взаємного розташування або спільної їх дії. Зокрема розглянемо, які фактори впливають на чисельність популяції, загальну кількість особин на даній території або в даному обсязі, що належать до однієї популяції. Повінь, пожежа, град, раптові морози, посуха, бурелом, надмірне застосування хімічних препаратів, реконструкція ландшафту, заселення нових видів хижаків, паразитів, епідемії – все це може призвести до повної її загибелі. Загибель або різке скорочення чисельності популяції, як правило, викликає ланцюгову реакцію в біоценозі та може спричинити коливання чисельності популяцій інших видів. Аналіз причин загибелі окремих видів свідчить про те, що зникнення одного виду рослин викликає загибель від 3–4 до 20–30 і навіть більше видів тварин.

Популяції багатьох видів досить уразливі не лише в місцях розмноження. Неприятливі умови на шляхах міграцій і в місцях зимівлі можуть поставити популяцію на грань загибелі. Отже, створення сприятливих умов у районах розмноження, обмеження факторів смертності ще не забезпечує збільшення чисельності видів, якщо не усунути загрози масової загибелі особин під час сезонних міграцій.

При зниженні чисельності зменшуються можливості обміну генетичною інформацією, утворюються окремі замкнені кільця близьких родичів, що призводить до зниження життєздатності молоді.

Зростає тиск конкурентів. У видів, яким притаманний колоніальний або груповий спосіб життя, значно знижуються можливості опору ворогам. Але одночасно зі зниженням щільності звільняється життєвий простір, відтворюється кормова база, увага хижаків переключається на інші об'єкти або кількість їх також різко зменшується.

Ставлення людини до того чи іншого виду визначається його демографічним станом. Тому пізнання закономірностей динаміки чисельності популяцій має першочергове значення. У кожний конкретний момент будь-яка популяція складається з певної кількості особин, але ця величина досить динамічна. Часто вона залежить від народжуваності й смертності у популяції.

Одночасно рухаються два потоки особин: один «наповнює» басейн популяції, другий «витікає» з нього. Потужності цих потоків досить рідко збігаються в часі, тому рівень популяційного басейну весь час коливається. Завдання популяційної екології і полягає саме в складанні прогнозу цих коливань.

Відтворення потомства – головне джерело поповнення популяції. У рослин – це кількість насіння, у риб – ікринок, у птахів – яєць та ін.

Швидкість зростання популяції визначається біотичним потенціалом. Біотичний потенціал – це кількість нащадків, яку здатна дати одна особина або одна пара. В одних видів біотичний потенціал може перевищувати мільярд, у інших – обмежуватися кількома десятками.

Види, що живуть у сприятливих умовах і добре пристосовані до виживання, мають низький біотичний потенціал і, навпаки, висока смертність зумовлює надзвичайну плодючість. Наприклад, риби, які не піклуються про потомство, відкладають тисячі й навіть мільйони ікринок. Місячний біотичний потенціал риби – до 3 млрд, а в акул, які народжують живих малят, він обмежений десятками. Більшість шкідливих комах здатні плодити від кількох сотень до тисячі особин.

Для стабілізації популяцій достатньо, щоб до періоду розмноження доживало стільки нащадків, скільки було батьків. Якщо відсоток виживання вищий за відсоток рівноваги, популяція зростає, якщо нижчий – зменшується. Це необхідно враховувати як під час боротьби зі шкідниками, так і під час охорони зникаючих видів.

Характерною особливістю популяцій є система взаємовідносин між її членами. Закономірності поведінки організмів вивчає наука «етологія». Залежно від способу життя виду форми спільного існування особин у популяції надзвичайно різноманітні. Розрізняють одинокий спосіб життя, при якому особини популяції незалежні й відокремлені одна від одної, але лише тимчасово, на певних стадіях життєвого циклу. Повністю ізольоване існування організмів у природі не трапляється, оскільки було б неможливим здійснення їхньої основної життєвої функції – розмноження. У видів з ізольованим способом життя часто утворюються тимчасові угруповання особин у місцях зимівлі (сонечка, жужелиці) або в період, який передує розмноженню.

При сімейному способі життя помітно посилюються зв'язки і взаємовідносини між батьками і їхнім потомством: піклування про відкладені яйця, пташенят, їх охорона. Розрізняють сім'ї батьківського, материнського і змішаного типів. При сімейному способі життя помітно виявляється територіальна поведінка тварин, коли різноманітними сигналами, маркуванням тощо забезпечується володіння ділянкою, яка необхідна для вирощування потомства. В основі формування більш-менш великих об'єднань тварин (зграя,

стадо, колонія) лежить ускладнення поведінки, а отже, і зв'язків у популяції.

Зграя – це тимчасове об'єднання тварин, які виявляють біологічно корисну організованість дій (для захисту від ворогів, добування їжі, міграції і т. ін.). Найбільше зграї поширені серед риб, птахів, рідше – у ссавців (собачі зграї).

Стадо – тривале або постійне об'єднання тварин, у якому здійснюються всі основні функції життя виду: добування корму, захист від хижаків, міграції, розмноження, виховання молодняка. Основу групової поведінки в стаді становлять взаємовідносини домінування – підпорядкування, що базуються на індивідуальних відмінностях між особинами. Для стада характерна наявність тимчасового або постійного лідера, який зумовлює поведінку інших особин і часто стада в цілому.

Колонія – це групове поселення осілих тварин. Колонії можуть існувати довго або виникати на період розмноження (наприклад, чайки, мідії, ластівки, граки, альбатроси, терміти, бджоли).

Розрізняють два типи росту популяцій – J-подібний і S-подібний.

Якщо чисельність особин зростає з відносно сталою швидкістю, то ми маємо типовий **J-подібний ріст**. Це можна записати таким чином:

$$dN/dt = rN, \quad (2.6)$$

звідки

$$r = dN/Ndt. \quad (2.7)$$

$$N_t = N_{t-1}e^{rt}. \quad (2.8)$$

Якщо $r = \text{const}$, то ріст відбувається за експоненціальним законом.

Якщо величини чисельності наводяться в логарифмічному масштабі, то графік експоненціального зростання набирає вигляду прямої лінії. Тому інколи експоненціальне зростання називають *логарифмічним*.

Рівняння експоненціального зростання в логарифмічній формі має вигляд

$$\ln N_t = \ln N_0 + rt,$$

тобто є рівнянням прямої, а коефіцієнт r характеризує кут нахилу її до осей.

Біологічний сенс коефіцієнта r досить цікавий. По суті, це біотичний потенціал популяції – миттєва швидкість зміни чисельності чи густини популяції. Його можна розглядати як різницю між миттєвою народжуваністю та миттєвою смертністю:

$$r = b - d, \quad (2.9)$$

де r – біотичний потенціал популяції; b – рівень народжуваності; d – рівень смертності.

Для опису **S- подібного** типу зростання можна використовувати багато рівнянь, але найбільш популярним виявилось найпростіше з них – так зване логістичне рівняння.

В основу логістичної моделі покладене припущення про лінійне зниження швидкості питомого зростання $r_a = dN/Ndt$ у міру зростання чисельності N , причому ця швидкість дорівнює нулю при досягненні деякої граничної для даного середовища чисельності K . Тобто якщо $N = K$, тоді $r_a = 0$.

Логістичне рівняння в диференціальному вигляді

$$dN/dt = r_{\max}N (K - N)/K;$$

де r_{\max} – константа експоненціального зростання, яке мало би спостерігатися в початковий момент зростання чисельності; K – верхня асимптота S-подібного зростання. Біологічний сенс її можна ототожнити з поняттям «ємності середовища» для популяції. *Ємність середовища* (для популяції) – це максимальна щільність популяції, яка може підтримуватися ресурсами даної екосистеми.

В інтегральній формі логістичне рівняння має вигляд

$$N_t = \frac{K}{1 + e^{a - r_{\max}t}}, \quad (2.10)$$

де N_t – чисельність популяції у момент часу t ; e – основа натурального логарифму; K – верхня асимптота S-подібного зростання, або ємність середовища.

Зауважимо, що термін «логістична крива» був запропонований П. Ф. Ферхюльстом без будь-яких пояснень. Французькою мовою того часу слово «*logistique*» означало «мистецтво обчислення».

У загальному вигляді співвідношення процесів, що визначають динаміку чисельності популяції, можна записати таким чином.

Зміна чисельності популяції = (народження особин + імміграція) – (загибель особин + еміграція).

Основні типи динаміки чисельності популяцій можна поділити на дві групи: рівноважні й опортуністичні. Перші – притаманні популяціям, щільність яких не має різких перепадів, вона, як правило, коливається в певних межах навколо якогось середнього значення. Опортуністичні популяції характеризуються злетами й падіннями чисельності. Причому графіки динаміки їх чисельності чи щільності часто нагадують електрокардіограму або енцефалограму.

Проблема життєвих, або, як їх інколи називають, екологоценотичних стратегій вже давно привертала увагу фахівців-фітоценологів. Так, ще в 30-х роках Л. Г. Раменський (1938) запропонував розрізняти три основні типи рослин, названі ним віолентами, патієнтами й експлерантами, що розрізняються стратегіями виживання.

Віоленти (від латинського *violentia* – схильність до насилля, або силовики), – це види, що часто визначають облік угруповання, здатні пригнічувати конкурентів за рахунок більш інтенсивного росту і більш повного використання території. Зазвичай у віолентів потужна коренева система і добре розвинена надземна частина. Типові віоленти – це багато дерев (особливо ті, що утворюють корінні ліси), також трав'янисті рослини, що домінують, або інші

угруповання, наприклад мох сфагнум чи очерет.

Патієнти (від латинського *patientia* – терпіння, витривалість), або терплячі – це види, здатні виживати в несприятливих умовах, де більшість інших видів існувати просто не здатні, наприклад за умов недостатнього освітлення, вологи, мінеральних речовин тощо. До патієнтів належить багато рослин, які вважаються посухостійкими, тінелюбними чи навіть солелюбними. Хоч експериментально показано, що багато з них (хоч і не всі) за відсутності конкурентів можуть існувати і добре почуватися в умовах більшої вологості, освітленості тощо.

Експлеранти (від латинського *explere* – наповнювати, виповнювати), або наповнювачі – це види, що швидко розмножуються і швидко розселяються, з'являються там, де порушені корінні угруповання. До типових експлерантів належать рослини, що поселяються на вирубках і згарищах, наприклад іван-чай (*Chamaenericon angustifolium*) або осика (*Populus tremula*).

Однак, як справедливо зауважує О. М. Гіляров, належність певного виду рослин до віолентів, патієнтів чи експлерантів не може ґрунтуватися лише на його аутокологічних характеристиках. Певний тип еколого-ценотичної стратегії відображує також положення виду в угрупованні. Саме тому один і той самий вид у різних угрупованнях може належати до різних еколого-ценотичних типів. Так, сосна (*Pinus sylvestris*) є типовим віолентом у сосновому (бору), а на болоті є патієнтом.

Природно, що кожному виду притаманна певна ступінь «віолентності», «патієнтності» та «експлерантності». Схематично систему Раменського-Грайма можна зобразити у вигляді трикутника, кути якого зайняті крайніми типами, а точки, що відповідають положенню в цій системі тих чи інших видів у певних ценозах, займають на площині певне місце в межах цього трикутника.

Хоч система Раменського-Грайма розроблена для рослин, її можна ефективно використовувати і для будь-яких живих організмів.

2.5 Екологічні фактори та їх вплив на життєдіяльність організмів

2.5.1 Поняття про екологічні фактори

Як уже зазначалося, безперервність життя на Землі забезпечується унікальною здатністю живих істот створювати і підтримувати внутрішнє середовище, здійснювати обмін речовин із навколишнім середовищем і передавати ці властивості за спадковістю своїм нащадкам.

Середовище – одне з основних екологічних понять, під ним ми розуміємо комплекс природних тіл і явищ, з якими організм знаходиться у прямих або опосередкованих зв'язках.

Внутрішнє середовище будь-якої істоти якісно відрізняється від зовнішнього середовища. Якісна самостійність внутрішнього середовища організму регулюється механізмами гомеостазу.

Гомеостаз організму – це стан внутрішньої динамічної рівноваги, який забезпечується взаємодією складних процесів регуляції та координації

біохімічних реакцій за принципом зворотного зв'язку. Гомеостаз може здійснюватися лише за певних умов навколишнього середовища: поза межами цих умов автономність організму порушується і він гине, а його внутрішнє середовище ототожнюється із зовнішнім. Сили, що діють з боку навколишнього середовища, називають факторами.

Організм як елементарна частинка живого світу в середовищі свого існування знаходиться під одночасним впливом кліматичних, біотичних факторів, які разом називаються екологічними.

Екологічний фактор – це будь-який елемент середовища, який здатний прямо чи опосередковано впливати на живі організми, хоча б протягом однієї фази їх розвитку.

Фактори навколишнього середовища забезпечують існування в просторі та часі. Засвоєння і використання факторів здійснюється організмом через адаптації.

Адаптації – це пристосування або засоби, за допомогою яких організм здійснює взаємодію із середовищем для підтримання гомеостазу і забезпечує безперервність існування в часі через потомство. Залежно від кількості й сили дії один і той самий фактор може мати протилежне значення для організму. Наприклад, як підвищення, так і зниження температури, до якого організм не може пристосуватися, призводить до його загибелі. Адаптивні можливості різних організмів розраховані на різне значення фактора. Так, більшість прісноводних риб гине, потрапивши в морську воду, а морські риби гинуть при зниженні солоності води.

Наявність того чи іншого фактора може бути життєво необхідною умовою для одних видів і не мати ніякого значення для інших. Наприклад, світло для зелених рослин – це джерело енергії, а для різних мешканців ґрунту – зайвий або й небезпечний фактор.

Залежно від сили дії того чи іншого фактора умови існування особин виду можуть бути оптимальними, неоптимальними або відповідати проміжному рівню.

Здатність організму витримувати певну амплітуду коливання фактора називають екологічною валентністю. Для життя організмів велике значення має не лише абсолютна величина фактора, а й швидкість його зміни.

За екологічною валентністю організми поділяються на *еврибіонтні* з широкими пристосувальними можливостями (сірий пацюк, горобець, кімнатна муха) та *стенобіонтні*, які можуть існувати лише у відносно сталих умовах (байбак степовий, журавель степовий, качкодзьоб). Реакція організму і його адаптивні можливості відповідно до показників фактора залежать від поєднання дії різних факторів. Мряка та вітер при плюсовій температурі, мороз при ясній та тихій погоді сприймаються по-різному. У цьому разі реакція організму на температурний фактор залежить від супровідної дії вологості й вітру, тобто від спільної дії факторів.

Для нормального існування організму необхідний певний набір факторів. Якщо хоч один із життєво необхідних факторів відсутній або дія його недостатня, організм не може існувати, нормально розвиватись і давати по-

томство. Це явище називають законом мінімуму, або законом Лібіха, а фактор, дії якого недостатні для нормального життя, – лімітуючим.

Організми, як свідчать численні дослідження, не є рабами фізичних умов середовища. Вони пристосовуються самі й змінюють їх так, що можуть послабити лімітуючий вплив температури, світла, води та інших факторів. Такий вплив організмів дуже відчутний і ефективний на рівні угруповання. Зв'язок організму із середовищем має характер тривалий і нерозривний, і організм не може існувати поза середовищем. На Землі розрізняють чотири типи життєвого середовища: водне, наземне (повітряне), ґрунтове та тіло іншого організму.

2.5.2 Класифікація екологічних факторів та їх вплив на живі організми

Екологічні фактори можуть бути об'єднані за природою їх походження або залежно від їх динаміки та дії на організм. За характером походження розрізняють:

- абіотичні фактори, що зумовлюються дією неживої природи і поділяються на кліматичні (температура, світло, сонячна радіація, вода, вітер, кислотність, солоність, вогонь, опади тощо), орографічні (рельєф, нахил схилу, експозиція) та геологічні;
- біотичні – дія одних організмів на інші, включаючи всі взаємовідносини між ними.
- антропогенні фактори – вплив на живу природу життєдіяльності людини.

Коротко розглянемо групи факторів, об'єднаних характером походження.

Серед **абіотичних** особливо виділяється група кліматичних факторів. Дія багатьох абіотичних факторів, включаючи рельєф, вітер, тип ґрунту тощо виявляється опосередковано – через температуру і вологість. Унаслідок цього на невеликій ділянці земної поверхні кліматичні умови можуть істотно відрізнятися від середніх для даного регіону в цілому. Температура і кількість опадів (дощу або снігу) визначають розташування на земній поверхні основних природних зон. Різноманітність природних комплексів часто визначається особливостями ґрунтів, від яких залежить надходження вологи. Один і той самий фактор щодо різних організмів може відігравати різноманітну роль і завдяки цьому переміщуватись у класифікації з однією групи до іншої. Яскравим прикладом цього явища може бути світло. Для рослин воно є джерелом енергії під час фотосинтезу, для багатьох наземних тварин світло може бути основним фактором. Для ґрунтових організмів або мешканців печер, як і для організмів, що живуть у глибинах морів, цей фактор не має значення, оскільки протягом всього життя ці організми не зустрічаються з його дією.

Біотичні фактори. Це форми впливу живих організмів один на одного. Основною формою такого впливу в більшості випадків є харчові зв'язки, на базі яких формуються складні ланцюги та ланки живлення. Крім харчових зв'язків, в угрупованнях рослинних і тваринних організмів виникають

просторові зв'язки. Все це є підставою для формування біотичних комплексів. Виділяють різні форми біотичних відносин, які можуть бути найрізноманітнішими – від дуже сприятливих до різко негативних.

Між представниками різних видів організмів, що населяють екосистему, крім нейтральних, можуть існувати такі види зв'язків:

- *конкуренція* – боротьба між представниками різних видів за їжу, повітря, воду, світло, життєвий простір; боротьба тим жорстокіша, чим більш споріднені й близькі за вимогами до умов середовища види організмів, що конкурують;

- *мутуалізм* – представники двох видів організмів своєю життєдіяльністю сприяють один одному, наприклад комахи, збираючи нектар, запилюють квіти; мурашки, опікаючи попелиць, живляться їхніми солодкими виділеннями;

- *коменсалізм* – коли від співжиття представників двох видів вирає один вид, не завдаючи шкоди іншому, наприклад рибка-причепа знаходить захист і живиться біля акул (мутуалізм і коменсалізм називають ще симбіозом);

- *паразитизм* – одні істоти живляться за рахунок споживання живої тканини господарів, наприклад кліщі, блощиці, воші, глисти, омела, деякі гриби тощо;

- *хижацтво* – одні організми вбивають інших і живляться ними;

- *алелопатія* – одні організми виділяють речовини, шкідливі для інших, наприклад фітонциди, що виділяються деякими вищими рослинами, пригнічують життєдіяльність мікроорганізмів; токсини, що виділяються під час «цвітіння» води у водоймищах, отруйні для риби та інших тварин.

Антропогенні фактори зумовлені діяльністю людини, вплив її на природу може бути як свідомим, так і стихійним, випадковим. Користуючись знанням законів розвитку природи, людина свідомо виводить нові високопродуктивні сорти рослин, породи тварин, усуває шкідливі види, творить нові природні комплекси. Процес взаємодії людини з природою почався з моменту появи людини на Землі і весь час зростає.

У 1958 р. А. С. Мончадський запропонував класифікацію факторів за характером їхньої дії.

Стабільні фактори – ті, що не змінюються протягом тривалого часу (земне тяжіння, сонячна стала, склад атмосфери та інші). Вони зумовлюють загальні пристосувальні властивості організмів, визначають належність їх до мешканців певного середовища планети Земля.

Змінні фактори, які, у свою чергу, поділяються на закономірно змінні та випадково змінні. До закономірно змінних належить періодичність добових і сезонних змін. Ці фактори зумовлюють певну циклічність у житті організмів (міграції, сплячку, добову активність та інші періодичні явища і життєві ритми). Випадково змінні фактори об'єднують біотичні, абіотичні та антропогенні фактори, дія яких повторюється без певної періодичності (коливання температури, дощ, вітер, град, епідемії, вплив хижаків та інші).

До середини ХХ століття людина, за визначенням В. І. Вернадського,

стала найбільш могутньою геологічною силою на нашій планеті. Різко зріс вплив людської діяльності на довкілля, що призвело до порушення природних зв'язків. Так, унаслідок вирубування лісів пустелі різко пришвидшили свій наступ на зелені зони. Діяльність людини змінює умови навколишнього середовища, а середовище, у свою чергу, впливає на життя, здоров'я та життєдіяльність як окремої людини, так і людської популяції загалом.

Екологічні фактори діють на організм різними шляхами. У найпростішому випадку спостерігається прямий вплив. Так, сонячне проміння освітлює ящірку, яка лежить нерухомо, і тіло її нагрівається. З іншого боку, дуже часто екологічні фактори впливають на організм опосередковано, через безліч проміжних ланок. Наприклад, поєднання високої температури повітря з низькою вологістю і відсутністю дощів призводить до посухи, іноді це набуває катастрофічного характеру (вигоряє рослинність, трав'яні мігрують або гинуть).

Життя організмів будь-якої популяції в екосистемі господарсько освоєних регіонів проходить під дією множини екологічних факторів біотичної, абіотичної та антропогенної природи (табл. 2.3). Хоча кількість екофакторів є потенційно безмежною, за ступенем впливу на організми та їх угруповання вони нерівносильні. Тому в екосистемах різного типу можна виділити **найістотніші (імперативні) фактори**. Крім природних екзогенних факторів, до них належать різні форми антропогенного впливу, які теж піддаються диференціації за значущістю наслідків. При визначенні антропогенного впливу необхідно підходити системно, враховуючи взаємодію екологічних факторів при їх сумісній дії чи накладанні дії одного фактора на дію іншого, при якому можливі інші ефекти, ніж при окремому впливі цих факторів, а саме – ефекти антагонізму, синергізму чи адитивні (сумативні) ефекти. Наприклад, в умовах аеротехногенного забруднення атмосфери можливі такі варіанти синергізму негативних факторів, небезпечних для лісових екосистем: промислового забруднення і несприятливих природних чинників, взаємодія кількох фітотоксикантів між собою і з токсичними компонентами атмосфери: $O_3+NH_4^+$; $SO_2+O_3+NO_2$; SO_2+O_3 ; SO_2+NO_2 . Ступінь дії на рослини залежить також від агрегатного стану фітотоксикантів. Наприклад, кислі гази SO_2 та NO_x за високої вологості атмосферного повітря переходять у форму аерозолів відповідних соляної та азотної кислот, які значно небезпечніші для природних екосистем не лише за хімічною активністю, а й за більшою здатністю осідання у вигляді роси на поверхнях структурних компонентів природних екосистем, особливо за локалізації токсичних капель на тканинах асиміляційного апарату, що в цілому значно збільшує вплив забруднення атмосфери на біоту.

Тому для встановлення причинно-наслідкових зв'язків під час вивчення змін екосистем доцільно враховувати:

- диференціацію екофакторів за їх класифікаційними ознаками (табл. 2.3);
- характер часової та просторової динаміки екофакторів;
- ступінь антропогенного впливу на природні імперативні фактори (під час вивчення функцій відгуку в екологічному просторі);

- лімітуючі фактори та взаємодію факторів: ефекти синергізму, сумачії, нейтралізації.

Під час вирішення цих завдань методичними проблемами є:

- обґрунтований вибір сукупності діагностичних ознак;
- приведення окремих методик до єдиної методологічної бази (за причин регіональних, методичних чи інших особливостей у діагностуванні антропо-техногенних змін отримують суперечливі результати);
- розроблення алгоритму визначення узагальнених показників;
- встановлення причинно-наслідкових зв'язків.

Таблиця 2.3 – Класифікація екологічних факторів за М. Ф. Реймерсом

За часом	За періодичністю	За черговістю виникнення
Еволюційний	Періодичний	Первинний
Історичний	Неперіодичний	Вторинний
Діючий		
За походженням	За середовищем виникнення	За характером
Космічний	Атмосферний	Інформаційний
Абіотичний	Водний (вологості)	Речовинно-енергетичний
Біогенний	Геоморфологічний	Фізичний
Біотичний	Едафічний	Геофізичний
Біологічний	Фізіологічний	Термічний
Природно-антропогенний	Генетичний	Хімічний
Антропогенний (техногенний)	Популяційний	Солоності
Антропний (піклування)	Біоценотичний	Кислотності
	Екосистемний	Біогенний (біотичний)
За об'єктом впливу	Біосферний	Комплексний
Індивідуальний		Системоутворювальний
Груповий	За ступенем впливу	Екологічний
Етологічний	Летальний	Географічний
Соціально-психологічний	Екстремальний	Еволюції
Соціальний	Обмежувальний	Кліматичний (світла, опадів)
Соціально-економічний	Піклувальний	
Видовий (у т. ч. людський)	Мутагенний	За спектром впливу
	Тератогенний	Вибірковий
		Загальної дії

Оцінюючи ступінь загрози чи іншої екологічної ситуації, необхідно визначити, як та наскільки негативні чинники впливають на природні імперативні фактори. За В. Д. Федоровим та ін., у наземних екосистемах істотними є інтенсивність сонячної радіації, температура та вологість повітря, інтенсивність атмосферних опадів, швидкість вітру, швидкість занесення спор, насіння та інших зародків організмів або надходження дорослих особин різних видів з інших екосистем. Ендогенними імперативними факторами в наземних екосистемах є такі властивості середовища:

1) мікрометеорологічні – освітленість, температура та вологість приземного шару повітря, вміст у ньому CO₂;

2) ґрунтові – температура, вологість, аерація ґрунту, фізико-механічні властивості, хімічний склад, вміст гумусу, доступність елементів мінерального живлення, окисно-відновний потенціал;

3) біотичні – щільність популяцій різних видів, їх віковий і статевий склади, морфологічні, фізіологічні та поведінкові характеристики.

У водних екосистемах провідними екзогенними факторами є інтенсивність сонячної радіації, швидкість плину, надходження розчиненої і зваженої речовини, приплив організмів. Визначальними ендогенними факторами в них виявляються:

1) властивості активного шару повітря над водною поверхнею (температура, швидкість вітру);

2) властивості водної товщі (освітленість, прозорість (мутність), температура, солоність, вміст O_2 та CO_2 , біогенних елементів, розчинених і зважених органічних речовин, кислотність, окисно-відновний потенціал);

3) властивості ґрунту – склад (механічний, хімічний і т. п.), характер опадів;

4) біотичні властивості (щільність популяцій, їх віковий і статевий склад, морфологічні, фізіологічні й поведінкові характеристики).

2.5.3 Види дії екологічних чинників на організми

Екологічні чинники чинять на живі організми дії різного роду. Вони можуть бути:

– подразниками, що сприяють появі пристосовних (адаптивних) фізіологічних і біохімічних змін (зимівля, фотоперіодизм);

– обмежувачами, що змінюють географічне поширення організмів через неможливість існування в даних умовах;

– модифікаторами, що викликають морфологічні й анатомічні зміни організмів;

– сигналами, що свідчать про зміни інших чинників середовища.

Чинники середовища впливають на організм не окремо, а в комплексі, відповідно, будь-яка реакція організму є багатофакторно обумовленою. При цьому інтегральний вплив чинників не дорівнює сумі впливів окремих чинників, оскільки між ними відбуваються різного роду взаємодії, які можна підрозділити на чотири основні типи: монодомінантність, синергізм, антагонізм, провакаційність.

Монодомінантність – один із чинників пригнічує дію інших і його величина має визначальне значення для організму. Так, повна відсутність, або знаходження в ґрунті елементів мінерального живлення в різкій недостатності або надлишку перешкоджають нормальному засвоєнню рослинами інших елементів.

Синергізм – взаємне посилення декількох чинників, обумовлене позитивним зворотним зв'язком. Наприклад, вологість ґрунту, вміст у ньому нітратів і освітленість при поліпшенні забезпечення будь-яким із них підвищують ефект дії двох інших для активного приросту біомаси продуцентів.

Прикладом адитивності може бути сумарна доза поглиненої організмом із різних джерел іонізуючої радіації. Холод зазвичай підсилює вплив голодування, а тепло його послаблює, так само як і достаток їжі послаблює негативний вплив низьких температур.

Антагонізм – взаємне гасіння декількох чинників, обумовлене зворотним негативним зв'язком: збільшення популяції сарани сприяє зменшенню харчових ресурсів і її популяція скорочується.

Провокаційність – поєднання позитивних і негативних для організму дій, при цьому вплив других посилений впливом перших. Так, чим раніше настає відлига, тим сильніше рослини страждають від подальших заморозків.

Вплив чинників також залежить від природи і поточного стану організму, тому вони неоднаково діють як на різні види, так і на один організм на різних етапах онтогенезу: низька вологість згубна для гідрофітів, але нешкідлива для ксерофітів; низькі температури, що без шкоди переносять дорослі хвойні помірного поясу, небезпечні для молодих рослин.

Чинники можуть частково заміщати один одного: при ослабленні освітленості інтенсивність фотосинтезу не зміниться, якщо збільшити концентрацію вуглекислого газу в повітрі, що звичайно і відбувається в теплицях.

Результат дії чинників залежить від тривалості й повторюваності дії їх *екстремальних значень* упродовж усього життя організму і його нащадків: нетривалі дії можуть і не мати ніяких наслідків, тоді як тривалі через механізм природного відбору приводять до якісних змін. Крім того, необхідно пам'ятати, що в екосистемі для різних організмів дія одного і того самого фактора може відрізнитися – для одних організмів дія фактора може бути оптимальною, а для інших екстремальною. Те саме стосується й антропогенного впливу, який може стимулювати життєдіяльність одних організмів, але для рівноваги екосистеми ця дія може бути негативною. Наприклад, потрапляння біогенних елементів із поверхневим стоком з агроекосистем або зі стічними водами у водойму може привести до активного розвитку водоростей, приросту та накопичення біомаси, але для екосистеми такий вплив може призвести до ефтрофікації і, як наслідок, зменшення кисню і пригнічення аеробної біоти.

Організмам, особливо тим, що ведуть прикріпленний, як рослини, або малорухливий спосіб життя, властива **пластичність** – здатність існувати в більш-менш широких діапазонах значень екологічних чинників. Проте при різних значеннях чинника організм поводить себе неоднаково.

Відповідно виділяють таке його значення, при якому організм знаходитиметься в найбільш комфортному стані: швидко рости, розмножуватися, проявляти конкурентні здібності. У міру збільшення або зменшення значення чинника щодо найбільш сприятливого організм починає відчувати пригнічення, що виявляється в ослабленні його життєвих функцій і при екстремальних значеннях чинника може призвести до загибелі.

Графічно подібна реакція організму на зміну значень чинника зображається у вигляді **кривої життєдіяльності** (екологічної кривої), при аналізі якої можна виділити такі зони (рис. 2.21):

- зона *оптимуму* – обмежує діапазон найбільш сприятливих значень чинника;
- зони *песимуму* (верхнього і нижнього) – діапазони значень чинника, в яких організм випробовує сильне пригнічення;
- зона *життєдіяльності* – діапазон значень чинника, в якому він активно проявляє свої життєві функції;
- зони *спокою* (верхнього і нижнього) – вкрай несприятливі значення чинника, при яких організм залишається живим, але переходить у стан спокою;
- зона *життя* – діапазон значень чинника, в якому організм залишається живим.

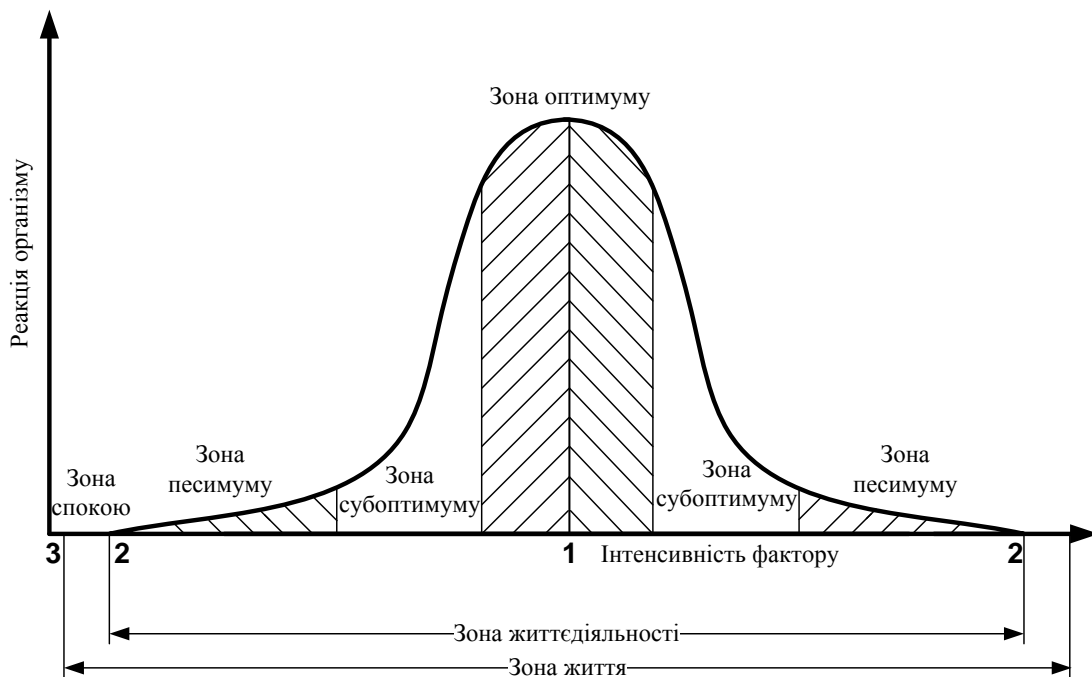


Рисунок 2.21 – Крива життєдіяльності багаторічної рослини: 1 – точка оптимуму, 2 – точки мінімуму і максимуму, 3 – летальні, або латентні, точки

За межами зони життя розташовуються летальні значення чинника, при яких організм не здатний існувати.

Значення екологічного чинника між його мінімальним (min) і максимальним (max) значеннями називається зоною толерантності. Часто використовують поняття «**екологічна валентність**» – діапазон коливань значень фактора, за яких організм здатний лишатися живим. Форми із широкою екологічною валентністю називаються *еврибіонтними*, з вузькою – *стенобіонтними* (*eurys* – широкий, *stenos* – вузький). Види, які відзначаються виключно широкою екологічною валентністю, а тому дуже поширені, називаються *убіквістами* (*ubique* – скрізь). У межах зони толерантності виділяють зону нормальної життєдіяльності – ті значення фактора, в межах яких організм (чи популяція) не лише виживає, а й здійснює всі притаманні даній системі функції (ріст, живлення, розмноження). За значень екологічного чинника, що виходять за межі зони нормальної життєдіяльності, проте

розміщені в межах зони толерантності, виділяють зони песимуму. В межах цих зон біосистема ще здатна існувати, проте не всі притаманні їй функції тут здійснюються (зазвичай популяції тут не характерне самовідтворення, організми часто не ростуть і не живляться). Кількісний діапазон екологічного чинника, що відповідає потребі організму і забезпечує найсприятливіші умови для його життєдіяльності, називають зоною оптимуму (від лат. *optimum* – найкраще).

Зміни, що відбуваються з організмом у межах діапазону пластичності, завжди є фенотипічними, при цьому в генотипі кодується лише міра можливих змін – **норма реакції**, яка і визначає ступінь пластичності організму.

На основі індивідуальної кривої життєдіяльності можна прогнозувати і видову. Проте, оскільки вид є складною надорганізмовою системою, що складається з безлічі популяцій, розселених по різних місцевостях з неоднаковими умовами середовища, при оцінці його екології користуються узагальненими даними не по окремих особинах, а по цілих популяціях. На градієнті чинника відкладаються узагальнені класи його значень, що представляють певні типи місцепроживань, а як екологічні реакції найчастіше розглядається **велика кількість** або **частота виду**, його зустрічаємість. При цьому необхідно говорити вже не про криву життєдіяльності, а про криву розподілу частот.

Потрібно відзначити, що картина залежності між інтенсивністю чинника та рівнем енергетичних витрат організму має вигляд, протилежний загальновідомій ілюстрації закону толерантності Шелфорда: за оптимального значення того чи іншого чинника витрати енергії на підтримання життєдіяльності організму мінімальні. А будь-яке відхилення значень чинника від оптимальних призводить до зростання енерговитрат (на підтримання гомеостазу чи енантіостазу) (рис. 2.22).

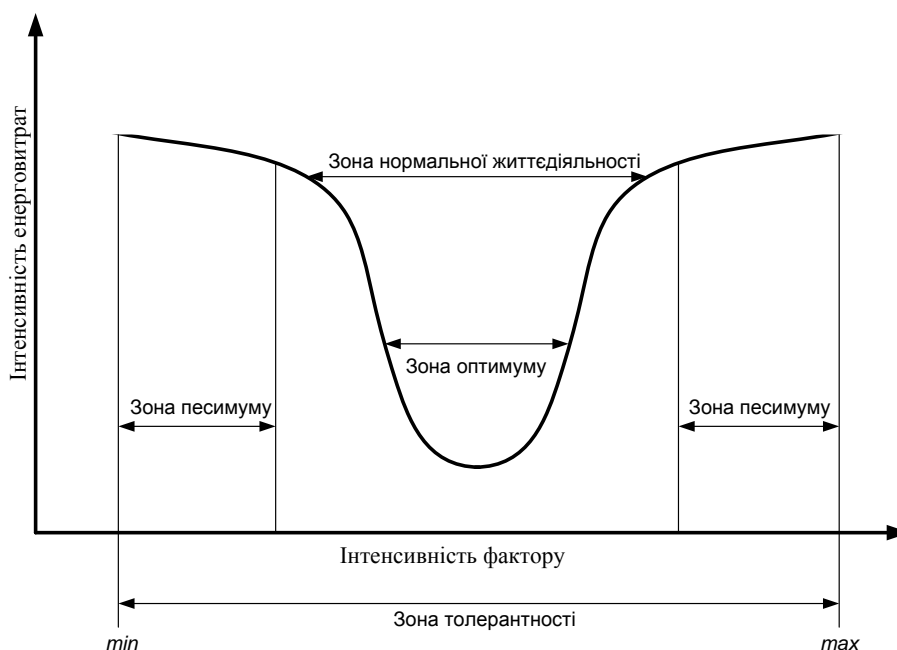


Рисунок 2.22 – Інтенсивність енерговитрат за різної інтенсивності фактора

За мінімізації енерговитрат на підтримання життєдіяльності уможлиблюється: ефективне використання доступних енергетичних ресурсів на ріст, розмноження та інші притаманні організму чи популяції функції, що й забезпечує процвітання даної біосистеми.

Для кількісної оцінки значення того чи іншого екологічного фактора в житті організму, популяції, угруповання чи екосистеми в цілому можна використати ранжування факторів за відносною силою їх впливу. При цьому найістотніший вплив чинить той фактор, мінімальне відносне відхилення якого викликає максимальні зміни в параметрах досліджуваної системи.

Як приклад розглянемо графік областей виживання й оптимуму метелика яблуневої плодожерки, який є небезпечним шкідником садів, а також визначимо, яка небезпека розмноження цього шкідника в районах з літніми температурами 18–25 °С і вологістю 70–90 %, та у районах з літніми температурами 20–35 °С і вологістю повітря 20–35 %.

На горизонтальній осі відкладемо значення вологості повітря (у %), на вертикальній – температури (у °С). Повна загибель лялечок яблуневої плодожерки настає в умовах, коли виникають такі поєднання вологості й температури: 10 °С і 100 %; 4 °С і 80 %, 15 °С і 40 %, 28 °С і 15 %, 36 °С і 55 %, 37 °С і 100 %.

Менше 10 % лялечок гине при виникненні поєднань: 20 °С і 85 %, 22 °С і 95 %, 27 °С і 55 %, 26 °С і 55 %, 22 °С і 70 %.

З'єднаємо замкненою кривою точки, відповідні кожному рівню виживання. На одержаному графіку бачимо (рис. 2.23), що зона оптимуму лялечок яблуневої плодожерки знаходиться всередині червоної області, тобто знаходиться в межах температур від 20 до 32 °С при вологості від 55 до 95 %.

У районах з літніми температурами 18–25 °С і вологістю 70–90 % розмноження цього шкідника проходитиме інтенсивно і зростатиме в міру збільшення температури до 25 °С (див. область на графіку ABCD).

У районах з літніми температурами 20–35 °С і вологістю повітря 20–35 % (див. область на графіку A'B'C'D') розмноження цього шкідника буде дуже слабким, оскільки за цих умов він на межі загибелі.

Цікаво відмітити на графіку, що значення одного фактора не є вирішальним для встановлення зони толерантності: при температурі 20 °С спостерігається зона оптимуму (при вологості 85 %), так і повна загибель лялечок (при вологості 32 %), що свідчить про монодомінантність вологості.

Як показує вивчення комплексного впливу екологічних факторів, при змінах екологічних факторів змінюється також і відносний вплив факторів на функцію відгуку, інтервали толерантності, положення зони оптимуму, масштаб і форма конкретних функцій відгуку на кожний з екологічних факторів. Усе це підкреслює необхідність вивчення залежностей функції відгуку від усієї сукупності факторів. Тому методичною основою факторіальної екології є комплексні підходи до вивчення взаємодії біосистем із середовищем при широкому використанні засобів багатфакторного експерименту й апарату багатовимірною математичного аналізу.

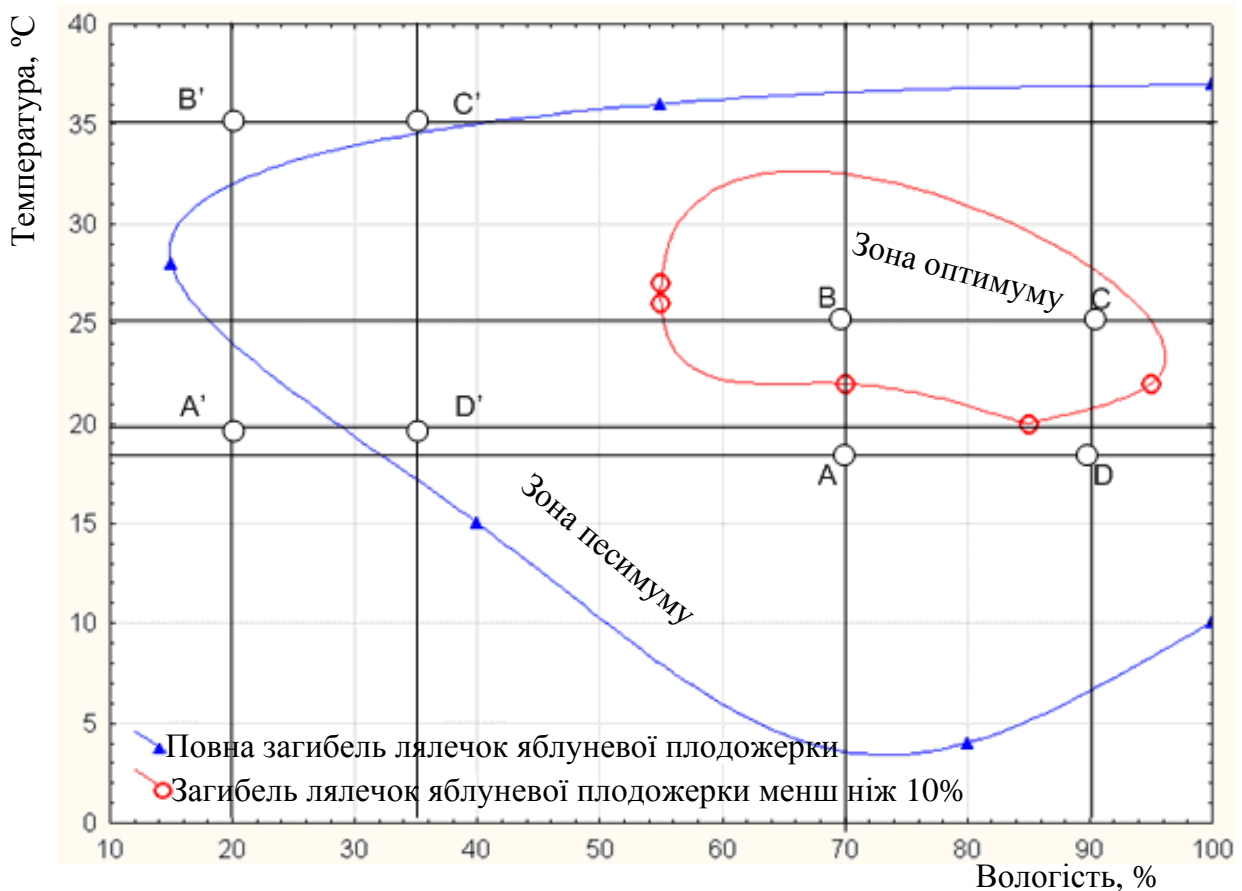


Рисунок 2.23 – Залежність виживання лялечок яблуневої плодожерки від температури та вологості

Щоб охарактеризувати безліч можливих комбінацій екологічних факторів, доцільно ввести поняття *простору екологічних факторів*.

Простором екологічних факторів назвемо евклідовий простір, координати якого зіставлені ранжованим екологічним фактором. Це можна записати у такому вигляді:

$$\xi = \{(x_1, x_2, \dots, x_n \dots)\}, \quad (2.1)$$

що означає, що множина ξ складається з можливих послідовностей вигляду $(x_1, x_2, \dots, x_n \dots)$.

Таким чином, кожній конкретній комбінації значень ЕФ відповідає точка екологічного простору ξ з координатами $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^* \dots)$.

Для ілюстрації розглянемо модельну екосистему, до складу якої входить експериментальна культура водоростей, що культивуються на живильному середовищі сталого складу, що містить усі необхідні для водоростей елементи в достатній кількості. Якщо варіювати в цьому експерименті концентрацією ортофосфатів і рівнем освітлення, то координатами екологічного простору будуть такі змінні: x_1 – концентрація ортофосфатів; x_2 – рівень освітлення; x_3 –

щільність культури водоростей.

При цьому необхідно підкреслити, що *a priori* не передбачається статистичної чи функційної незалежності факторів (координат) екологічного простору. Більше того, одним із завдань факторіальної екології є з'ясування такої залежності та врахування її впливу на показники життєдіяльності біосистем чи параметри екосистеми в цілому.

Для кількісної характеристики впливу екологічних факторів на параметри біосистем різного рівня (на показники життєдіяльності) потрібно ввести поняття про функцію відгуку біо- і екосистем на сукупну дію екологічних факторів.

Позначимо через $I^k = [C_k, C_k^-]$ відрізок на шкалі вимірів, обмежений мінімально C_k , і максимально C_k^- можливого значення k -го показника.

Функцією відгуку k -го показника на сукупність екологічних факторів $(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots)$ називається функція φ^k , що відображає екологічний простір ξ на шкалу I^k :

$$\varphi^k : \xi \rightarrow I^k, \quad (2.11)$$

яка кожній точці (x_1, \dots, x_n, \dots) простору ξ зіставляє число $\varphi^k(x_1, \dots, x_n, \dots)$ на шкалі I^k .

Число екологічних факторів практично необмежене, відповідно нескінченна розмірність екологічного простору ξ і кількість аргументів функції відгуку $\varphi^k(x_1, \dots, x_n, \dots)$, але на практиці виділяють певну кількість факторів (позначимо їх через n), за допомогою яких можна пояснити задану частину від повного варіювання функції відгуку.

Наприклад, перші 3 фактори спроможні пояснити 80 % загального варіювання показника φ , перші 5 фактори – 95 %, перші 10–99 % і так далі. Решта, що не ввійшла до зазначених факторів, істотно не впливають на показник, що досліджується. Їх вплив можна розглядати як певний «екологічний шум», що накладається на вплив імперативних факторів.

Крім функції відгуку, що відповідає конкретним показникам $i = 1, \dots, -k$ життєдіяльності особин, або іншим параметрам популяцій чи біосистем іншого рівня потрібно також запровадити поняття узагальненої функції відгуку або функції благополуччя (життєвості) біосистеми. Значення останньої змінюються вздовж деякої шкали (як правило, що містить 0) і є узагальненим показником сприятливості стану біосистеми за даного поєднання екологічних факторів – від процвітання при $\varphi > 0$; рівноваги при $\varphi = 0$, і до пригнічення і загибелі при $\varphi < 0$.

Звичайно функцію благополуччя вираховують виходячи з конкретних функцій відгуку.

За функцію благополуччя популяції можна взяти різницю між швидкістю фотосинтезу і дихання у рослин, співвідношення між приростом біомаси й рівнем дихання у тварин, біотичний потенціал у популяцій, темп росту популяцій, ефективність трансформації енергії, співвідношення продукційно-деструкційних процесів у біосистем різного рівня тощо.

2.6 Екологічна ніша з позицій системного підходу

Термін «**екологічна ніша**» вперше був запропонований американським ученим І. Грінеллом у 1917 р. Він застосовується для характеристики положення організмів певного виду в екосистемі, способу їх життя і живлення. Поняття «екологічна ніша» містить фізичний простір, який займають організми виду, їх функціональну роль в угрупованні, відношення до факторів зовнішнього середовища (освітленості, вологості, температури, кислотності чи солоності ґрунтового розчину тощо), а також їх пристосованість до цих факторів, фізіологічні та поведінкові реакції. Іншими словами, екологічна ніша – це сукупність необхідних для організму певного виду умов середовища за відсутності істотної протидії організмів іншого виду в умовах даного місця мешкання.

Екологічна ніша характеризує ступінь екологічної спеціалізації організмів. Наприклад, червоні водорості займають недоступні іншим водоростям глибини моря, оскільки містять додаткові пігменти, які здатні поглинати проникаюче туди зелено-блакитне світло, непридатне для інших фотосинтезувальних рослин. Організми, які ведуть подібний спосіб життя, як правило, не живуть в одних і тих самих місцях унаслідок міжвидової конкуренції. Тому кожна екологічна ніша зайнята переважно організмами одного виду.

Таким чином, екологічна ніша організму визначається сукупним набором абіотичних та біотичних факторів середовища, які забезпечують його існування. Це багатовимірний простір (гіпероб'єм), у межах якого умови середовища дозволяють існувати виду необмежено довгий час.

Модель екологічної ніші можна подати як частину деякого багатовимірного простору, положення якої визначається сукупністю координат чинників. Модель екологічної ніші наведена на рис. 2.24. Припустимо, для нормального існування деякого виду необхідні конкретний рівень атмосферного тиску (P), певні межі температури (T) і вологості (φ). Якщо відкласти ці межі на координатних осях у тривимірному просторі, то екологічна ніша визначатиметься деяким паралелепіпедом у даному просторі, обмеженому проєкціями координат (див. рис. 2.24). Проте в природних біоценозах кожен вид у той же час залежить і від комплексу інших умов. Можна побудувати додаткові координатні осі, створивши ніби інший тривимірний простір, визначуваний, припустимо, вимогами до освітленості (C), хімічному складу їжі (X) і здатністю до переміщення (I). Об'єм паралелепіпеда при цьому різко зменшиться через введені обмеження. Якщо під час дослідження екологічної ніші врахувати додаткові параметри навколишнього середовища, то екологічна ніша ще зменшиться. Так, наприклад, якщо внаслідок яких-небудь антропогенних чи природних процесів дії на співтовариство змінилися фізичні параметри середовища (див. рис. 2.25), причому таким чином, що їх значення вийшли за межі, при яких організм ще може існувати. Це означає порушення параметрів екологічної ніші за даною ознакою.

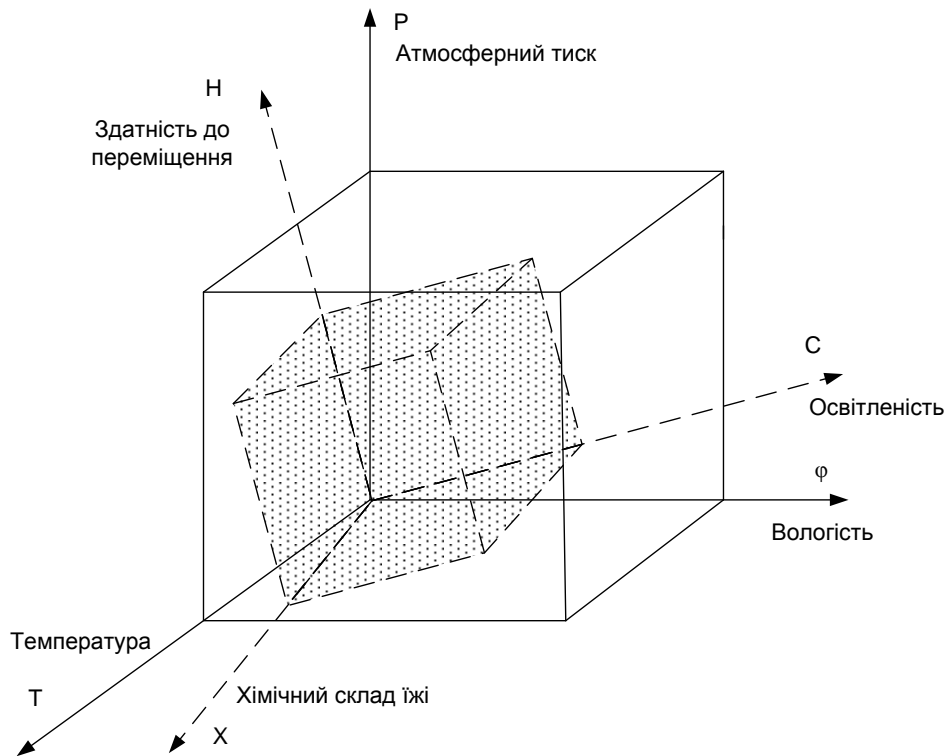


Рисунок 2.24 – Модель екологічної ніші організму

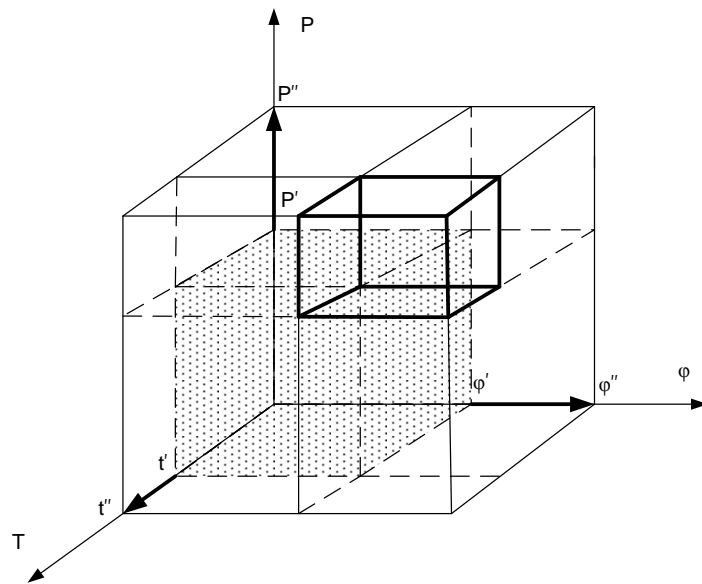


Рисунок 2.25 – Порушення параметрів екологічної ніші під впливом діяльності людини

Отже, вид, що відповідає даній ніші, повинен або відповідним чином адаптуватися (приспосуватися) до зміни, або він виявиться приреченим, а його місце займе інший вид, більш пластичний.

Якщо режим якого-небудь чинника змінюється під впливом діяльності людини, то амплітуда його коливань може опинитися ширше за пристосовні можливості організму. У цій ситуації зміна призведе до «руйнування» багатовимірного простору. Існує важлива екологічна закономірність:

взаємозв'язок, «зчепленість» різних чинників середовища один з одним. Тому потрібно враховувати, що зміна якого-небудь одного чинника здатна спричинити зміну інших чинників, але в той же час, керуючи якимось одним чинником, можна і не повернути в початковий стан інші чинники, що прямій дії не піддавалися.

Екологічні ніші двох різних популяцій, утворених особинами різних видів, можуть бути ідентичними або відмінними. Перекривання ніш залежить від характеру використання обома популяціями одних і тих самих ресурсів середовища і конкуренції між ними. Екологічні ніші популяцій можуть перекриватися повністю, частково, дотикатися або розмежовуватися (рис. 2.26).

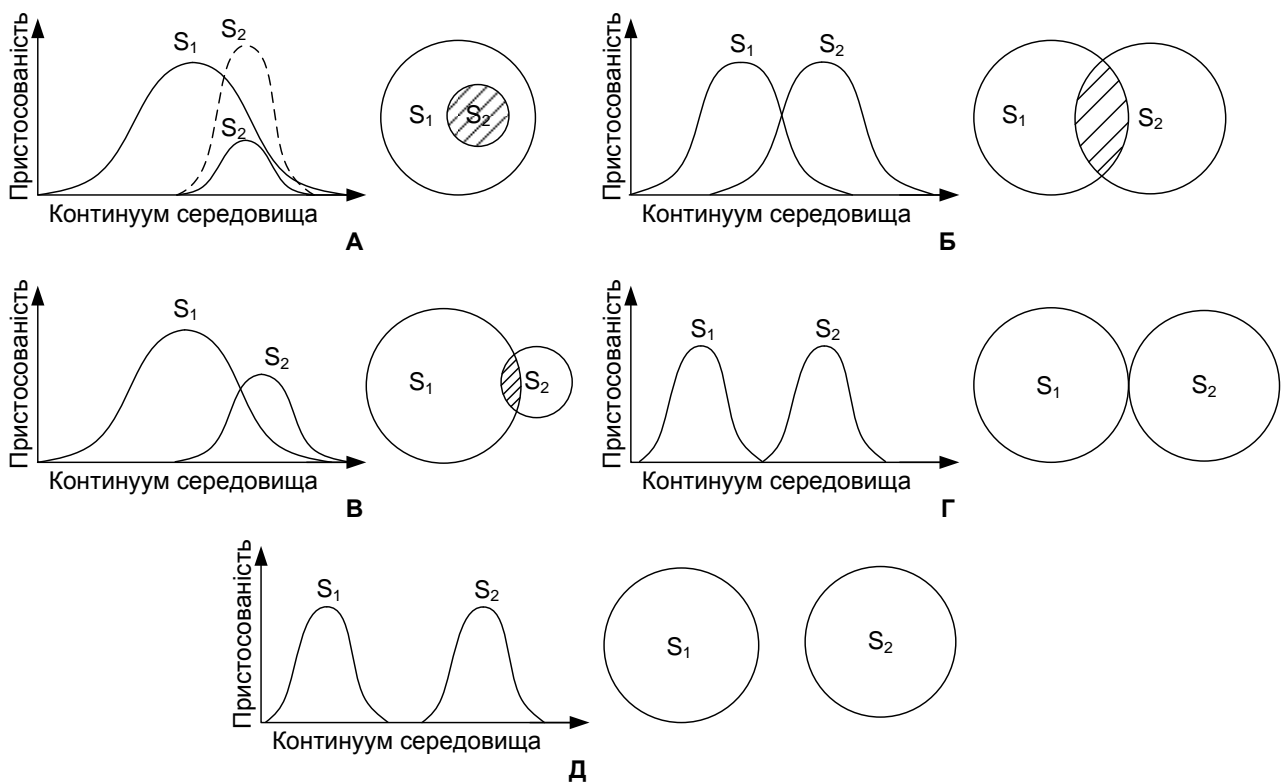


Рисунок 2.26 – Випадки можливих взаємних ніш, проілюстровані за допомогою поняття щільності і пристосованості (зліва) та моделей теорії множин (справа):

А – ніша всередині ніші. Ніші виду 2 (S_2) розташовані всередині ніші 1 (S_1);

Б – перекривання ніш однакової ширини. Конкуренція однакова в обох напрямках;

В – перекривання ніш неоднакової ширини. Конкуренція неоднакова у двох напрямках, оскільки частина простору ніш, що входить до області перекривання, у виду 2 більша, ніж у виду 1; Г – примикання ніш. Пряма конкуренція неможлива, але подібне може бути наслідком її уникання; Д – повний розділ ніш. Конкуренція неможлива і її важко навіть

передбачити.

Повне перекривання (рис. 2.26 А) спостерігається тоді, коли обидві популяції характеризуються ідентичними нішами. Це означає, наприклад, що на одній обмеженій території, в одній екосистемі не може бути двох мирно існуючих хижаків, якщо вони живляться одним і тим самим видом жертви протягом тривалого періоду. В цьому разі їх харчові ніші перекриваються повністю, домінуючий витіснить слабшого або, зберігаючи свою перевагу, буде

співіснувати з конкурентом. У цьому разі можливі два наслідки конкуренції:

1) якщо вид 2 має перевагу (переривчаста лінія), то він співіснуватиме при неповному використанні спільних ресурсів з видом 1;

2) якщо переваги має вид 1 (суцільні лінії), то він використовуватиме весь градієнт ресурсів, а вид 2 буде витіснений.

Фундаментальні ніші обох популяцій можуть **перекриватися частково**, коли частина ресурсів середовища використовується спільно, а інша частина – лише однією з них (рис. 2.26 Б, В). У цьому разі спостерігається співіснування, за умов якого домінуючий конкурент займає зону перекривання ніш.

Фундаментальні ніші можуть лише дотикатися одна до одної, що може бути наслідком уникання конкуренції особинами обох популяцій (рис. 2.26 Г).

Якщо ж фундаментальні ніші обох популяцій різні, перекривання їх не відбувається, вони відмежовані, розділені (рис. 2.26 Д).

Трактування перекривання ніш Хатчинсоном (1975) базується на умовах, що середовище повністю насичене особинами популяцій і перекривання не може бути тривалим; у конкуренції на спірній території ніші виживає лише один вид.

Недоліком таких тверджень є те, що в природі ніші часто перекриваються, а конкурентне вилучення не відбувається, оскільки конкуренти ізолюються певним чином один від одного.

Якщо є надлишок ресурсів, то обидві популяції можуть певний час використовувати їх одночасно, не завдаючи шкоди одна одній. Тому важливою причиною перекривання ніш є ступінь насичення середовища особинами і його здатність забезпечити їх вимоги.

Диференціювання за екологічними нішами є важливою умовою формування стійких угруповань рослин і тварин. Воно забезпечує співіснування різних видів в одному біоценозі. Екологічні ніші рослин часто збігаються, оскільки вони прив'язані до однієї території і мають спільне джерело живлення та енергії.

Особливості способу життя і живлення тварин визначають значну розбіжність екологічних ніш у межах однієї екосистеми. Під час створення штучних біоценозів важливо враховувати диференціювання видів за екологічними нішами, що є основою їх стійкості, оптимального функціонування і високої продуктивності.

Розуміння законів життя популяції є дуже важливим, оскільки в природі всі види існують лише у формі популяцій.

Згідно із працями Шанди В. І. системний підхід у теорії екологічної ніші дозволяє характеризувати її емерджентність, інтегративну активність, сприймання факторів, споживання ресурсів і реагування. Екологічна ніша визначає: 1) стан виду в кожний момент його існування, його відношення до середовища (факторів і ресурсів); 2) середовищеутворювальну функцію (активність у середовищі, що змінює або підтримує його в стані, сприятливому для виду); 3) варіабельність активності та реакцій, що обумовлені онтогенетично та ценотично. В екологічній ніші інтегровані абіотична, біотична, біокосна активності та реакції біологічного виду. Ці складові

модифікуються та регулюють стан виду в біогеоценозі: його чисельність, популяційний, екоелементний склад. Інтеграція реакцій, толерантності та активності біологічного виду в багатовимірному просторі його екологічної ніші може обумовлювати такі зміни його екологічних позицій на вісях екологічних факторів і ресурсів: 1) розширення лише за межі нижньої критичної точки; 2) розширення лише за межі верхньої критичної точки; 3) одночасне розширення за межі нижнього та верхнього екстремумів; 4) звуження від нижньої критичної точки в біляоптимальне положення; 5) звуження від верхньої критичної точки в біляоптимальне положення; 6) загальне двобічне звуження від нижньої та верхньої критичних точок в біляоптимальні положення; 7) загальне двобічне звуження до оптимального положення.

У біогеоценозах спостерігаються нішеутворювальні та нішеруйнівні процеси. *Нішеутворювальними процесами* є: 1) захоплення простору; 2) сприймання та використання факторів; 3) споживання та використання ресурсів; 4) специфічне середовиществорення; 5) розподіл простору; 6) розмноження; 7) адаптації; 8) поширення в просторі; 9) стійкість при збурюючих середовище впливах.

Нішеруйнівними процесами є: 1) самоінтоксикація; 2) вичерпання ресурсів; 3) надмірне зростання чисельності; 4) конкуренція.

Хаосоруйнівними процесами є: 1) взаємні позитивні впливи; 2) розподіл простору.

Хаосоутворювальні процеси: 1) надмірне розмноження; 2) нестача ресурсів; 3) конкуренція; 4) самоінтоксикація.

Цілісність як стаціонарний стан системи, що не дозволяє мобільність складу та зв'язків, в теорії екологічної ніші є відносним. Екологічна ніша як динамічна постійно варіююча система має цілісність, що забезпечується проявами всіх функцій, а їх порушення призводить до сумативного стану. Всеузагальнююча картина екологічної ніші є неможливою у зв'язку з великими розбіжностями потреб і середовищеутворювальних функцій організмів різних царств живої природи. Екологічна ніша як онтогенетично, екологічно, ценотично структурована та залежна сутність є похідною сукупності умов та активності біологічного виду.

У невизначеній множинності екологічних факторів і ресурсів є провідні, постійно, періодично або в певний період необхідні.

Функцією біологічного виду є збагачення, збіднення та перетворення середовища. Кожен вид є ресурсом споживачів у його життєдіяльності та в станах посмертного розкладання та мінералізації. Функціональні особливості екологічної ніші біологічного виду в біогеоценозі визначаються: 1) специфічним середовиществоренням; 2) адаптивним та неадаптивним реагуванням; 3) специфічною активністю.

Зростання у системній теорії екологічної ніші можна розглядати як невід'ємну властивість онтогенезу біологічного виду, що забезпечує: 1) наростання біомаси до певної усередненої генотипічно визначеної видової норми паралельно з розвитком тіла; 2) поступове збільшення та розгортання можливості виду в його взаємодії з екзогенним середовищем; 3) формування

ендогенного середовища. Весь онтогенез є вираженням зростання екологічної ніші як системи, становлення різних форм активності, функцій, реакцій, модифікацій, адаптацій. Якісні зміни такого руху біологічного виду в часові є розвитком. Екологічна ніша в онтогенезі виявляє себе: 1) початковою відсутністю певних потреб; 2) відмовою від певних потреб; 3) появою нових потреб; 4) зміною активності; 5) зміною реакцій; 6) зміною життєдіяльності (гіпербіоз, біоз, гіпобіоз, мезабіоз, анабіоз). Онтогенетична перебудова потреб і споживання ресурсів, сприймання екологічних факторів характеризує динаміку екологічної ніші біологічного виду як його кореговану середовищем генотипічну норму реакції. Наприклад, у тварин (ссавців) відмова від материнського молока, припинення батьківських турбот і опіки проявляються з достатньою доцільністю.

2.7 Природна динаміка та еволюція екосистем

Трактуючи екосистему як живу, біотичну одиницю, мусимо визнати за нею такі характерні риси, як постійний рух, динаміка, мінливість її розвиток. Зважаючи на те, що в літературі натрапляємо на різні тлумачення згаданих ознак й особливо спрощене трактування еволюції екосистем, є потреба спочатку уточнити терміни та обсяги основних понять, вживані під час розгляду аналізованих питань.

Причиною змін в екосистемах можуть бути різноманітні чинники:

а) зовнішні абіотичні і зовнішні біотичні (коли зміни в малих екосистемах-консорціях, біогеоценозах зумовлені змінами в екосистемах більших розмірів – ландшафтних, або інтродукцією в екосистему якогось агресивного біотичного компонента – консумента, хижака тощо);

б) внутрішні біотичні – зумовлені віковими, статевими або кількісними змінами біотичних компонентів;

в) зовнішні циклічні або ритмічні зміни умов освітлення, зволоження, температурного чи радіаційного режиму»;

г) антропогенні – пов'язані з господарською діяльністю людини.

Усі зміни, які є зворотними, кількісними, тобто не виводять екосистеми за межі пружної стійкості (за Ю. Одумом), а також за межі її стабільного розвитку, не супроводжуються перебудовою її кібернетичної пам'яті (норм реакцій біотичних компонентів на фактори зовнішнього середовища), зараховуємо до категорії динаміки екосистем (динамічних змін).

Послідовні зміни в структурі чи функціонуванні екосистеми або її окремих блоків (у межах динаміки екосистем) на одній і тій самій ділянці Землі (в процесі заростання оголеної території, відновлення після буревію, суцільнолісового вирубування, повені тощо) називаються *екологічною сукцесією*. Ці зміни можна розділити на низку послідовних стадій, які мають назву *серійних стацій або стадій розвитку*. Ю. Одум (1986), крім того, розрізняє *автогенні* (зумовлені саморозвитком екосистем) та *алогенні* (зумовлені зовнішніми збуреннями), *автотрофні* (коли валова продуктивність екосистеми є більшою за величину дихання) та *гетеротрофні* (коли величина

дихання перевищує величину валової продуктивності), а також *первинні* (ті, що починаються з піонерної стадії формування, наприклад на свіжих алювіальних відкладах) та *вторинні* (ті, що настають після часткового знищення якогось компонента екосистеми, наприклад вирубування деревостану в лісі, заготівлі лісової підстилки тощо) сукцесії.

Незворотні зміни, тобто ті, що відображають поступальні якісно нові структурно-функціональні перебудови в екосистемі, передовсім її кібернетичної пам'яті та еталонної системи, належать до змін еволюційних і характеризують *еволюцію екосистем*.

Зрозуміло, що до категорії еволюційних не можна зараховувати катастрофічні зміни в структурно-функціональній організації екосистем, зумовлені природними (наприклад, виверження вулканів) чи антропогенними (наприклад, хімічне забруднення чи техногенна деградація) чинниками, які спричиняють руйнування керованої системи, її пам'яті та еталонної системи.

Розрізняють три головні типи динаміки екосистем: сукцесії, флуктуації, трансформації.

2.7.1 Екологічна сукцесія

Екологічна сукцесія – закономірні зміни екосистеми під впливом переважно внутрішньосистемних процесів у напрямку клімаксного стану. В основі сукцесії лежить здебільшого розбалансування продукційно-деструкційних процесів і біогеохімічних колообігів.

Якщо валова продукція перевищує загальну деструкцію, то спостерігається **автотрофна сукцесія**. У разі, коли з плином часу енергоємність біомаси угруповання зменшується, спостерігається **гетеротрофна сукцесія**. Це можна записати так:

$P_v/R > 1; P_q > 0$; автотрофна сукцесія;

$P_v/R < 1; P_q < 0$; гетеротрофна сукцесія;

$P_v/R = 1; P_q = 0$; клімаксний стан,

де: P_v – валова продукція; P_q – чиста продукція; R – дихання угруповання.

Загальновідомі такі сукцесії, як перетворення озера на болото (рис. 2.27 а), чи лісу з гаю (рис. 2.27 б).

Головною ознакою клімаксного (зрілого) угруповання є збалансованість продукційно-деструкційних процесів (скільки синтезується органічної речовини системою, стільки ж її і розкладається в процесі дихання угруповання).

Ураховуючи те, що формування клімаксових екосистем не означає цілковитого призупинення змін і закінчення сукцесійних процесів (у них ці зміни є сповільненими і пришвидшуються лише за умови зовнішнього збурювального впливу), в загальній динаміці екосистем доцільно розрізняти дві стадії екологічної сукцесії (біогеоценологічного процесу) – *сингенез та ендогенез* (Сукачев, 1964).

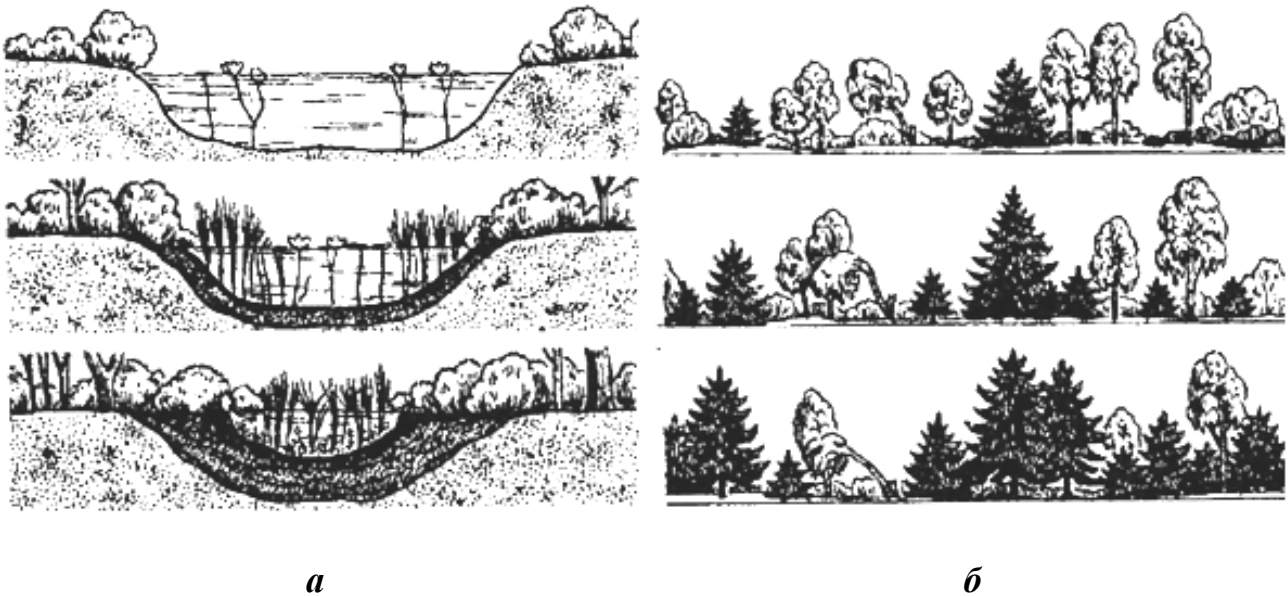


Рисунок 2.27 – Екологічна сукцесія: *а* – утворення болота з озера; *б* – утворенням ялинового лісу з березового гаю (за Мусієнком, 2006)

До стадії *сингенезу* належать усі ті сукцесії, що відбуваються, починаючи від заселення нової території різноманітними організмами, спроможними існувати в даних умовах клімату, і фізико-хімічних властивостей субстрату. Серед перших колоністів переважають однорічні рослини, піонерні чагарники (часто верби) і деревні види (тополя, осика, береза). Зі змиканням рослинного покриву розпочинається посилення міжвидової конкуренції за ресурси існування, і панування поступово переходить до тих видів, які є конкурентоспроможнішими в даних екологічних умовах: види *r*-стратегі в угрупованні змінюються видами *k*-стратегіями.

До стадії сингенезу зараховують також ті види сукцесій, які настають після знищення, наприклад, у лісових екосистемах деревного ярусу верховою пожежею, буревієм або суцільнолісосіковим вирубуванням (рис. 2.28).

Найхарактернішими прикладами сингенезу є автогенне заростання перелогів, свіжих алювіальних відкладів у заплавах рік, лісових і торфових згарищ тощо. Початкові етапи сингенезу проходять швидко, наступні є тривалішими, а сукцесії, пов'язані з відновленням біоти, характерної для корінних у цих умовах – клімаксових угруповань, можуть тривати десятки і сотні років (Одум, 1986; Дигресія..., 1984).

На підставі узагальнення літературних даних, різні види динаміки наземних екосистем можна звести до певної класифікаційної схеми. Передовсім за характером причин, що їх зумовлюють, можна виділити такі типи:

а) **циклічні зміни**, зумовлені циклічністю радіаційного, термічного і гідрологічного режимів;

б) **сингенезні сукцесії**, пов'язані з постійним природним рухом змінених чи девастованих екосистем у напрямі до клімаксових типів;

в) **ендогенні зміни**, що відображають часову структурно-функціональну динаміку клімаксових екосистем.

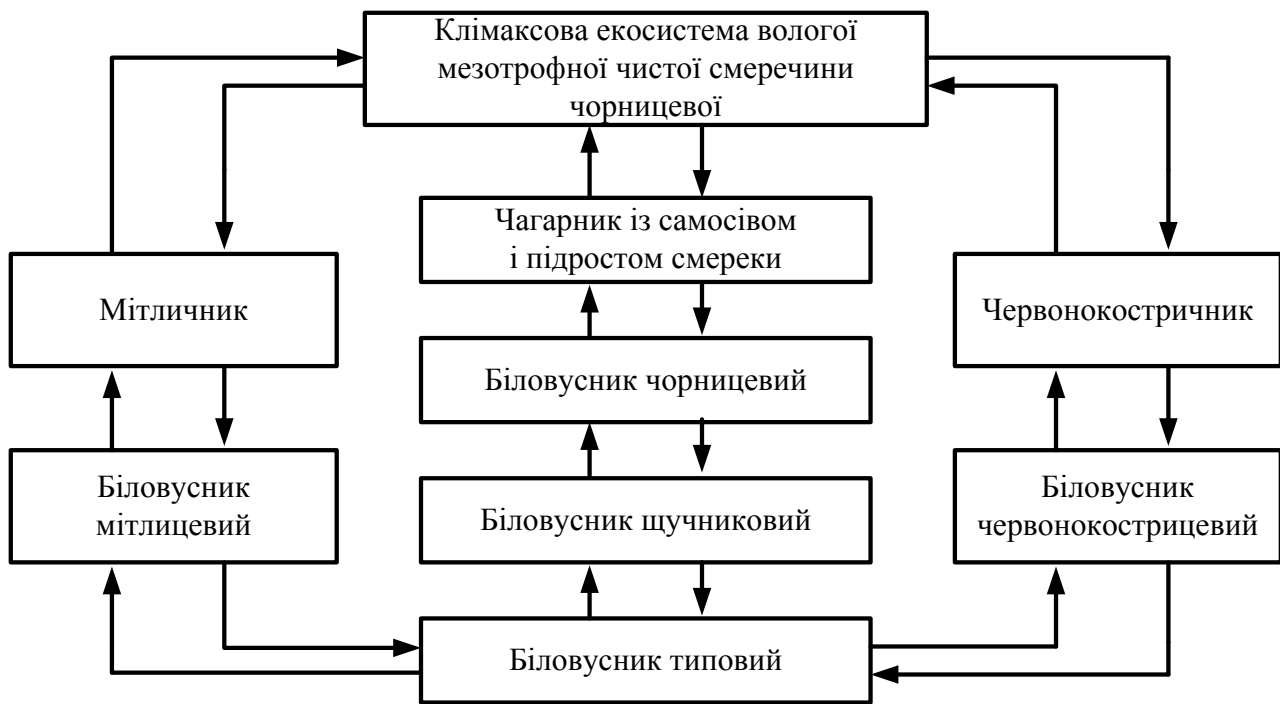


Рисунок 2.28 – Схема сукцесій в екосистемі чорногірської вологої мезотрофної чистої смеречини чорницевої під впливом вирубування та випасання худоби і після зняття пасторального навантаження (за матеріалами К. А. Малиновського, 1980).

Кожен зі згаданих типів об'єднує низку груп і видів змін нижчого рівня:

I. Циклічні зміни (циклічна динаміка) екосистем:

- 1) добові зміни (зумовлені зміною дня та ночі);
- 2) сезонні зміни (зумовлені змінами пір року);
- 3) щорічні зміни (зумовлені річним циклом радіаційного та гідротермічного режимів);
- 4) багаторічні й вікові зміни, зумовлені циклічністю сонячної активності та інших космічних явищ.

II. Сингенезні сукцесії:

- 1) геоморфогенні:
 - а) автогенні (природні зсуви, селі, ерозія),
 - б) антропогенні (ерозійні, девастогенні),
- 2) анемогенні (вітрова ерозія, чорні бурі, вітровали, снігові лавини, буреломи тощо);
- 3) пірогенні: а) природні, б) антропогенні;
- 4) гідрогенні:
 - а) природні (повені),
 - б) антропогенні (гідромеліоративні, гідротехнічні);
- 5) зоогенні:
 - а) природні (інвазії шкідників, спалахи чисельності популяцій консументів),
 - б) антропогенні (кошарування, переганання, випасання худоби, інтродукція нових видів, реакліматизація тощо);

б) фітогенні:

а) природні (відновлення рослинного покриву на девастрованих територіях, а також фітоценозів після активної зміни людиною їх просторової структури: вирубування, пов'язане з веденням лісового господарства; вирубування головного користування, заготівля сіна, лікарських рослин, технічної сировини тощо),

б) антропічні (інтродукція екзотичних рослинних видів у природні угруповання, штучне культивування екзотів, реінтродукція зниклих видів рослин тощо);

7) техногенні (зумовлені великомасштабними регіональними та глобальними змінами, передовсім унаслідок забруднення атмосфери, гідросфери й ґрунтів, урбанізацією, землеробством, розбудовою шляхів сполучення тощо).

III. Ендогенні зміни:

1) кліматогенні;

2) геоморфогенні (пов'язані з геотектонікою);

3) філогенні (пов'язані з історичним розвитком видів, систематичних груп та органічного світу загалом);

4) біогеоценогенні (пов'язані з історичним розвитком структурно-функціональних блоків екосистеми).

Характерною особливістю циклічних змін є постійне повернення екосистеми в її попередній стан. При цьому, безумовно, беруться до уваги й ці відносно незначні зміни, які настають у структурно-функціональній організації екосистем за добу або рік, і ті багаторічні чи вікові зміни, що відбуваються під впливом космічних факторів. Циклічною динамікою охоплені всі живі системи – як штучно створені людиною, так і клімаксові.

Тип сингенезних сукцесій вирізняється тим, що всі вони мають одновекторне спрямування – у напрямі відновлення клімаксових екосистем. Ця одновекторність зумовлена передовсім відносною стабільністю абіотичного середовища біосфери і потужною кібернетичною пам'яттю екосистем, в якій записані норми реакції їх живих компонентів і змодельована структурно-функціональна організація еталонних екосистем. Вони також є незворотними, тобто в разі відсутності додаткового зовнішнього збурення (природний хід сукцесії) екосистеми не повертаються до свого попереднього стану (характерного для попередньої стадії розвитку). Цим типом динаміки об'єднані фактично всі похідні (вторинні) екосистеми Землі. Затримання сукцесії на вигідній для людини стадії розвитку (наприклад, післялісових лук, аграрних екосистем, штучних лісових культур, штучних водойм) завжди пов'язане з адекватною затратою антропогенної енергії, необхідної для подолання енергії природної сукцесії. Загалом сингенез у наш час можна характеризувати як перманентне у просторі й часі протиборство антропогенної дигресії і природної демутації в біогеоценотичному покриві (Дигресія..., 1984; Башта, 2000).

Ендогенні зміни вирізняються найменшою динамічністю і незначними (в межах стабільності розвитку) відхиленнями від норми (середнього стану) їх структурно-функціональних параметрів. Їх характер зумовлений високим

рівнем стійкості клімаксових екосистем до зовнішніх збурювальних чинників. Вони відбуваються майже виключно за рахунок внутрішніх факторів саморозвитку і дуже повільно.

Зважаючи на те, що біогеоценогенез є дуже складним багатоплановим і багатопараметричним процесом, потрібно мати на увазі, що й види динаміки екосистем зумовлені переважно декількома причинами, і тому самі сукцесії рідко проявляються в чистому вигляді. Вони переважно накладаються одна на іншу, супроводжуються різноманітними відхиленнями від типового (усередненого) варіанта, ускладненими впливами погодних умов, флуктуаціями структури фітоценозів.

Розрізняють **первинні й вторинні екологічні сукцесії**.

Первинні беруть початок там, де життя було практично відсутнє – на застиглих потоках вулканічної лави, в новоутворених озерах тощо.

Вторинні відбуваються там, де угруповання було знищене під впливом певного фактора – пожежі, господарської діяльності людини тощо.

Сукцесія – процес, що відбувається у напрямку досягнення термодинамічної рівноваги (клімаксового угруповання). Тому він передбачуваний і прогнозований.

В ході аутогенної сукцесії знаходять свій прояв всі основні риси, притаманні зрілій екосистемі:

I. Енергетика:

- 1) зростають біомаса і кількість детриту;
- 2) зростає валова продукція за рахунок первинної;
- 3) чиста продукція прямує до нуля;
- 4) зростає дихання угруповання;
- 5) співвідношення *продукція/дихання* прямує до 1.

II. Біогеохімічні колообіги:

- 1) стають більш замкненими;
- 2) зростають час обертання і запаси біогенних елементів.

III. Структура угруповання:

- 1) змінюється видовий склад;
- 2) зростає видове багатство;
- 3) зростає еквітабельність видів;
- 4) зростає відношення k-стратегі / r-стратегі;
- 5) ускладнюються і подовжуються життєві цикли;
- 6) збільшуються розміри організмів;
- 7) значного розвитку досягають мутуалістичні взаємини.

IV. Стабільність:

- 1) зростає резистентна стійкість;
- 2) знижується пружність.

V. Загальна стратегія:

- 1) зростає ефективність використання енергії та біогенних елементів.

Важливою особливістю розвитку екосистеми є зменшення ролі абіотичного компонента при істотному зростанні біотичного. При цьому біота все більше «кондиціонує» середовище у бажаному собі напрямку. *Згідно з*

гіпотезою Геї, організми, особливо мікроорганізми, разом із фізичним середовищем утворюють складну систему регуляції, що підтримує на Землі умови, сприятливі для життя (Lovelock, 1979).

Прояв цієї закономірності можна спостерігати і в екосистемах коралових рифів, і вологих тропічних лісів, де навіть біогеохімічні колообіги не просто стають більш замкненими, а все більша відносна частка хімічних елементів (біогенів) зосереджена саме в живому компоненті екосистем, а колообіги таких елементів, як фосфор, відбуваються практично між живими компонентами з мінімальним виходом до абіотичних складових.

Часто типи динаміки екосистем поділяють на дві групи: *зворотні* (осциляції) та *незворотні* (сукцесії та трансформації). У свою *чергу*, існує низка класифікацій незворотних змін екосистем (за різними ознаками). Зокрема, за Міркіним і Наумовою можна виділити низку цих змін екосистем (рис. 2.29).

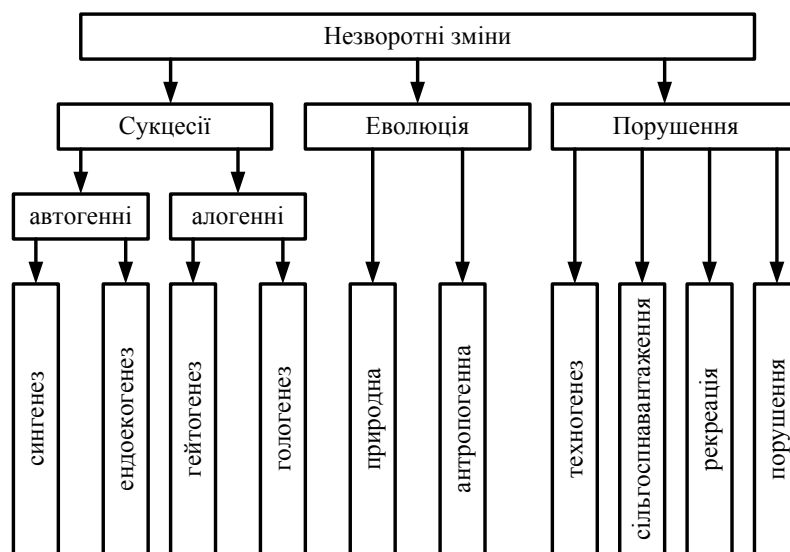


Рисунок 2.29 – Класифікація незворотних змін екосистем (Миркин, 1985; Наумова, 1996)

Трансформацією здебільшого називають зміни екосистем під впливом діяльності людини або іншого потужного чинника впливу. Тому це здебільшого деградаційні зміни, що супроводжуються руйнацією екосистем, розбалансуванням внутрішньосистемних процесів, зниженням інформації, розкорельованістю речовинно-енергетичних процесів тощо. Типовими взірцями трансформованих екосистем є урбанізовані території. Переважна більшість територій є істотно трансформованими системами.

Таким чином, усі типи динаміки екосистем можна поділити на дві групи: циклічні – флуктуації, і нециклічні – сукцесії і трансформації. При цьому потрібно відзначити, що нециклічні зміни екосистем можуть бути як зворотними, так і незворотними. Найчастіше до незворотних змін екосистем можна віднести їх трансформацію, насамперед антропогенну. Проте і трансформації часто бувають зворотними, і з припиненням пресу фактора, що спричинив трансформацію тієї чи іншої екосистеми, її стан часто повертається до вихідного. Це стосується і сукцесій. Ціла низка факторів може зупинити

сукцесію або навіть «відкинути» екосистему на якусь стадію (серію) її розвитку. Однак і в цьому разі сукцесія здебільшого продовжиться у тому ж таки напрямку. Саме спрямованість сукцесій лежить в основі можливості прогнозування стану різноманітних екосистем певної стадії серії.

2.7.2 Еволюція екосистем

Екосистемам, як і всім природним об'єктам, властиві закономірні зміни у часі. Ці зміни відповідають принципу самостійного розвитку та руху матерії. Для позначення явища розвитку екосистем звичайно використовують термін «еволюція». Він не зовсім вдалий. Зі словом «еволюція» у більшості випадків асоціюється історичний розвиток, боротьба за існування та природний відбір. На рівні екосистем цих явищ немає, але термін «еволюція» тут застосовується більшістю авторів і змінювати його немає підстав. Хоча, за М. А. Голубцем (1969), доводиться говорити про екосистемну еволюцію. Екосистемна еволюція містить у собі «зміну в часі просторової та функціональної організації екосистем» (М. Голубець, 1982).

Майже півтора століття після того, як Ч. Дарвін сформулював теорію природного добору, об'єктом еволюційних досліджень був вид або елементарна одиниця його існування – популяція. Вчення про екосистеми почало кристалізуватися лише після 1935 р. завдяки працям А. Тенслі. Тому ідея структурно-функціональної єдності живих істот в екосистемі та їх спільної еволюції дуже пізно завоювала місце серед давно усталених положень еволюційної теорії.

Синтетична теорія еволюції, безумовно, є видатним досягненням у біології. Але, базуючись виключно на «популяційному мисленні» (за Майром), вона спроможна розкрити лише закономірності мікроеволюційного процесу. Еволюція ж органічного світу не вичерпується лише прогресивним розвитком популяцій. Вона охоплює також взаємозв'язані й взаємозумовлені системи інших рівнів організації живого, кожний з яких виконує лише йому властиву функцію в живій природі, без якої неможливе не лише існування популяції, але й саме життя.

Головними факторами еволюції вважають мінливість, спадковість, боротьбу за існування і природний відбір. Однак тільки ними неможливо пояснити не лише прогресивного розвитку органічного світу, а й навіть еволюційних змін у популяціях, тобто мікроеволюції. І не лише тому, що стійка структурно-функціональна організація екосистем у часі забезпечується не їх спадковістю (екосистеми не народжуються, не вмирають і не передають своїх ознак від покоління до покоління, а біосфера не має здатності шляхом природного добору відбирати найстійкіші екосистеми: вони підпорядковані іншим законам існування), а й тому, що залишаються невизначеними самі причини спадковості, мінливості й природного добору, тобто власне рушійні сили еволюції. Спадковість, мінливість, боротьба за існування і природний добір є надзвичайними внутрішніми властивостями організмів та популяційних структурних рівнів організації органічного світу.

В екосистемній еволюції існує дві узгоджені форми розвитку:

- а) еволюція живих організмів;
- б) самоорганізація неживої матерії.

У неживій матерії до саморозвитку здатні відкриті системи, що складаються з підсистем із колективною поведінкою. На противагу до другого закону термодинаміки в неорганічній матерії, однак, відомі випадки, коли порядок виникає з безладу.

В екології розвиток у формі самоорганізації матерії є важливою властивістю екосистем. Кооперативна поведінка живої матерії, яка еволюціонує, та абіотичних компонентів екосистем, що самоорганізуються, веде до виникнення все нових і нових форм організації. Вони і становлять зміст екосистемної еволюції. Відкритий характер екосистем зумовлює те, що їх еволюція визначається внутрішніми особливостями екосистем, які само-розвиваються. Проте вона здійснюється також і за рахунок зовнішніх щодо екосистем збурень.

Внутрішнім джерелом самоорганізації екосистем є суперечність форм та темпів розвитку живого та неживого компонентів, їх структури. Детальний аналіз, проведений М. А. Голубцем (1982), показав, що за рахунок еволюції екосистем у біосферний кругообіг речовин залучаються все нові потенційні середовища життя і підвищуються продуктивність та стабільність біогеоценотичного покриву Землі в цілому. Ще до нього А. І. Літока (1925) сформулював правило максимуму потоку енергії в біологічних системах, відповідно до якого екосистемна еволюція зорієнтована так, що все більша й більша частка енергії спрямовується на збільшення незалежності та автономності екосистем щодо зовнішніх збурень.

Важливим рушієм поступових змін екосистем є процес життєдіяльності організмів. За повної замкненості біогеохімічних циклів в екосистемах накопичуються органічні та неорганічні залишки специфічного характеру. Так, очевидно, що на самих ранніх етапах еволюції екосистем у них не було організмів, які використовували для дихання вільний кисень тому, що його в атмосфері просто не було. У міру накопичення кисню, внаслідок фотосинтезу зелених рослин, на Землі почали формуватися екосистеми, що вміщували живі організми, які дихали киснем.

Інший рушій екосистемної еволюції – це сама біологічна еволюція, тобто зміна організмів різного рівня організації. Як показано М. А. Голубцем, уся сукупність генотипів тієї чи іншої екосистеми, що становить генопласт, також є об'єктом еволюції. Ю. Одум (1986) підкреслював важливість для еволюції екосистем двох ефектів: коеволюції та групового відбору. Поява тісної кооперації типу «рослина та її фітофаги», «жертва та хижак», спеціалізовані квітки та їх запилювачі – це все наслідок коеволюції.

Еволюція органічного світу – це загальноісторичний, загальнобіотичний, глобальний процес, що охоплює організми, популяційні та екосистемні структури. Він відбивається так само глибоко не лише на біоті, а й на середовищі її існування. Тому, як свідчать численні наукові дані, поряд із внутрішніми біотичними факторами еволюції величезне значення мають

абіотичні фактори зовнішнього середовища. Мінливість цих факторів зумовлює сукцесії в живих системах, а їх сучасний вплив, незважаючи на віками вироблені механізми захисту і гомеостазису, відбивається не лише на фенотипічних показниках, а й на генетичній пам'яті цих систем.

Приступаючи до висвітлення нашого розуміння рушійних сил еволюції, ми насамперед звернули увагу на такі основні структурно-функціональні особливості живих систем, що визначають специфіку їх історичного розвитку і сучасного стану:

а) біосфера складається з великої кількості ієрархічно пов'язаних біотичних систем і пронизана спільними каналами інформації, охоплена єдиним процесом речовинно-енергетичної трансформації, тому разом з усіма її структурними підсистемами повинна підпорядковуватися спільним законам еволюції;

б) біосфера як жива система не лише вміщує у своєму складі середовище існування живих істот, але разом із ними знаходиться під впливом абіотичного середовища, тобто під дією зовнішніх космічних, тектонічних та інших факторів;

в) навколишнє щодо біосфери середовище характеризується постійною мінливістю, зумовленою як обертанням Галактики, Сонячної системи і самої Землі, так й електромагнітним впливом і корпускулярною активністю небесних тіл, мобільністю материків, тектонікою, гороутворенням і вулканізмом на самій планеті. Ця мінливість є постійним зовнішнім збурювальним чинником щодо біосфери та її підсистем;

г) усі живі системи, зокрема біосфера, є відкритими для безперервного надходження енергії та інформації із зовнішнього середовища. Всі вони є неентропійними і завжди мають певний запас вільної енергії, яку можуть використовувати для забезпечення життєвих процесів, зокрема засвоєння інформації, що надходить із зовнішнього середовища, удосконалення форми організації, кругообігу речовин, росту, розмноження, міграції, гомеостазису;

д) усі без винятку системи організмів, популяційного та екосистемного рівнів організації живого є самоорганізованими і саморегульованими. Як будь-яка інша саморегульована система, вони мають свою внутрішню кібернетичну пам'ять, у якій записані норми їх реакції на можливі зовнішні збурення чи норми їх поведінки у мінливих умовах зовнішнього середовища (Шмальгаузен, 1968; Голубец 1982; Одум, 1986). У зв'язку з постійним надходженням інформації і розвитком самих систем, еволюційними перетвореннями мусить бути охоплена також пам'ять;

е) завдяки наявності в живих системах значної кількості вільної енергії вони мають можливість настільки трансформувати довкілля, що створюють внутрішнє, властиве цим системам біогенне середовище. Таким чином, екотопи біосфери змінюються відповідно до змін їх біоценозів і навпаки, тобто еволюцією охоплені екологічні системи і біосфера загалом, усі їх структурно-функціональні компоненти;

є) завдяки накопиченню вільної енергії, зовнішнім збурювальним впливам і внутрішнім перешкодам (спотворення в передаванні спадкової

інформації і виникнення мутацій, за І. І. Шмальгаузенем), а також внутрішнім перебудовам структурних чи функціональних параметрів (автогенні зміни в біогеоценозах), живі системи мають здатність не лише до самоорганізації і саморегуляції, а й самозбурювання і саморозвитку, автоеволюції в розумінні А. Ліма-де-Фарія (1991).

Як підсумок наведеного, потрібно підкреслити, що найважливішими ознаками живих систем, які визначають специфіку еволюції органічного світу, є їх відкритість, неентропійність, існування в постійно мінливому і збурювальному зовнішньому середовищі, здатність до саморозвитку і саморегуляції, здатність живого до розтікання поверхнею планети, творення і захоплення нових екологічних ніш. Тобто, біотичну еволюцію провокують не лише внутрішні біотичні рушійні сили, а й зовнішні абіотичні. Еволюцією охоплені живі системи всіх рівнів організації живого, тому причини еволюції не можна зводити лише до факторів, визнаних дарвінізмом чи синтетичною теорією еволюції.

2.7.3 Флуктуації екосистем

Флуктуації – циклічні зміни в екосистемах під впливом циклічних процесів – періодів доби, сезонів року, фаз Місяця тощо. Кожна екосистема, залишаючись собою, має зовсім інший вигляд у різні пори року, часто й у різний час доби тощо. Природну цикліку необхідно враховувати і при порівнянні окремих екосистем між собою, оскільки в різний час одна й та сама екосистема мало на себе схожа. Циклічні зміни досить правильно чергуються у часі, й тому вони передбачувані. Колосальну інформацію щодо різних аспектів сезонних явищ у природних екосистемах накопичена фенологією – наукою про сезонні явища природи, терміни їх настання і причини, що визначають ці терміни. Основоположником фенології вважають Р. Ремюра, який у 1735 році встановив залежність сезонного розвитку рослин від різних метеорологічних факторів. У 1748 році К. Лінней запропонував створити мережу пунктів фенологічних спостережень.

Одна з популярних систем класифікації екологічних факторів базується на поділі їх на періодичні і неперіодичні (система Мончадського).

За амплітудою та тривалістю флуктуації поділяються на такі типи (Миркин та ін., 1989):

- приховані (зміни візуально не встановлюються);
- осциляції (виявляються при безпосередньому спостереженні);
- дигресійно-демутаційні (амплітуда і тривалість змін перевищують «середньоаспірантський» інтервал спостережень, тобто понад 5–6 років).

Работнов Т. А. (1983) розрізняє такі типи флуктуацій за факторами впливу:

- Екотопічні (кліматогенні) флуктуації – найбільш поширений тип флуктуацій. Різнорічна мінливість параметрів екосистеми (наприклад, чисельність, продуктивність чи біомаса) може досягати порядків. Так, кількість зайців за 80 років спостережень (класична система «зайці – рисі») змінювалася

більш ніж у 100 разів, рисі – більш ніж у 50 разів. Фітоциклічні флуктуації притаманні рослинним угрупованням і пов'язані з особливостями біологічних ритмів рослин. Наприклад, дуб (*Quercus robur*) рясно плодоносить у середньому один раз на чотири роки і, звісно, на наступний після масового плодоношення рік у рослинному угрупованні буде багато його проростків.

- Зоогенні флуктуації обумовлені масовим розвитком якогось виду тварин (наприклад, сарана, непарний шовкопряд тощо), що істотно змінює всю екосистему.

- Антропогенні флуктуації. Ці зміни пов'язані з короткотерміновим і не спрямованим впливом людини на екосистеми. Наприклад, перевипасання може призвести до значних змін структури травостою пасовищ (Наумова, 1996).

Згідно з принципом Ле Шательє-Брауна при зовнішньому впливі, що виводить систему зі стану стійкої рівноваги, рівновага зміщується в тому напрямі, в якому ефект зовнішнього впливу послаблюється. При цьому, чим більше відхилення від стану екологічної рівноваги, тим істотнішими мають бути енергетичні затрати для послаблення протидії екосистеми цьому відхиленню.

Для розуміння ролі коливальних процесів у екосистемах важливо згадати принцип незрівноваженої динаміки Пригожина-Онсагера (цей принцип називається «теоремаю Пригожина»), що обговорювався Л. Онсагером у 1931 р. і був розвинений у працях І. Пригожина (1947, 1986 та ін.). «Тут ми підходимо до одного з наших головних висновків: на всіх рівнях, чи то рівень макроскопічної фізики, рівень флуктуацій, чи мікроскопічний рівень, джерелом порядку є незрівноваженість. Незрівноваженість є те, що породжує *порядок із хаосу*» (Пригожин, Стенгерс, 1986). «Якщо стійкі системи асоціюються з поняттям термодинамічного, симетричного часу, то нестійкі хаотичні системи асоціюються з поняттям імовірнісного часу, що передбачає порушення симетрії між минулим і майбутнім» (Пригожин, Стенгерс, 1994).

З позицій незрівноваженої термодинаміки еволюція має задовольняти три основні вимоги:

- незворотність, що виражається в порушенні симетрії між минулим і майбутнім;
- необхідність запровадження поняття «подія»;
- деякі події повинні мати здатність змінювати хід еволюції.

Умови формування нових структур:

- відкритість системи;
- її стан далекий від рівноваги;
- наявність флуктуацій.

«В основі процесів розвитку біосистем лежить суперечність між випадковістю і закономірністю, свободою вибору і надійністю пам'яті, хаосом і структурою тощо» (Букварева, Алещенко, 1997). Новоутворення створюються нелінійними системами, які можуть мати декілька стійких станів. Перейшовши межу стійкості, система потрапляє в критичний стан, який називається точкою біфуркації. В цій точці навіть незначна флуктуація може вивести систему на інший шлях еволюції і різко змінити її структуру та поведінку. Це і називається

подією. Таким чином, випадковість і необхідність доповнюють одна одну, визначаючи долю відкритої системи. Властивості відкритих (незрівноважених) і закритих систем істотно різняться (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Властивості відкритих і закритих систем (Горелов, 1997)

Відкриті системи	Закриті системи
Система «адаптується» до зовнішніх умов, змінюючи свою структуру	Для переходу з однієї структури до іншої необхідні сильні збурення або зміни граничних умов
Наявність великої кількості стаціонарних станів	Один стаціонарний стан
Висока чутливість до випадкових флуктуацій	Нечутливість до флуктуацій
Незрівноваженість – джерело порядку (всі елементи системи діють узгоджено) і складності	Елементи системи поведуть себе певною мірою, незалежно один від одного
Фундаментальна невизначеність (непередбачуваність) поведінки системи	Поведінка системи детермінована

У точці біфуркації флуктуація досягає такої сили, що структура системи не витримує і руйнується: в цьому разі принципово неможливо передбачити, чи стане динаміка системи хаотичною, чи вона перейде на новий, більш високий рівень упорядкованості, який І. Пригожин назвав дисипативною структурою (для підтримання цієї структури необхідно більше енергії, ніж для підтримання більш простих структур, на зміну яким вона прийшла). «Дисипативні структури існують лише постільки, поскільки система дисипує (розсіює) енергію і, відповідно, виробляє ентропію. З енергії виникає порядок зі зростанням загальної ентропії. Таким чином, ентропія – не просто беззупинне сповзання системи до стану, позбавленого будь-якої організації, а за певних умов стає праматір'ю порядку» (Горелов, 1997).

Поведінку екосистеми можна представити за допомогою множини траєкторії у n -вимірному просторі. По суті, стан кожної системи у будь-який момент часу визначається значенням якогось числа перемінних x, y, z . Ці змінні зазвичай відповідають щільності видів, які входять до складу екосистеми. Таким чином, стан системи можна представити у вигляді точки у n -вимірному фазовому просторі, де точці такого простору можна зіставити вектор чи стрілку, вказавши при цьому напрямок руху системи. З'єднавши ці вектори між собою, ми отримуємо траєкторію, яка дає нам уявлення про поведінку системи впродовж тривалого часу. Але така схема може бути використана лише в тому разі, коли з кожною точкою простору зв'язаний лише один вектор, а це означає, що необхідно вибирати перемінні, яких достатньо для однозначного визначення

поведінки системи.

Точка спокою (стан рівноваги) – це точка, з якою зв'язаний вектор, який має нульову довжину, тобто якщо система знаходиться в стані спокою в даний момент часу, то вона залишиться в цій точці й у наступний момент часу. Точка спокою може бути:

- сталою;
- несталою.

Якщо система під час виведення зі стану рівноваги будь-яким малим збуренням, повертається до цього стану, то такий стан рівноваги називається **сталим**, або **локально сталим**. Якщо ж система під час виведення зі стану рівноваги продовжує віддалятися від нього, то таке положення називається **несталим**.

Припустимо, що система з будь-якого початкового положення за умови, що не одна з перемінних не дорівнює нулю, рухається до визначеної точки спокою, в такому разі говорять, що система глобально стала.

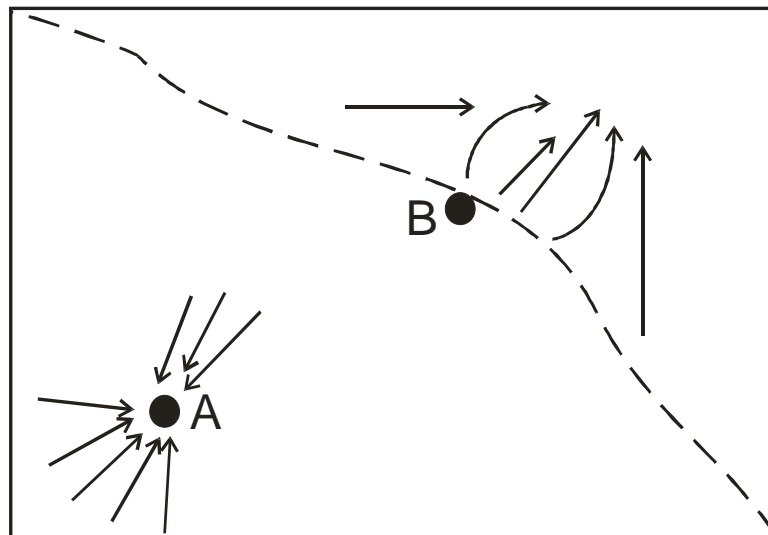


Рисунок 2.30 – Поведінка екосистеми у n -вимірному просторі

На рис. 2.30 наведені нестала точка спокою Б та точка спокою А, яка має визначену область сталості. Область фазового простору, з якого система повертатиметься в точку А, називається **областю притягання точки А**.

З математичної точки зору найлегше вивчати локально сталі точки спокою. Розглядаючи лише невеликі відхилення від положення рівноваги рівняння можна навести у лінійному вигляді, тим самим описавши поведінку в точці спокою. Така поведінка належить до одного із чотирьох типів:

- 1) розбіжні коливання (РК);
- 2) загасальні коливання (ЗК);
- 3) коливання, що наближаються до рівноваги за експоненціальним законом (ЕН);
- 4) коливання, що віддаляються від рівноваги за експоненціальним законом (ЕВ).

На рис. 2.31 наведені лінійні вирази цих законів.

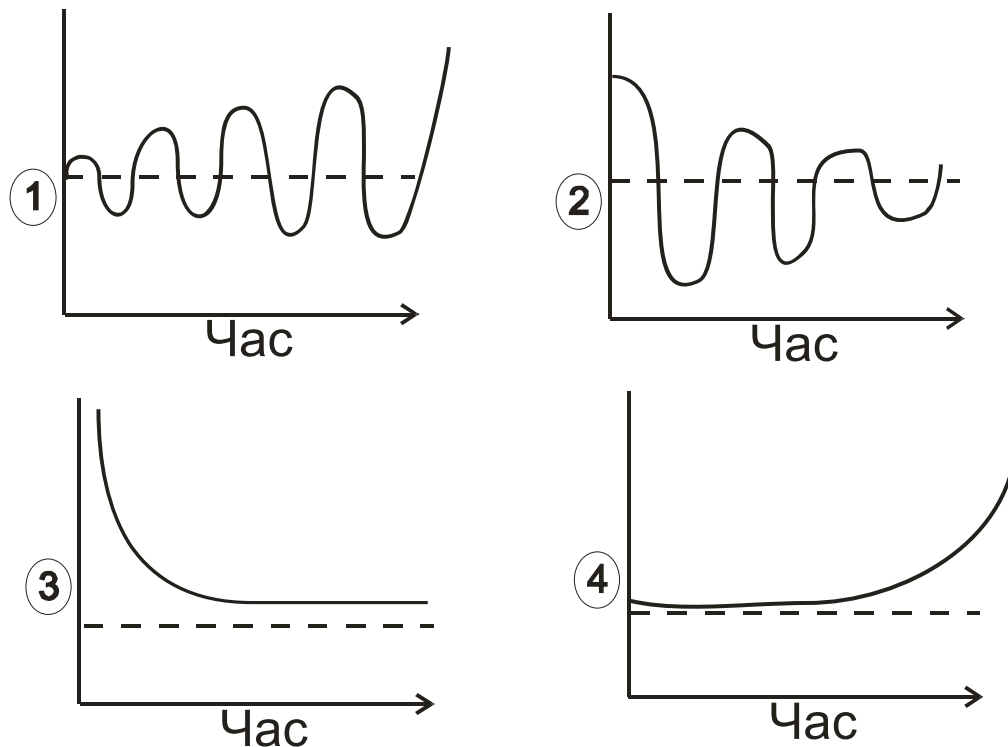


Рисунок 2.31 – Відхилення від рівноваги екосистеми відносно точки спокою

Розглянемо таке співвідношення:

$$X_{n+1} = X_E + k \cdot (X_n - X_E). \quad (2.12)$$

Це рівняння показує значення перемінної X_{n+1} у $n+1$ поколінні, яку визначили через її значення X_n в n -му поколінні, а також через сталі – K , X та E . Рівноважне значення перемінної $X_n = X_E$.

Якщо записати рівняння таким чином:

$$X_n = X_E + x_n \quad (2.13)$$

де x_n – це міра різниці між лінійним значенням X_n та його рівноважним значенням X_E , тоді $x_{n+1} = Kx_n$.

У цьому разі, якщо $K < -1$, то спостерігається перший тип коливань:

$-1 < K < 0$ – другий тип;

$0 < K < 1$ – третій тип;

$K < -1$ – четвертий тип.

Таким чином, якщо K монотонно (зростає) змінюється, то поведінка системи може бути з такими змінами:

РК → ЗК → ЕН → ЕВ, якщо зростає;

РК ← ЗК ← ЕН ← ЕВ, якщо зменшується.

Цими чотирма категоріями вичерпуються типи поведінки, які можливі для лінійних систем. Лінійні рівняння адекватно описують поведінку системи лише за умови невеликих відхилень від положення рівноваги.

Для опису більш складних типів поведінки використовують нелінійні системи.

Причиною того, що характеристики динамічної стійкості системи не

завжди залишаються сталими, полягає у тому, що така система безперервно відчуває збудження ззовні. В такому разі можливі нерегулярні коливання фактичних величин навколо рівноважних значень.

Екосистема таксономічно стабільна, якщо склад видів, що входять до неї, залишається незмінним упродовж тривалого проміжку часу.

Екосистема динамічно стабільна, якщо відносна чисельність представників різних видів упродовж тривалого часу або залишається незмінною, або регулярно повертається до одного й того самого співвідношення, тобто стабільна властивість відносна, а не абсолютна.

Таким чином, можна зробити висновок, що процеси зворотних змін в екосистемах тісно пов'язані зі станом динамічної рівноваги, механізм якого розглянемо далі.

2.8 Стійкість, стабільність та самоочищення екосистем

2.8.1 Механізми стійкості екологічних систем

Стійкістю називається властивість системи зберігати притаманні їй риси та особливості за умов впливу факторів, що виводять систему з рівноваги.

Ступінь досягнутої стабільності досить різноманітний і залежить як від жорсткості навколишнього середовища, так і від ефективності внутрішніх механізмів управління.

Розрізняють два типи стійкості – пружну і резистентну.

Пружна стійкість – система у відповідь на збурювальний вплив виходить зі стану рівноваги, але повертається до вихідного стану з припиненням дії цього чинника.

Чудовою ілюстрацією пружної стійкості можуть бути пірогенні угруповання. Час від часу вони практично знищуються внаслідок пожеж, але досить швидко відновлюються. Каліфорнійські зарості чапаралю після пожежі поновлюються повністю за кілька років.

Одним із різновидів пружної стійкості є екосистеми імпульсної стабільності. Саме їх існування базується на значних коливаннях. Це, зокрема, екосистеми тимчасових водойм.

Резистентна стійкість – система тримається до певної межі (певних значень) збурювального фактора, але коли його значення перевищать певну межу – виходить зі стану рівноваги, до якого вже може не повернутися навіть після повного припинення збурювального впливу. Так, каліфорнійські секвойні ліси досить стійкі до пожеж (товстий шар кори тощо), однак під час згорання лісу він відновлюється вкрай повільно або ж не відновлюється зовсім.

Для кількісної характеристики стійкості екосистеми (чи біосистеми) необхідно оцінити силу впливу на системи якогось чинника і зміни у системі у відповідь на цей вплив. Так, при резистентній стійкості вивчаємо, за якого інтервалу температур система зберігає притаманні їй структурно-функціональні особливості. Так, гомойотермні тварини мають відносно сталу температуру в

широкому діапазоні температур зовнішнього середовища. Це має дуже важливе практичне значення в екологічному прогнозуванні. Часто доводиться прогнозувати зміни в екосистемах у відповідь на різні антропогенні навантаження. Це і є, по суті, оцінкою стійкості екосистем при різних впливах на них. На екосистемному рівні стійкість знаходить свій прояв у відносно постійному рівні вуглекислоти в атмосфері. У відповідь на зростання концентрації двоокису вуглецю активізуються процеси фотосинтезу (відзначимо, що сучасний рівень вуглекислого газу є лімітуючим продуктивність рослин фактором), а частина, розчиняючись у воді, зв'язується карбонат-бікарбонатною системою. Але якщо буферна ємність вичерпана, регуляція істотно порушується.

Для пружної стійкості кількісною характеристикою слугує сила впливу, після припинення якого система здатна повернутися до вихідного стану, а також швидкість, з якою система повертається до попереднього стану.

Гомеостаз – здатність біологічних систем до саморегуляції при зміні умов навколишнього середовища; для організму збереження постійності внутрішнього середовища організму і стійкість основних фізіологічних функцій при зміні зовнішніх умов. Підтримка гомеостазу – неодмінна умова існування як окремих клітин і організмів, так і цілих біологічних співтовариств й екосистем.

Концепція гомеостазу екосистеми в екології була розроблена Ф. Клементсом. Рівновага в екосистемах підтримується процесами зі зворотним зв'язком. Гомеостаз – це здатність популяції або екосистеми підтримувати стійку динамічну рівновагу в змінних умовах середовища.

Поняття гомеостазу широко використовується в екології для характеристики стійкості різних систем. Гомеостаз клітки визначається специфічними фізико-хімічними умовами, відмінними від умов зовнішнього середовища. Гомеостаз багатоклітинного організму – обумовлений підтримкою сталості внутрішнього середовища. Константами гомеостазу тварин є об'єм, склад крові та інших рідин організму. Гомеостаз популяції визначається підтримкою просторової структури, щільності й генетичної різноманітності. Внаслідок гомеостатичної регуляції підтримуються сталість складу і чисельності популяцій у співтовариствах. На рівні екосистем гомеостаз виявляється в найбільш стійких формах взаємодії між видами, що виражається в пристосованості до особливостей середовища і підтримці циклів кругообороту біогенів. Можна розглядати навіть гомеостаз біосфери, в якій взаємодія різноманітних організмів підтримує сталість газового складу атмосфери, склад ґрунтів, складу і концентрації солей Світового океану та ін.

Загалом **стійкість екосистем** можна визначити як здатність геосистем активно зберігати свою структуру і характер функціонування у просторі та часі під час дії змінних умов зовнішнього середовища.

У відповідь на зовнішні дії системи можуть:

- а) не реагувати на дії;
- б) змінюватися, але в межах інваріанта (інваріантний – незмінний);
- в) зазнавати порушення структури і виходити за межі інваріанта.

Після виходу за межі інваріанта система в одних випадках може відновити свій колишній стан, в інших це повернення неможливе.

Відсутність реакції екосистеми на зовнішню дію може бути пов'язана з її низькою чутливістю до цього виду дії через слабкі внутрішньосистемні зв'язки або значний незбіг характерного часу чинника, що впливає на системи, і самої системи. У цьому разі логічніше говорити про *псевдостійкість*, оскільки екосистема залишається незмінною, тому що вона просто не випробовує дії.

Якщо екосистема залишається в межах інваріанта, можна говорити про стійкість у класичному вигляді. Коли система виходить за межі інваріанта, то надалі вона повертається в колишній стан або перестає існувати в колишньому вигляді, оскільки зміна інваріанта – це формування нової системи.

Відновлюваність – це здатність системи повертатися до первинного стану після виходу з нього під впливом зовнішнього чинника. Час відновлення первинного стану системи може бути різним: від кількох годин (наприклад, відновлення нормального стану атмосфери після залпового атмосферного викиду забруднювальних речовин) до багатьох сотень років (наприклад, відновлення ландшафтів субполярного поясу після їх антропогенної деградації).

Якщо відновлення екосистеми не відбувається, це означає, що її запас стійкості був недостатнім.

Особливий характер має такий вид стійкості екосистем, як *здатність до самоочищення від забруднення*. Він вирізняється не за характером, механізмами стійкості, а за виглядом дії. Здатність до самоочищення від забруднень може бути віднесена до пружності (якщо забруднення не зумовило великих перебудов у екосистемі) або до відновлюваності (якщо забруднення призвело до виходу екосистеми за межі інваріанта).

Виокремлені форми та види стійкості систем посідають певне місце в системі складних механізмів забезпечення стійкості екосистем під час дії зовнішнього чинника, а також відіграють певну роль у формуванні стійкості кожної конкретної системи. Тобто можна говорити про існування співвідношення між формами стійкості систем і зовнішніми навантаженнями.

Ці закономірності мають велике значення під час завдання нормування антропогенних дій і їх екологічного контролю. Норми повинні бути диференційовані залежно від того, яку форму (вигляд) стійкості потрібно зберегти (реалізувати) при певному виді функціонального використання екосистеми. Так, якщо розглядати як норму гранично-дозволену концентрацію (ГДК) викиду SO_2 у межах селітебної зони, то вплив цієї забруднювальної речовини в межах ГДК не призведе до істотного впливу на здоров'я людей. Проте забруднення хвойного лісу навіть у межах ГДК діоксидом сірки призведе до порушення лісової екосистеми через те, що хвойні дерева мають інший з людиною поріг чутливості і норма за цією забруднювальною речовиною становитиме в 2,5 рази менше, ніж для людини. Із цього прикладу зрозуміло, що на різні функціональні одиниці екосистеми різні забруднювальні речовини та інші антропогенні фактори (шум, електромагнітні поля тощо) мають різний вплив, а ослаблення одного з елементів системи може призвести до

перерозподілу функцій серед елементами в системі, їх порушення і зміщення балансу речовин і енергії в системі в цілому.

Усі біо- та екосистеми є саморегулювальними системами зі здатністю до самоорганізації та накопичення негентропії.

В основі регуляції будь-яких процесів лежить механізм зворотного зв'язку. Якщо вихідні параметри системи впливають на вхідні, то система регулюється петлею зворотного зв'язку. Якщо зростання вихідних параметрів призводить до зростання вхідних, спостерігається позитивний зворотний зв'язок, у протилежному разі – негативний. Реалізований механізм негативного зворотного зв'язку ми маємо нагоду спостерігати в будові механізму регуляції рівня води в надунітазному бачку. Коли рівень води в ньому сягає мінімуму (при спусках води), максимально відкривається отвір, з якого наповнюється водою бачок. У міру його наповнення поплавки піднімаються і через важіль зменшує отвір водотічного сифона, аж поки не закрийє його зовсім. Тобто чим вищий рівень води в бачку, тим повільніше йде його наповнення водою, і нарешті при певному рівні течія води припиняється.

Позитивний зворотний зв'язок можна спостерігати на пожежах – чим більше полум'я охоплює довкілля, тим швидше воно поширюється, аж поки не вигорить усе, що може горіти, після чого пожежа припиняється.

Стосовно живої матерії, то позитивний зворотний зв'язок спостерігається при j-подібному рості популяції, при спалахах чисельності видів, при пандеміях тощо.

Негативний зв'язок спостерігається на кожному кроці – збільшення щільності популяції вище певного рівня призводить, як правило, до зниження темпів росту особин і темпу збільшення популяції в цілому. Так, при S-подібному рості популяції 3-тя і 4-та фази росту є взірцями негативного зворотного зв'язку; він покладений також в основу регуляції ферментативної активності, різноманітних фізіологічних процесів тощо. Так, активний розвиток фітопланктону призводить до зменшення проникненості світла, внаслідок чого сповільнюється подальший його розвиток. Внесення в ґрунт азотних добрив значною мірою інгібує активність азотфіксаторів. Часто неврахування механізмів саморегуляції спотворює результати екологічних досліджень. Так, при визначенні продукції за склянковим методом, відразу після того як вода опиняється в замкненому просторі, запускаються механізми регуляції фотосинтетичної активності: концентрація CO_2 зменшується, як і концентрація всіх біогенів, що використовуються в процесі фотосинтезу, що неминуче знижує активність фотосинтетичної діяльності рослин; з іншого боку, зростання концентрації кисню, у свою чергу, інгібує фотосинтез. Крім того, як показано експериментами з радіоактивними мітками, навколо фітопланктону протягом кількох хвилин чи навіть секунд утворюється простір, позбавлений біогенів, що відразу блокує фотосинтез: у природних умовах це компенсується турбулентністю водних мас, переміщенням фітопланктону, потоком метаболітів від зоопланктерів тощо. Таким чином, чим вищий рівень фотосинтезу, тим істотніше спотворюються результати його вимірів за методом світлих і чорних склянок.

Згідно із законом Ле-Шательє – Брауна будь-яке відхилення параметрів системи від рівноважного їх стану запускає механізми, що стабілізують стан системи.

На популяційному рівні вкрай важливий механізм регуляції розмірної структури ґрунтується на виділенні гідробіонтами видоспецифічних екзометаболітів – речовин, що істотно впливають на темп росту представників свого виду і майже не впливають на особин іншого виду. Це явище детально досліджене на молодняку риб, личинках амфібій тощо. В усіх випадках при певній концентрації організмів спостерігається максимальний темп росту, причому значно вищий, ніж при меншій концентрації організмів (типовий позитивний зворотний зв'язок. Подальше зростання щільності особин призводить до значної диференціації в розмірах та темпі росту: група особин, що виділяються великими розмірами, має значно вищий темп росту, ніж більшість особин. Причому якщо цих великих представників вилучити, то їх місце тут же займуть інші особини із дрібних. Але якщо дрібні та великі просторово розмежовані (знаходяться в різних акваріумах, але вода циркулює між ними, то різниця в рості та його темпах зберігається) – тут ми маємо, з одного боку, негативний зворотний зв'язок (оскільки в цілому темп росту значно сповільнюється), а з іншого – «спробу» популяції шляхом диференціації свого розмірного складу уникнути гострої конкуренції за трофічні ресурси (аж до канібалізму з боку великих особин).

Досить цікавими є механізми регуляції метаболічних процесів у пойкилотермних тварин. Вважається, що «холоднокровні» тварини мають таку температуру тіла, як температура зовнішнього середовища. Частково це так, хоч добре відомо, що у комах у польоті температура тіла значно вища від температури навколишнього повітря.

Крім того, багато які пойкилотермні істоти в різний час доби залежно від свого фізіологічного стану обирають певні ділянки з тією чи іншою температурою. Так, рептилії люблять погрітися на сонечку. Але значно менше відомо, що риби також істотно змінюють рівень свого метаболізму, перебуваючи в певних горизонтах води з різною температурою.

Прагнення до більш теплих ділянок після споживання їжі притаманне багатьом рептиліям, амфібіям і риbam, що сприяє активації процесів травлення і пришвидшує метаболічні процеси в цілому. З іншого боку, для риб показано значення переміщення в більш холодні горизонти води для більш економного використання наявних кормових ресурсів (шляхом зниження рівня метаболізму в умовах більш низьких температур).

На екосистемному рівні регуляція знаходить свій прояв і в екологічній сукцесії – й авто- і гетеротрофна сукцесії йдуть у напрямку досягнення термодинамічної рівноваги системи, коли вся доступна системі енергія (енергія, асимільована системою) йде на підтримання її впорядкованості. Тобто величина чистої продукції системи прагне до нуля, а вся енергія йде на підтримання негентропії.

Це проявляється й у взаємозв'язку речовинно-енергетичних і інформаційних процесів в екосистемі. Стабільність системи забезпечується їх

збалансованістю та узгодженістю.

Кількісною характеристикою регуляторних можливостей системи є порівняння відносних змін екологічного фактора та параметрів системи. Так, оцінюючи можливість осморегуляторних механізмів, ми порівнюємо зміну солоності (у скільки разів) і концентрації солей у тканинних рідинах організму. На екосистемному рівні можна порівнювати рівень освітленості й рівень фотосинтезу, ступінь забруднення середовища (концентрацію забруднювальних речовин) і значення найбільш вагомих параметрів екосистеми – інформаційних, речовинно-енергетичних.

Антропогенний і техногенний вплив на екосистему здатний викликати деградацію її компонентів або їх сполук (руйнування або істотне порушення природних екологічних зв'язків, що зумовлюють обмін речовин та енергії у межах геоекосистеми). Деградація структури системи загалом – крайній ступінь зміни, що виявляється у суцільній втраті здатності відповідної території виконувати відновні функції. Суцільна деградація починається з деградації одного компонента і поступово охоплює всі інші. Так, найчастіше негативні зміни ландшафту починаються з деградації ґрунтів унаслідок забруднення, потім за ланцюговою реакцією зазнає змін фітоценоз і залежні від нього консументи тощо. Саме тому, що все зв'язано з усім, зміни компонентів екосистеми внаслідок антропогенного впливу необхідно розглядати комплексно.

Вплив антропогенних чинників на екосистеми багатоплановий.

За обсягом викидів одне з перших місць посідають автотранспорт і теплоенергетика, поставляючи в атмосферу продукти згорання викопного палива (вугілля, нафти, газу) і їх похідних (мазуту, бензину та ін.). Основні забруднювачі – оксиди вуглецю й азоту, сірчистий ангідрид, пил, нафтопродукти, токсичні важкі метали (свинець, кадмій, ртуть, цинк та ін.) і поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ).

Особливо високі концентрації важких металів у викидах та осадах очисних споруд гальванічних виробництв, де концентрація кадмію, вісмуту, олова і срібла в тисячі, а свинцю, міді, хрому, цинку і нікелю – в сотні разів вища за кларки літосфери. Високими кларками концентрації характеризуються також підприємства з переробки кольорових металів, машинобудівні та металообробні заводи, інструментальні цехи, пил яких вирізняється найширшою асоціацією забруднювачів – до них належать вольфрам, сурма, кадмій, ртуть, свинець, вісмут, олово, мідь, срібло, цинк і миш'як. Окремі виробництва мають свої специфічні забруднювачі (зварювання і виплавлення спецсплавів – марганець; переробка брухту кольорових металів – миш'як; металообробка – ванадій; виробництво нікелевого концентрату – нікель, хром, кобальт; алюмінію – алюміній, берилій, фтор та ін.).

Нафтопереробна, нафтохімічна промисловість викидає в довкілля головним чином газоподібні сполуки (оксиди азоту, вуглецю, діоксид сірки, вуглеводні, сірководень, хлористі й фтористі сполуки, феноли та ін.), вміст яких іноді в десятки і сотні разів перевищує їх гранично допустимі концентрації (ГДК) в атмосфері. Деякі хімічні виробництва, крім газів, викидають в довкілля

багато мікроелементів.

Будівництво відрізняється загалом меншими концентраціями хімічних елементів у відходах. Серед підприємств будівельних матеріалів великим техногенним навантаженням на середовище вирізняються цементна промисловість, виробництво вогнетривкої цегли і теплоізоляційних виробів, у пилу яких є сурма, свинець, срібло, іноді ртуть.

За ступенем концентрації і комплексом хімічних елементів– забруднювачів комунально-побутові відходи (побутове сміття, каналізаційні осади, мули міських очисних споруд) не поступаються промисловим відходам.

Звалища також є вторинними джерелами забруднення довкілля. На деяких із них за багато років накопичуються великі маси різноманітних побутових, а іноді й промислових відходів. Ґрунти звалищ і фільтрати у десятки і сотні разів порівняно з фоновими ґрунтами збагачені цинком, міддю, оловом, сріблом, свинцем, хромом та іншими елементами. Розвіювання матеріалу звалищ і просочування стоків призводять до забруднення навколишніх ґрунтів, поверхневих і підземних вод.

За законами техногенної міграції забруднення одного з компонентів ландшафту впливає на хімічний стан усіх інших, зумовлюючи їх забруднення.

Стійкість екосистеми до антропогенно-техногенного впливу визначається її здатністю протистояти цьому впливу та зберігати нормальне функціонування (здатність до відновлення після припинення техногенного впливу та повернення зі зміненого стану до нормального режиму функціонування).

Відновлення та самоочищення компонентів екосистем – початкова фаза відновлення і біогенезу, і природних ресурсів. Актуальність питань відновлення та самоочищення екосистем пов'язана із глобалізацією антропогенно-техногенного впливу на довкілля та потреби побудови науково обґрунтованих відносин з довкіллям. Це усвідомлення антропогенно-техногенної стійкості ландшафту порушує питання про її оптимізацію. Оптимізація цих процесів базується на результатах моніторингу та геоекологічному прогнозуванні стану довкілля.

Завдання ландшафтно-екологічного прогнозування – узагальнення інформації про рівень стійкості геосистем, умови та динаміку процесів самоочищення. Однак отримання саме цієї інформації є найскладнішою і недостатньо розробленою частиною прогнозування. Складність питання полягає у визначенні комплексного граничного стану ландшафту, що є межею його можливостей до самоочищення та збереження всіх популяцій живих організмів за умов відновлення ландшафту. Комплексність її оцінки в межах ландшафту полягає і в потребі врахування стану біотичного та абіотичних складників кожного компонента ландшафту і всіх векторів антропогенно-техногенного впливу, враховуючи їх синергізм.

Поняття стійкості ландшафту до антропогенно-техногенного навантаження в межах того чи іншого виду господарської діяльності стикається з визначенням межі екологічного ризику ландшафту. Існує мінімальна величина зовнішнього впливу, що зумовлює відмову екосистеми, – це

потенціал саморегуляції природно-територіального комплексу або ландшафту.

Стійкість екосистем до антропогенних змін залежить від часу та масштабу природокористування та їх змін, а також від сучасних природних екзогенних, геохімічних, гравітаційних та інших процесів. Стійкість системи у загальнотеоретичному випадку визначається за формулою (Шищенко, Гродзинський):

$$S_t = \sqrt{P_s - T/t}, \quad (2.14)$$

де S_t – стійкість систем до чинника на момент часу t (t' , t'' та інші);

P_s – потенціал саморегуляції – максимальне значення надійності системи;

T – енергія потенціалу саморегуляції P_s , що витрачається у момент часу t на стабілізацію геосистем.

Схема оцінки стійкості геосистем урахує зміни параметрів у часі (рис. 2.32).

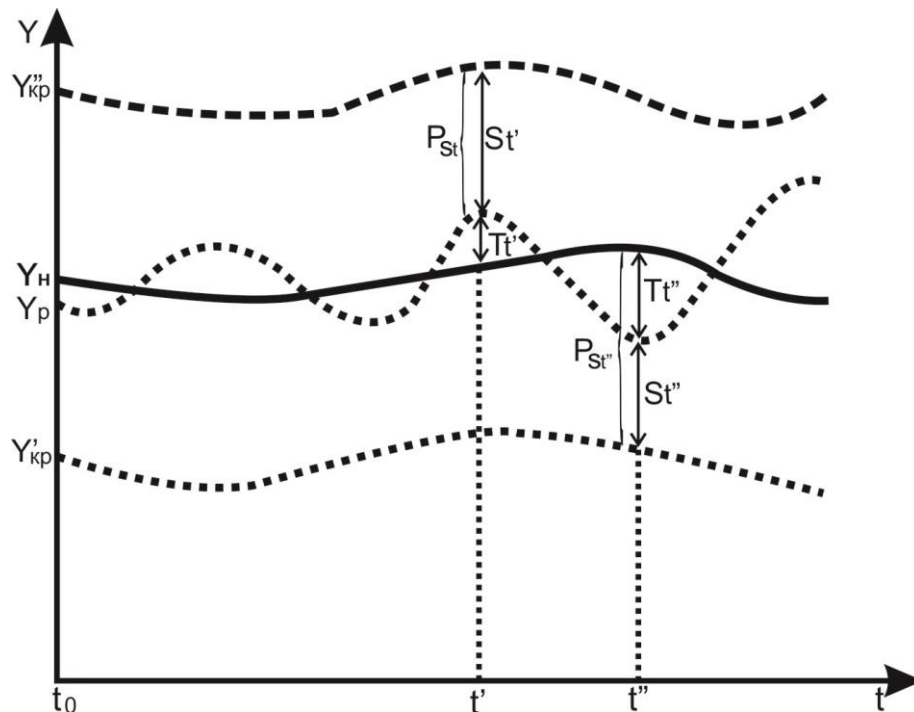


Рисунок 2.32 – Графічне визначення стійкості геосистем до чинника антропогенно-техногенного тиску (за Шищенком, Гродзинським): t – час розвитку геосистеми; $Y''_{кр}$, $Y'_{кр}$ – критичні значення дослідженого параметра Y у часі; Y_n , Y_p – нормальне та реальне значення параметра Y у часі; $S_{t'}$, $S_{t''}$ – потенційна саморегуляція геосистеми на моменти часу t' і t'' ; $P_{St'}$ та $P_{St''}$ – стійкість геосистеми до фактора антропогенно-техногенного тиску на моменти часу t' і t'' ; $T_{t'}$ і $T_{t''}$ – енергія потенціалу саморегуляції P_s , що витрачається на моменти часу t' і t'' на стабілізацію геосистем

Існує багато підходів до визначення граничного рівня можливостей ландшафту до самоочищення та збереження всіх компонентів. Приклад таких оцінок – гранично допустимі концентрації хімічних елементів та групування їх у класи небезпечності за Держстандартом 17.4.1.02–83 «Охорона природи.

Ґрунти. Класифікація хімічних речовин для контролю забруднення».

Загальнотеоретична неінформативність цих характеристик полягає в «аландшафтному» підході до їх визначення. ГДК не враховують головного принципу техногенної міграції – когерентності, тому цілком виправданим є уявлення більшості дослідників про їх недостовірність.

Визначення *меж техногенного екологічного ризику*, що є найістотнішим компонентом визначення межі деградації ландшафту, пов'язане передусім з кількісними параметрами хімічного складу його компонентів (в ідеальному варіанті) або таксономічними угрупованнями ландшафтів природного ряду міграції (не порушених техногенними процесами), які прийнято називати *фоновими*.

Визначення *фонових характеристик компонентів* ландшафтів – одне з актуальних питань усіх напрямів екології, але вирішити його можна лише в межах екологічної геохімії.

Перевищення *достовірного фонового рівня* хімічного показника (фізико-хімічних характеристик, бактеріологічних параметрів, мікро- або макроелементів та ін.) і одного, і цілого комплексу вказує на перехід ландшафту зі стану природного з біогенним рядом міграції до природно-техногенного або суто техногенного з техногенним рядом міграції.

Розраховані на окремих територіях фонові характеристики ландшафтів за методом аналогії переносять на ландшафти території дослідження. Виникнення похибки у розрахунках найчастіше пов'язане, по-перше, з неврахуванням атмосферних викидів, по-друге – з недостатньою деталізацією ландшафтної та ландшафтно-геохімічної структури, що може зумовити некоректне використання методу аналогій і недостатню достовірність кінцевих результатів ландшафтно-екологічних досліджень.

Один із різновидів стійкості – самоочищення екосистем від забруднення.

2.8.2 Самоочищення екологічних систем

Самоочищення – сукупність природних процесів знешкодження речовин, елементів і домішок, що потрапили у довкілля або живі організми. Тривалість у часі самоочищення змінюється в широких інтервалах залежно від характеру біотичного та абіотичного складників біогеоценозу – у бідних екосистемах Півночі самоочищення відбувається дуже повільно. Самоочищення геосистеми посилюється з підвищенням температури повітря і є вищим у південних ландшафтах. З поступовим глобальним накопиченням забруднювачів буферна місткість ландшафту поступово знижується. До багатьох нових стійких техногенних забруднювачів, які не відомі живій речовині ландшафту, самоочищення може бути відсутнім.

Самоочищення екосистеми – це сукупність процесів механічної, хімічної, фізико-хімічної та біологічної нейтралізації або виведення забруднювачів. Цей процес відбувається під час перенесення речовини у з'єднанні системи або міграції трофічними ланцюгами, включаючи мінералізацію їх організмами – редуцентами й органічними кислотами ґрунтового комплексу.

Потрібно усвідомлювати різницю між загальним самоочищенням біогеоценозу й окремого його компонента. Початкові, а можливо, і всі етапи самоочищення компонента біогеоценозу відбуваються в межах певного ландшафту – тобто забруднювачі частково або повністю, змінюючи форму міграції, переходять у сполучені компоненти ландшафтів і далі – у сполучені ландшафтні системи.

Самоочищення ландшафту відбувається за законами геохімічної міграції. Його напрямки та кількісні параметри визначаються внутрішніми та зовнішніми чинниками міграції. Рівень можливого самоочищення ландшафту визначають за буферною місткістю його компонентів щодо забруднювача або їх комплексу. *Буферну місткість ландшафту* визначають як здатність ландшафту протистояти забрудненню і вимірюють за кількістю забруднювача, яку ландшафт може поглинути без істотних негативних наслідків для себе.

Теоретичною базою для дослідження самоочищення ґрунтів вважають «Вчення про поглинальну здатність ґрунтів» Гедройца. У складі сумарної поглинальної здатності ґрунтів автор розрізняє чотири типи здатності ґрунту до поглинання: механічну, фізичну (зумовлену глинистістю ґрунту), фізико-хімічну (обмінну органічну та мінеральну), хімічну (утворення важкорозчинних сполук у ґрунтовому комплексі). Практичні питання самоочищення ґрунтів України нині вирішують у межах наукових програм з оцінки буферності, екогеохімічного стану ґрунтів або їх автореабілітації.

Буферність ґрунту та природних вод може визначатися їх здатністю зберігати кислотно-лужну реакцію середовища (рН) під впливом фіксованої найвищої кількості забруднювача.

Самоочищення ґрунтів зумовлюють процеси фізико-хімічної водної та біогенної міграції. Теоретичним обґрунтуванням здатності ґрунту до самоочищення більшість дослідників вважає теорію геохімічних бар'єрів Перельмана. Рівень самоочищення ґрунту зростає зі зростанням інтенсивності процесу геохімічного фізико-хімічного розсіювання. Кількісний рівень розсіювання можна оцінити коефіцієнтами та кларками ґрунтового розсіювання – відношенням вмісту в ґрунтоутворювальній породі та кларка елемента у ґрунтах до вмісту у ґрунтовому горизонті. Ступінь розсіювання пропорційний рухомому елементу в ґрунті й відповідно інтенсивності самоочищення ґрунтового горизонту.

Самоочищення атмосфери відбувається за законами механічної повітряної міграції через перенесення на інші території та осідання на поверхні природних вод, рослин, ґрунтів.

Розсіювання в атмосфері поллютантів, що викидаються з димарів і вентиляційних пристроїв, підлягає законам турбулентної дифузії. На процес їх розсіювання істотно впливають такі чинники: стан атмосфери, фізичні й хімічні властивості речовин, що викидаються, висота і діаметр джерела викидів, розташування джерел, рельєф місцевості. Розподіл концентрації забруднювальних речовин в атмосфері під факелом точкового джерела наведений на рис. 2.33.

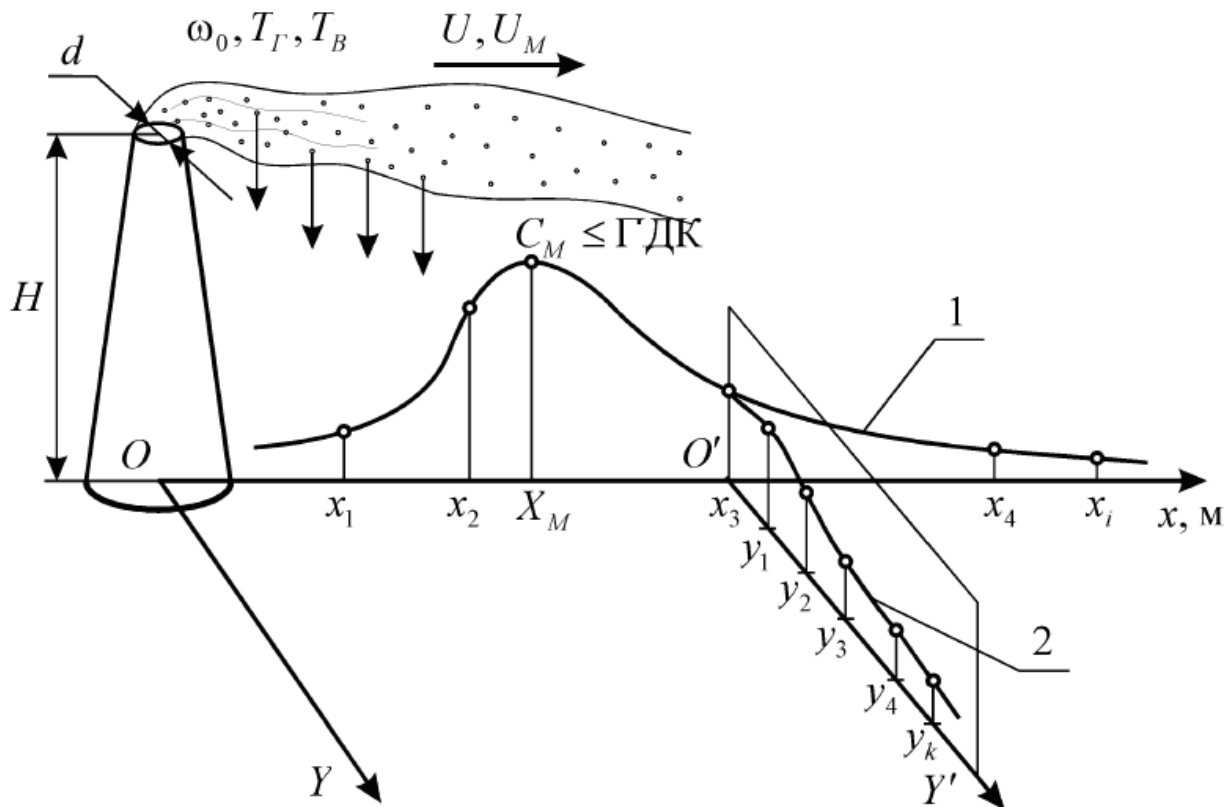


Рисунок 2.33 – Розподіл концентрації забруднювальних речовин в атмосфері під факелом точкового джерела: 1 – розподіл концентрацій поллютантів по осі викиду; 2 – розподіл концентрацій поллютантів перпендикулярно до осі викиду

Зона задимлення найбільш небезпечна. Розміри зони задимлення залежно від метеоумов перебувають у межах 10–50 висот димаря.

Усередині зони перекидання факела високі концентрації забруднювальних речовин існують за рахунок неорганізованих викидів.

Розсіювання в атмосфері газоподібних домішок і дрібнодисперсних твердих частинок (діаметром менше 10 мкм), що мають незначну швидкість осідання, підлягає одним і тим самим закономірностям. Для більших частинок пилу ця закономірність порушується, оскільки швидкість їх осідання під дією сили тяжіння зростає.

Оскільки в пилогазоочисних апаратах великі частинки вловлюються ефективніше, ніж дрібні, у викидах, що зазнали очищення, залишаються лише дрібні частинки, їх розсіювання в атмосфері розраховують так само, як і розсіювання газоподібних домішок.

Метеоумови істотно впливають на перенесення і розсіювання домішок в атмосфері. Найбільший вплив чинять режим вітру і температури (температурна стратифікація), осідання, тумани, сонячна радіація.

Вітер може по-різному впливати на процес розсіювання домішок залежно від типу джерела і характеристики викидів. Якщо гази, що відходять, перегріті щодо навколишнього повітря, то вони мають початкову висоту піднесення. У зв'язку з цим поблизу джерела створюється поле вертикальних швидкостей, що сприяють підніманню факела і віднесенню домішок вгору. Це зумовлює

зменшення концентрацій домішок у ґрунті. Концентрація спадає і за дуже сильних вітрів, проте це відбувається за рахунок швидкого перенесення домішок у горизонтальному напрямі. Внаслідок цього найбільші концентрації домішок у приземному шарі формуються при деякій швидкості, яку називають *небезпечною*.

За низьких або холодних джерел викидів підвищений рівень забруднення повітря спостерігається під час слабких вітрів ($U = 0-1$ м/с) унаслідок скупчення домішок у приземному шарі. Прямий вплив на забруднення повітря в місті надає напрямок вітру. Збільшення концентрації домішок спостерігається тоді, коли переважають вітри з боку промислових об'єктів.

Якщо температура навколишнього повітря знижується з висотою, нагріті струмені повітря піднімаються вгору (конвекція), а замість них опускаються холодні. Такі умови називаються конвективними.

Якщо вертикальний градієнт температури буде від'ємним (температура зростає з висотою), то потік, що вертикально піднімається, стає холоднішим за навколишні маси, і його рух згасає. Такі умови називаються інверсійними.

Якщо підвищення температури починається безпосередньо від поверхні землі, інверсію називають приземною, якщо ж із деякої висоти над поверхнею землі – підведеною. Інверсії ускладнюють вертикальний повітрообмін і розсіювання домішок в атмосфері.

Тумани на вміст забруднювальних речовин в атмосфері впливають таким чином. Краплі туману поглинають домішку не лише поблизу підстилювальної поверхні, а й із розміщених вище, найбільш забруднених шарів повітря. Внаслідок цього концентрація домішок сильно зростає в шарі туману і зменшується над ним. Розчинення сірчистого газу в краплях туману призводить до утворення сірчаної кислоти.

Опади очищають повітря від домішок. Після тривалих інтенсивних опадів високі концентрації домішок в атмосфері практично не спостерігаються.

Сонячна радіація зумовлює фотохімічні реакції в атмосфері з утворенням різних вторинних продуктів, що часто мають токсичніші властивості, аніж речовини, що надходять від джерел викидів. Таким чином, відбувається окиснення сірчистого газу з утворенням сульфатних аерозолів.

Самоочищення природних вод – це здатність до перетворення шкідливих сполук на нешкідливі.

Самоочищення водних екосистем є наслідком здатності до саморегулювання. Надходження речовин із зовнішніх джерел – дія, якій водна екосистема здатна протистояти в певних межах за допомогою внутрішньосистемних механізмів. В екологічному сенсі самоочищення є наслідком процесів залучення речовин у біохімічні кругообіги за участі біоти і чинників неживої природи, що надійшли у водний об'єкт. Кругообіг будь-якого елемента складається з двох основних фондів – резервного, утвореного великою масою компонентів, що поволі змінюються, і обмінного (циркуляційного), який характеризується швидким обміном між організмами і місцем їх існування. Всі біохімічні кругообіги можна поділити на два основні типи – з резервним фондом в атмосфері (наприклад, азот) і з резервним фондом

у земній корі (наприклад, фосфор).

Самоочищення природних вод здійснюється завдяки залученню речовин, що надходять із зовнішніх джерел, до процесів трансформації. Внаслідок цього речовини, що надійшли, повертаються до свого резервного фонду.

Трансформація речовин є наслідком різних одночасних процесів, серед яких можна вирізнити фізичні, хімічні й біологічні механізми. Величина внеску кожного з механізмів залежить від властивостей домішок і особливостей конкретної екосистеми.

Фізичні механізми самоочищення. Завдяки процесу газообміну на межі поділу «атмосфера – вода» здійснюється надходження у водний об'єкт речовин, що мають резервний фонд в атмосфері, і повернення цих речовин з водного об'єкта до резервного фонду. Один із важливих окремих випадків газообміну – процес атмосферної реаерації, завдяки якому відбувається надходження у водний об'єкт великої частини кисню. Інтенсивність і напрямок газообміну визначаються відхиленням концентрації газу у воді від концентрації насичення C_S . Величина концентрації насичення залежить від природи речовини і фізичних умов у водному об'єкті – температури та тиску. При концентраціях, більших C_S , газ випаровується в атмосферу, а при концентраціях, менших C_S , газ поглинається водною масою.

Сорбція – поглинання домішок завислими речовинами, донними відкладеннями і поверхнями тіл гідробіонтів. Найенергійніше сорбують колоїдні частинки й органічні речовини, що перебувають у дисоційованому молекулярному стані. В основі процесу лежить явище адсорбції. Швидкість накопичення речовини в одиниці маси сорбенту пропорційна його ненасиченості щодо цієї речовини, концентрації речовини у воді та обернено пропорційна вмісту речовини в сорбенті. Приклади нормованих речовин, здатних до сорбції, – важкі метали та поверхнево-активні речовини (ПАР).

Водні об'єкти завжди містять деяку кількість зважених речовин неорганічного й органічного походження. Осадження характеризується здатністю зважених частинок випадати на дно під дією сили тяжіння. Процес переходу частинок із донних відкладень у зважений стан називається каламученням. Він відбувається під дією вертикальної швидкості турбулентного потоку.

Хімічні механізми самоочищення. *Фотоліз* – перетворення молекул речовини під дією світла, що поглинається ним. Окремими випадками фотолізу є фотохімічна дисоціація – розпад частинок на кілька простіших і фотоіонізація – перетворення молекул на іони. Із загальної кількості сонячної радіації близько 1 % використовується у фотосинтезі, від 5 до 30 % відбивається водною поверхнею. Основна ж частина сонячної енергії перетворюється на тепло і бере участь у фотохімічних реакціях. Найбільш дієва частина сонячного світла – ультрафіолетове випромінювання. Ультрафіолетове випромінювання поглинається в шарі води завтовшки близько 10 см, проте завдяки турбулентному перемішуванню може проникати і в глибші шари водних об'єктів. Кількість речовини, що піддалася дії фотолізу, залежить від виду речовини і її концентрації у воді. З речовин, що надходять у водні об'єкти,

порівняно швидкому фотохімічному розкладанню піддаються гумусні.

Гідроліз – реакція іонного обміну між різними речовинами і водою. Гідроліз є одним з основних чинників хімічного перетворення речовин у водних об'єктах. Кількісною характеристикою цього процесу є ступінь гідролізу, під яким розуміють відношення гідролізованої частини молекул до загальної концентрації солі. Для більшості солей вона становить кілька відсотків і підвищується зі збільшенням розбавлення і температури води. До гідролізу здатні й органічні речовини. Гідролітичне розщеплювання найчастіше відбувається за зв'язком атома вуглецю з іншими атомами.

Біохімічне самоочищення є наслідком трансформації речовин, здійснюваної гідробіонтами. Як правило, біохімічні механізми роблять основний внесок до процесу самоочищення, і лише за пригнічення водних організмів (наприклад, під дією токсикантів) істотнішу роль починають відігравати фізико-хімічні процеси. Біохімічна трансформація речовин відбувається внаслідок їх залучення в трофічні мережі і здійснюється в перебігу процесів продукції та деструкції.

Таким чином, самоочищення природних вод відбувається за законами фізико-хімічної водної та механічної міграції (хімічне окиснення, розчищення, коагуляція, гідроліз токсикантів і механічне осідання, випаровування та ін.). Зниження концентрації елементів у природних водах завдяки процесам техногенного фізико-хімічного розсіювання у воді зумовлює збільшення їх концентрації у донних відкладеннях і гідробіонтах.

Самоочищення рослинного шару відбувається за законами біогенної міграції. У водоймищах активно діють процеси біогенної міграції за рахунок бактерій, грибів, простіших і тварин, що поглинають і переробляють токсичні речовини. Складність геохімічної структури природних рослинних угруповань зумовлює їх набагато більшу стійкість до техногенного впливу щодо рослин штучних антропогенних ландшафтів. Механізм самоочищення окремих рослин базується на основі фізіологічних бар'єрів – внутрішніх механізмів рослин, здатних обмежувати надходження хімічних елементів до органів рослин і регулювати цикли їх життєздатності. Водночас рослинам властивий потужний «вивідний» апарат, що звільняє їх від надлишків метаболітів (продуктів біохімічних перетворень) через коріння, під час дихання та транспірації. Встановлено, що рослини здатні до транспірації разом із вологою багатьох хімічних елементів, які становлять цілі відсотки їх вмісту рослинної маси. Таким чином, біогенне розсіювання елементів техногенного забруднення призводить до концентрації їх у шарах приземної атмосфери.

Сучасні геоекологічні дослідження, спрямовані на визначення рівня відновлення та самоочищення, ґрунтуються на вивченні та аналізі фізико-хімічних форм існування елементів. Дослідження фізико-хімічних форм існування хімічних елементів у ґрунтах, донних відкладеннях, природних водах нині в Україні вважаються доцільним напрямом для визначення рівня екологічного ризику території.

Самоочищення екосистеми від забруднення визначається трьома групами чинників. До першої групи належать процеси, що визначають

інтенсивність розсіювання і винесення продуктів техногенезу. На регіональному рівні потрібно враховувати кількість атмосферних опадів, швидкість вітру, величину поверхневого і ґрунтового стоку, схили рельєфу і загальну розчленованість поверхні.

На локальному рівні необхідно враховувати характер поверхневого стоку, пов'язаного і з розташуванням ділянки на гіпсометричному профілі, і з властивостями ґрунтового покриву, кори вивітрювання і літології. Зрозуміло, хороша інфільтрація ґрунтів призводить до швидкого винесення забруднень за межі ландшафту, а наявність водотриву сприяє затриманню їх у верхніх шарах ґрунтового покриву. Важливе значення має розташування ділянки.

Вирізняють п'ять основних типів місцеположення. Верхові або плакорні місцезнаходження називаються автономними й елювіальними, що акцентує увагу на їх відносно незалежному положенні. На ці ділянки забруднення з інших місць не надходять з водними потоками. Райони схилів характеризуються транзитними водними потоками, що йдуть із плакорів у долини. Характер накопичення або винесення забруднень великою мірою залежить від індивідуальних особливостей кожної ділянки: його рослинного і ґрунтового покриву, ухилів, характеру літології та ін.

На низинні місця (часто це надзаплавні тераси річок) надходять забруднення, зокрема й під час розвантаження підземних вод. Аквальні ділянки характеризуються надходженням забруднень з усіх точок водозбору, і в цьому сенсі це найбільш схильні до забруднень ділянки.

Заплави займають деяке проміжне місце між низинними та аквальними, оскільки деякий час їх режим функціонування подібний до аквального (під час повені), а решта часу – до низинних ділянок.

У межах різних місцеположень є цікава диференціація. У верхових (плакорних) ділянках вирізняють верхові западини та улоговини. Перші характеризуються відсутністю проточності, що призводить до збільшення ймовірності зростання забруднення. Улоговини хоча й збирають забруднення з певної площі, водночас звільняються від них під час стоку.

Райони схилів також неоднорідні. У нижніх частинах схилів імовірність накопичення забруднень набагато більша, аніж у верхніх частинах.

Друга група чинників контролює можливість та інтенсивність іммобілізації і просторової інактивзації продуктів техногенезу. До них належать умови випадання забруднень (кількість штилів, температурних інверсій і туманів), геохімічна стратифікація ґрунтів, механічний склад ґрунтів, фізико-хімічні властивості фільтрації ґрунтів. На регіональному рівні необхідно враховувати передусім умови випадання забруднень.

Третя група пов'язана з процесами, що визначають інтенсивність перетворень і метаболізму продуктів техногенезу. Ці процеси залежать від сум сонячної радіації, рівня ультрафіолетового випромінювання, сум температур вище 0° і 10°, інтенсивності фотохімічних реакцій, характеристик балансу органічної речовини (біомаси, річного приросту, швидкості розкладання та ін.). Хорошим показником здатності геосистем до самоочищення від забруднень є *опадально-підстильний коефіцієнт* – відношення ваги нерозкладених

органічних рештків, що накопичилися на поверхні ґрунту у вигляді повстини, підстилки або торфу, до ваги органічних решток, які щороку надходять з рослинним опаданням на одиницю площі. Чим більше відношення, тим повільніше відбуваються процеси розкладання органічної речовини, а отже, і менш активно відбуваються процеси розкладання забруднювальних речовин.

Рівень опадально-підстильного коефіцієнта становить для ялинового лісу південної тайги – 10, діброви – 4, степу – від 1 до 15, пустелі та напівпустелі – 1. Швидкість накопичення органічних речовин пропорційна біологічній акумуляції супутніх елементів і обернена відповідно до біологічного розсіювання та самоочищення ландшафту. Таким чином, небезпека забруднення поверхні ґрунту органічними сполуками зростає з півдня на північ. Особливо велика вона для заболочених ґрунтів із торф'яними горизонтами – накопичення торфу свідчить про повільне розкладання органічних решток, термін якого вимірюється тисячоліттями.

Саме третя група чинників пов'язана з процесами, що визначають інтенсивність перетворень і метаболізму продуктів техногенезу. Ці процеси залежать від сум сонячної радіації, рівня ультрафіолетового випромінювання. Вони призводять до реального очищення ландшафтів від забруднень, сприяючи розкладанню речовин, переходу їх у нейтральний стан.

Як приклад розглянемо більш детально механізм самоочищення атмосфери біотехноценозу лісовою екосистемою.

2.9 Системний аналіз самоочищення біотехноценозу

Зі збільшенням щільності населення в містах, індустріалізацією і розвитком транспорту зростає антропогенне навантаження на природні екосистеми, що призводить до руйнівної дії на навколишнє середовище.

Радикальними методами охорони природи від техногенних дій є скорочення виділення шкідливих відходів виробництва, повноцінне очищення викидів, обмеження навантаження на природні екосистеми і підтримку їх здатності до репродуктивності.

Виробництво впливає на природні системи у вигляді позитивного зворотного зв'язку. Так, при спалюванні викопного палива виділяється вуглекислий газ та інші шкідливі домішки, тобто виникає додатковий гетеротрофний компонент. Сукупність функціонуючих на одній території об'єктів техніки і взаємодіючих із ними елементів природного середовища називається біотехноценозом. Проте наземні екосистеми щорічно асимілюють близько 12 % діоксиду вуглецю. Найпродуктивнішими є лісові екосистеми. Дерева здатні поглинути за вегетаційний період 20–25 т/га CO₂ і виділити 15–18 т/га O₂. Відзначимо, що в прирості деревини (на відміну від інших видів рослинності) CO₂ зв'язується на тривалий період.

Значення лісів є глобальним і життєво важливим для всього комплексу екологічних систем Землі, оскільки лісові екосистеми характеризуються найвищою інтенсивністю біологічного кругообігу та володіють найбільшою органічною масою, значення якої постійно зростає. Ліси – акумулятори та носії

енергії, яка бере участь у ході природних процесів і розвитку біосфери. Донедавна вважалося, що лісам як винятково складним екосистемам притаманна висока стійкість до антропогенних навантажень. Однак накопичені останнім десятиріччям дані похитнули оптимістичні концепції про динамічну стійкість лісових екосистем до тривалого поглинання доз речовин-забрудників.

Знеліснення та деградація лісових екосистем є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності. Зменшення площі лісів і зниження їх стійкості залежать не лише від надмірного споживання лісових ресурсів та ступеня забрудненості середовища, а й від економічного розвитку держави та рівня культурного розвитку населення.

Основними причинами довготривалого погіршення стану лісів, їх деградації та загибелі вважаються комплекси природних, антропогенних та соціально-економічних чинників. Дослідження останніх років доводять, що деградація лісів зумовлена комплексами одночасно діючих факторів, які призводять до фізіологічного стресу деревної та чагарникової рослинності.

Дія кожного з чинників – чи природних, чи антропогенних, чи соціально-економічних – призводить до певних негативних наслідків, а сукупний їх вплив посилює дію кожного зокрема.

Величезний позитивний вплив лісів на екологічну ситуацію довкілля очевидний. Екологічна роль лісів характеризується великим різноманіттям, що об'єднуються в такі групи екологічних функцій: глобальну, середовищеутворювальну, середовищезахисну, соціально-екологічну, еколого-релаксаційну та спеціальну.

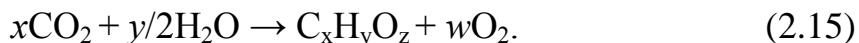
Основними загальними проявами аеротехногенної трансформації лісових екосистем України є:

- підлугування лісового середовища (опадів, ґрунтів, рослинних тканин);
- акумуляція токсикантів у компонентах екосистеми;
- пошкодження асиміляційного апарату;
- вилугування з рослинних тканин і ґрунтів елементів живлення;
- зниження інтенсивності біокругообігу;
- пригнічення біологічної активності ґрунтів;
- зниження приросту стовбурової і кронувої біомаси;
- зменшення диференціації дерев за ростом і розвитком;
- розвиток у підліску азотолюбів;
- геліофітизація і рудералізація паралельно з десильватизацією (остепніння та олучнення) надґрунтового покриву;
- зниження видової різноманітності та рясності мохів і лишайників.

Усі зазначені вище порушення інтегруються у трансформацію структурно-функціональної організації лісової екосистеми, зниження її продуктивності та біологічної стійкості до несприятливих екологічних факторів, що закладає передумови подальшої її дигресії, якщо негативний тиск не неї не знизити до нормативного рівня. У той же час у кожній природній зоні і тим більше при різних типах забруднення (навантажень у цілому) виділяються

свої особливості в реакції лісових екосистем на вплив негативних чинників, що вимагає системного підходу та виваженого аналізу всіх умов екологічної проблеми.

Ліси – найбільший накопичувач сонячної енергії і біологічної маси, одне із джерел кисню на Землі. Завдяки процесу фотосинтезу здійснюється одна з найважливіших функцій лісів – газова, внаслідок чого з атмосфери виводиться вуглекислий газ і надходить кисень. Рівняння фотосинтезу, що описує процес утворення речовини деревини, можна подати в загальному вигляді:



Число атомів С, Н і О (x, y, z), що входять до складу деревини, залежить від породи дерев (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Хімічний склад деревини (% абсолютно сухої ваги)

Деревна порода	С	Н	О	Зольні елементи
Береза	50,2	6,2	43,0	0,6
Бук	50,4	6,2	42,3	1,1
Дуб	50,5	6,3	42,3	0,9
Ялина	50,5	6,2	42,8	0,5
Модрина	50,1	6,3	43,2	0,4
Осика	50,3	6,3	42,6	0,8
Ялиця	50,4	6,0	43,1	0,5
Сосна	49,6	6,4	43,6	0,4

Елементний склад деревини (x, y, z), розраховується виходячи з процентного співвідношення С, Н і О за формулами:

$$x = \frac{C}{A_1}, \quad y = \frac{H}{A_2}, \quad z = \frac{O}{A_3}, \quad (2.16)$$

де С, Н, О – вміст вуглецю, водню та кисню у відповідній породи деревини, %; A_1, A_2, A_3 – атомні маси вуглецю, водню та кисню.

Коефіцієнт w визначається через x, y, z із балансу числа атомів кисню в рівнянні фотосинтезу

$$2x + y/2 = z + 2w, \quad (2.17)$$

отже,

$$w = x + y/4 - z/2. \quad (2.18)$$

Під час розрахунків за рівнянням фотосинтезу необхідно знати масу утворюваної деревини в абсолютно сухій вазі, але в довідковій літературі дані про запаси, приріст деревини даються в кубічних метрах. Перерахунок об'ємів деревини на абсолютно суху вагу виконують за формулою

$$m_{\text{Д}} = PV, \quad (2.19)$$

де $m_{\text{Д}}$ – маса абсолютно сухої деревини, кг; P – густина деревини абсолютно

сухої ваги, кг/м³.

Густина залежить від будови деревини і вмісту в ній екстрактних речовин (смола). Середні значення щільності деревини різних порід наведені табл. 2.6. Знаючи густину деревини, можна розрахувати вміст сухої речовини в об'ємі деревини V , м³.

Таблиця 2.6 – Густина деревини різних порід

Хвойні породи	P , кг/м ³	Листяні породи	P , кг/м ³
Ялина	430	Береза	600
Модрина	570	Бук	680
Ялиця	410	Дуб	650
Сосна	490	Осика	410

Якщо відома кількість речовини деревини (m_d), утвореного в лісі, то за формулами можна визначити кількості поглинених при цьому вуглекислого газу, води і кисню, що виділилися:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{CO}_2} &= (x/100) \text{ (молекулярна маса CO}_2\text{)} m_d; \\
 m_{\text{H}_2\text{O}} &= (y/2 \cdot 100) \text{ (молекулярна маса H}_2\text{O)} m_d; \\
 m_{\text{O}_2} &= (w/100) \text{ (молекулярна маса O}_2\text{)} m_d.
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Часто під час вивчення деревостанів визначають поточний річний приріст $K_{\text{рік}}$, тобто створений за один рік об'єм деревини на площі лісу в 1 га (м³/га·рік). Річний приріст залежить від породи, віку і бонітету деревостанів.

Бонітет (від лат. *bonitas* – доброякісність) – показник продуктивності насаджень, залежний від умов зростання. Виділяють 5 основних класів бонітету: до I класу належать найбільш продуктивні насадження, а до V – найменш продуктивні. Швидкість росту деревостанів збільшується з підвищенням класу бонітету.

У табл. 2.7 наведені значення річних приростів основних лісоутворювальних порід I бонітету.

Таблиця 2.7 – Поточний річний приріст в деревостоях основних лісоутворювальних порід I бонітету (м³/га)

Порода	Вік дерев, років				
	15	35	55	75	135
Ялина	7,6	11,1	11,6	10,7	6,9
Сосна	8,2	10,7	9,6	7,8	4,2
Ялиця	7,6	11,1	11,6	10,7	6,9
Береза	7,6	8,5	7,3	5,0	3,9
Осика	11,4	11,4	9,0	5,5	–
Дуб	10,9	10,5	8,3	5,9	4,0

Маса деревини, створена на 1 га ліси за рік з урахуванням річного приросту дорівнює

$$M_{\text{Д рік}} = PV_{\text{рік}}$$

Розглянемо як приклад спрощений розрахунок матеріальних потоків у лісовій екосистемі.

Визначимо кількість CO_2 та H_2O , що споживається, кількість O_2 , що виділяється при створенні 100 м^3 деревини кедра з елементним складом: $\text{C} = 49,8 \%$, $\text{H} = 6,3 \%$, $\text{O} = 43,5 \%$ і густиною 440 кг/м^3 , а також при створенні приросту деревини кедра, що дорівнює $10,7 \text{ м}^3/\text{га} \cdot \text{рік}$.

1. Визначаємо коефіцієнти x , y , z , w для деревини кедра:

$$x = \frac{49,8}{12} = 4,15, \quad y = \frac{6,3}{1} = 6,3,$$

$$z = \frac{43,5}{16} = 2,7, \quad w = 4,15 + 6,3/4 - 2,7/2 = 4,38.$$

2. Перераховуємо об'єм деревини в абсолютно суху вагу при густині деревини кедра 440 кг/м^3 :

$$M_{\text{Д}} = 100 \cdot 440 = 44000 \text{ кг} = 44 \text{ т.}$$

3. Визначаємо поглинені кількості CO_2 і H_2O :

$$m_{\text{CO}_2} = (4,15/100) \cdot 44 \cdot 44 = 80,3 \text{ т};$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = (6,3/2 \cdot 100) \cdot 18 \cdot 44 = 24,9 \text{ т};$$

4. Визначаємо кількість O_2 , що виділилася:

$$m_{\text{O}_2} = (4,38/100) \cdot 32 \cdot 44 = 61,67 \text{ т.}$$

5. Перераховуємо об'єм деревини на абсолютно суху вагу при поточному річному прирості V , що дорівнює $10,7 \text{ м}^3/\text{га}$:

$$M_{\text{Д рік}} = 440 \cdot 10,7 = 4708 \text{ кг/га.}$$

6. Визначаємо кількості поглинених CO_2 і H_2O :

$$m_{\text{CO}_2} = (4,15/100) \cdot 44 \cdot 4708 = 8596,8 \text{ кг};$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = (6,3/2 \cdot 100) \cdot 18 \cdot 4708 = 2669,4 \text{ кг.}$$

7. Визначаємо кількість O_2 , що виділилася за рік:

$$m_{\text{O}_2} = (4,38/100) \cdot 32 \cdot 4708 = 6598,7 \text{ кг.}$$

На сьогодні є безліч джерел антропогенного характеру, що викликають забруднення атмосфери і призводять до серйозних порушень екологічної рівноваги екосистем.

Використання викопного палива на енергетичні, технологічні та інші потреби пов'язане з викидом у повітряне середовище великої кількості забруднювальних речовин. Це призводить до виникнення складної екологічної проблеми перенесення забруднень в атмосферу. Оскільки атмосфера є найрухомішим середовищем біосфери, то маси повітря і забруднень переносяться на значні відстані й можуть впливати на екологічну ситуацію цілих регіонів, порушуючи рівновагу екологічних циклів основних біогенних

речовин.

Склад забруднювальних речовин в атмосфері залежить від виду спалюваного палива.

Тверде, рідке і газоподібне паливо використовуються в промисловості, тепловій енергетиці та автотранспорті. Забруднювальні речовини, що утворюються під час їх спалювання, становлять близько 30 % від загальної кількості антропогенних викидів газів в атмосферу.

У табл. 2.8 наведений елементний склад основних видів твердого і рідкого органічного палива.

Таблиця 2.8 – Склад основних видів органічного палива

Вид палива	Склад горючої маси, %				
	C	H	O	N	S
Деревина	51	6	42,5	0,5	–
Торф	58	6	33,0	2,5	0,5
Буре вугілля	71	7	20,4	1,0	0,6
Антрацит	90	4	3,2	1,5	1,3
Сланець	70	8	16,0	1,0	5,0
Мазут	88	10	0,5	0,5	1,0

Під час спалювання наведених видів палива утворюються оксиди вуглецю, азоту, сірки і пари води.

Для розрахунків матеріальних потоків речовин під час спалювання палива використовуються реакції горіння його основних компонентів.

Реакція горіння	$C + O_2 \rightarrow CO_2,$
стехіометричні співвідношення	$12 + 32 = 44,$ $1 + 2,67 = 3,67.$
Реакція горіння	$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO,$
стехіометричні співвідношення	$28 + 32 = 60,$ $1 + 1,14 = 2,14.$
Реакція горіння	$S + O_2 \rightarrow SO_2,$
стехіометричні співвідношення	$32 + 32 = 64$ $1 + 1 = 2.$
Реакція горіння	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O,$
стехіометричні співвідношення	$4 + 32 = 36,$ $1 + 8 = 9.$

Стехіометричні співвідношення справедливі при будь-яких одиницях вимірювання. Вони показують, що при стисненні 1 грама, кілограма або тонни вуглецю витрачається 2,67 грама, кілограма або тонни кисню і виділяється 3,67 грама, кілограма або тонни вуглекислого газу. Аналогічний сенс мають стехіометричні співвідношення для інших елементів органічного палива, наведених нижче.

Розрахунок маси кисню mO_2 , необхідної для спалювання палива, і кількості продуктів горіння, що утворюються при цьому, може бути

проведений за такими спрощеними формулами:

$$mO_2 = (2,67 \cdot C/100 + 8 \cdot H/100 + 1,14 \cdot N/100 + S/100 - O/100) m_{\text{п}};$$

$$mCO_2 = (3,67 \cdot C/100) m_{\text{п}};$$

$$mNO_x = (2,14 \cdot N/100) m_{\text{п}};$$

$$mSO_2 = (2 \cdot S/100) m_{\text{п}};$$

$$mH_2O = (9 \cdot H/100) m_{\text{п}};$$

де С, Н, N, S, О – відсотковий вміст вуглецю, водню, азоту, сірки і кисню у складі горючої маси спалюваного виду палива;

$m_{\text{п}}$ – маса спалюваного палива.

При правильному розрахунку кількостей речовин, що беруть участь у процесі горіння органічного палива, відповідно до закону збереження мас, повинна виконуватися рівність

$$m_{\text{п}} + mO_2 = mCO_2 + mNO_x + mSO_2 + mH_2O.$$

Ці речовини, потрапляючи до природного кругообігу азоту, сірки та вуглецю, адсорбуються й асимілюються біогеосистемами за механізмами самоочищення, розглянутими раніше.

Тому необхідно прагнути до створення стабільності між природними і антропогенними компонентами системи. Такий досвід є у мешканців Фінляндії, де на створення річного приросту деревини споживається вся кількість CO_2 , що виділилася за рік під час експлуатації всього автотранспорту країни.

Основними компонентами газоподібного палива є горючі гази: метан (CH_4), етан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), етилен (C_2H_4), пропилен (C_3H_6), сірководень (H_2S), можлива також наявність вуглекислого (CO_2) і сірчистого (SO_2) газів.

Розрахунок необхідної кількості кисню і речовин, що виділяються при спалюванні газоподібного палива, здійснюється на основі реакцій горіння за методикою, розглянутою раніше, з урахуванням процентного вмісту горючих газів у суміші.

Нижче наведені реакції горіння і стехіометричні співвідношення для метану, пропану і бутану. Аналогічні рівняння за необхідності можуть бути складені й для інших горючих газів.

Стехіометричні рівняння реакцій горіння:



Одержані масові співвідношення речовин, що беруть участь у реакціях, дозволяють розрахувати витрату кисню та повітря, виділення вуглекислого газу і пари води й побудувати матеріальний баланс речовин під час спалювання газоподібного палива.

Розрахункові формули мають такий вигляд:

$$m_{O_2} = (4 \cdot CH_4/100 + 3,64 \cdot C_3H_8/100 + 3,58 \cdot C_4H_{10}/100) m_{п};$$

$$m_{\text{повітря}} = m_{O_2}/0,2093;$$

$$m_{CO_2} = (2,75 \cdot CH_4/100 + 3 \cdot C_3H_8/100 + 3,03 \cdot C_4H_{10}/100 + CO_2/100) m_{п};$$

$$m_{H_2O} = (2,25 \cdot CH_4/100 + 1,64 \cdot C_3H_8/100 + 1,55 \cdot C_4H_{10}/100) m_{п}.$$

У наведених формулах значення CH_4 , C_3H_8 і C_4H_{10} відповідають відсотковому вмісту горючих газів у спалюваному газоподібному паливі. Наявність у складі горючої маси вуглекислого газу необхідно враховувати у формулі доданком ($CO_2 / 100$). Рівняння матеріального балансу в даному випадку має вигляд

$$m_{п} + m_{O_2} = m_{CO_2} + m_{H_2O}.$$

Розглянемо механізм взаємодії біоценозу та техноценозу на прикладі виробництва CO_2 під час спалювання палива та споживання його деревами. Нижче наведена (рис. 2.34) спрощена схема зворотного зв'язку потоків CO_2 і O_2 у біотехноценозах.

Під час спалювання палива споживається кисень і виділяється вуглекислий газ. У лісових екосистемах потоки вуглекислого газу і кисню мають протилежний напрям: кисень виділяється, а вуглекислий газ поглинається. Варварські вирубки лісів і забруднення навколишнього природного середовища викидами від спалювання палива і роботи автотранспорту призводять до зниження фотосинтетичної активності зелених рослин. Зі схеми бачимо, що якщо основні потоки CO_2 і O_2 не збалансовані, виникає небезпека для зміни газового складу атмосфери зі всіма наслідками, що звідси випливають.

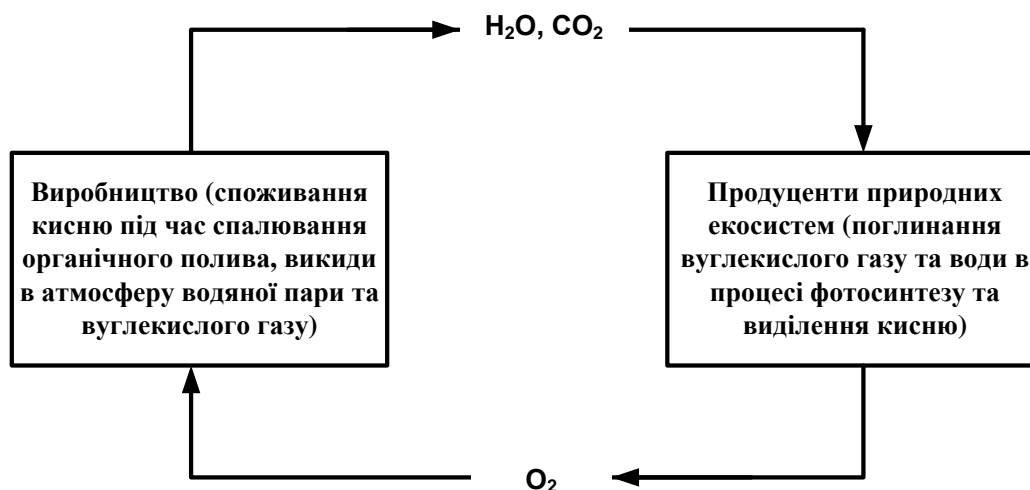


Рисунок 2.34 – Спрощена схема зворотного зв'язку потоків CO_2 і O_2 у біотехноценозах

Отже, в біотехноценозі під час синтезу органічної речовини для стабільності складу атмосфери повинен бути поглинений весь антропогенний вуглекислий газ, що виділився під час спалювання палива, і вироблена необхідна кількість кисню.

Маса органічної речовини, що повинна бути створена для поглинання

CO₂, що виділилося, може бути розрахована за формулою

$$m_{o.p.погл.CO_2} = \frac{mCO_2}{0,44x}, \quad (2.21)$$

де mCO_2 – сумарна кількість CO₂, що виділилася при спалюванні палива;
 x – коефіцієнт рівняння фотосинтезу для деревостанів.

Маса органічної речовини, яка повинна бути утворена для компенсації кількості O₂ палива, що пішло на горіння:

$$m_{o.p.вид.O_2} = \frac{mO_2}{0,32w}, \quad (2.22)$$

де mCO_2 – сумарна кількість кисню, що поглинається під час спалювання палива;

w – коефіцієнт рівняння фотосинтезу для деревостоїв.

Для підтримки балансу в біотехноценозі із двох величин маси речовини деревини потрібно обрати найбільшу, таку, що забезпечує обидва газові баланси одночасно. Для подальшого аналізу необхідно перерахувати величину абсолютно сухої маси речовини деревини в об'єм:

$$V = \frac{m_{o.p.}}{P}, \quad (2.23)$$

де P – базисна щільність деревини відповідної породи, кг/м³;

V – загальний об'єм деревини, м³.

На основі величини V і середнього річного приросту деревини на одному гектарі $V_{рік}$ (м³/га·рік) розраховують необхідну площу лісів:

$$S_{лісу} = \frac{V}{V_{рік}T}, \quad (2.24)$$

де T – період часу (років), за який повинна бути здійснена компенсація техногенної дії.

Показником ступеня урбанізації даної території є коефіцієнт K , що показує співвідношення площі лісу міської території $S_{міста}$, необхідне для компенсації антропогенного впливу на біосферу:

$$K = \frac{S_{лісу}}{S_{міста}}. \quad (2.25)$$

Розглянемо декілька практичних прикладів.

Визначимо кількість O₂, що витрачається, та газоподібних домішок, що викидаються, при спалюванні 320 тис. т горючих сланців з елементним складом, %: С – 68, Н – 9, О – 16,5, N – 1,5, S – 5. Яка маса деревини берези з хімічним складом С – 50,2, Н – 6,3, О – 43 повинна бути синтезована, щоб поглинути вуглекислий газ, що виділився?

1. Побудуємо матеріальний баланс процесу горіння складових палива та визначимо потребу в кисні:

$$mO_2 = (2,67 \cdot 68/100 + 8 \cdot 9/100 + 1,14 \cdot 1,5/100 + 5/100 - 16,5/100)320000$$

= = 780064 т.

$$m_{CO_2} = (3,67 \cdot 68/100)320000 = 798592 \text{ т};$$

$$m_{NO_x} = (2,14 \cdot 1,5/100)320000 = 10272 \text{ т};$$

$$m_{H_2O} = (9 \cdot 9/100)320000 = 259200 \text{ т};$$

$$m_{SO_2} = (2 \cdot 5/100)320000 = 32000 \text{ т}.$$

Баланс речовин дорівнює:

$$m_{п.} + m_{O_2} = 320000 + 780064 = 1100064 \text{ т};$$

$$m_{CO_2} + m_{NO_x} + m_{H_2O} + m_{SO_2} = 798592 + 10272 + 259200 + 32000 = 1100064 \text{ т}.$$

3. Для розрахунку маси деревини необхідно визначити x за складом вуглецю в деревині:

$$x = C/12 = 50,2/12 = 4,183.$$

4. Визначимо масу деревини, яка повинна бути створена для поглинання вуглекислого газу, що виділився при спалюванні:

$$m_{д} = m_{CO_2} / (0,44 \cdot x) = 798592 / (0,44 \cdot 4,183) = 433894,768 \text{ т}.$$

Розглянемо ще один приклад.

Визначимо кількість CO_2 і пари води, що утворюється при спалюванні 3000 т природного газу складу, %: метан – 70, пропан – 15, бутан – 10 і вуглекислий газ – 5. Яка площа березових насаджень здатна поглинути таку кількість вуглекислого газу за рік, якщо вміст вуглецю в деревині – 48 %, щільність – 590 кг/м^3 і річний приріст – $6,5 \text{ м}^3/\text{га}$?

1. Визначимо кількість CO_2 , газоподібного палива, що виділилося під час спалювання:

$$m_{CO_2} = (2,75 \cdot 70/100 + 3 \cdot 15/100 + 3,03 \cdot 10/100 + 5/100) \cdot 3000 = 8184 \text{ т}.$$

2. Визначимо кількість пари води, що виділилася під час спалювання газоподібного палива:

$$m_{H_2O} = (2,25 \cdot 70/100 + 1,64 \cdot 15/100 + 1,55 \cdot 10/100) \cdot 3000 = 5928 \text{ т}.$$

3. Для розрахунку маси деревини необхідно визначити x :

$$x = \frac{C}{12} = \frac{48}{12} = 4.$$

4. Визначимо масу деревини, яка повинна бути утворена для поглинання газоподібного палива вуглекислого газу, що виділився під час спалювання:

$$m_{о.р.погл.CO_2} = \frac{8184}{0,44 \cdot 4} = 4650 \text{ т}.$$

5. Перерахуємо величину маси абсолютно сухої деревини в об'єм:

$$V = \frac{4650 \cdot 10^3}{590} = 7881,4 \text{ м}^3.$$

1. Визначимо необхідну площу березових насаджень:

$$S_{лісу} = \frac{7881,4}{6,5 \cdot 1} = 1212,5 \text{ га}.$$

За такими принципами можна розрахувати і поглинальну здатність степових та лугових екосистем, виходячи з їх продуктивності, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{рік}$.

2.10 Основні закони функціонування екологічних систем

Завданням екології є пошук законів функціонування та розвитку екологічних систем, оскільки саме ці закономірності враховують структурно-функціональні зв'язки між елементами системи і дозволяють прогнозувати причинно-наслідкові зміни в системі в цілому. Узагальнимо закономірності екологічних процесів, що згадувались у цьому розділі.

Історично першим для екології є закон, що встановлює залежність живих систем від факторів, які обмежують їх розвиток (так званих лімітуючих факторів).

Закон мінімуму. В 1840 році Ю. Лібіх установив, що врожай зерна часто лімітується не тими поживними речовинами, які необхідні у великих кількостях, а тими, яких потрібно небагато, однак їх мало в ґрунті. Він сформулював закон, за яким «речовиною, що є в мінімумі, регулюється врожай і визначаються величина та стійкість його в часі». Дію цього закону обмежують два принципи. Згідно з першим закон Лібіха застосовується лише за умов стаціонарного стану. Його більш точне формулювання: «При стаціонарному стані лімітуючою буде та речовина, доступна кількість якої найбільш близька до необхідного мінімуму». Другий принцип стосується взаємодії факторів. Висока концентрація та доступність певної речовини можуть змінити споживання мінімальної поживної речовини. Організм тоді заміняє одну, дефіцитну, речовину іншою, що є в надлишку.

Інше тлумачення згаданого закону: стійкість організму визначається найслабшою ланкою в ланцюзі його екологічних потреб.

Якщо кількість та якість екологічних факторів близькі до мінімуму, необхідного для організму, він виживає, якщо менші за цей мінімум, організм гине, екосистема руйнується.

Наступний закон узагальнює закон мінімуму.

Закон толерантності (закон Шелфорда): відсутність або неможливість розвитку екосистеми визначається не лише нестачею, а й надлишком будь-якого з факторів (тепло, світло, вода тощо). Цей закон може бути виражений іншими словами: лімітуючим фактором процвітання організму може бути як мінімум, так і максимум екологічного впливу, діапазон між якими визначає ступінь витривалості (толерантності) організму до даного фактора.

Згідно з цим законом будь-який надлишок речовини чи енергії в екосистемі стає її ворогом, забруднювачем. Надто багато хорошого – теж погано. Діапазон між двома величинами становить межі толерантності, в яких організм нормально функціонує і реагує на вплив середовища.

Закон конкурентного вилучення формулюється таким чином: два види, що займають одну екологічну нішу, не можуть співіснувати в одному місці нескінченно довго. Те, який із видів перемагає, залежить від зовнішніх умов. За цих умов перемогти може кожен. Важливою для перемоги обставиною є швидкість зростання популяції. Нездатність виду до біотичної конкуренції призводить до його витіснення та необхідності пристосування до більш складних умов та факторів.

Цей закон може працювати і в людському суспільстві. Особливістю його дії є те, що в наш час цивілізації не можуть розійтися. У біосфері немає місця для розселення та немає надлишку ресурсів, що загострює конкурентну боротьбу. Можна говорити про екологічне суперництво між країнами і навіть про екологічні війни або війни, зумовлені екологічними причинами. Свого часу Гітлер виправдовував агресивну політику нацистської Німеччини боротьбою за життєвий простір. Ресурси нафти, вугілля тощо й тоді були дуже важливими. Ще більшу вагу вони мають у кінці ХХ сторіччя, коли додалася необхідність території для захоронення радіоактивних та інших відходів. Війни – гарячі та холодні – набувають екологічного характеру. Багато подій, зокрема розпад СРСР, сприймаються інакше, якщо на них поглянути з екологічних позицій. Тут переплітаються політичні, соціальні та екологічні проблеми.

Закон біогенної міграції атомів (закон В. І. Вернадського): міграція хімічних елементів на земній поверхні та в біосфері в цілому здійснюється під переважаючим впливом живої речовини, організмів.

Жива речовина або бере участь у біохімічних процесах безпосередньо, або створює відповідне, збагачене киснем, вуглекислим газом, воднем, азотом, фосфором та іншими речовинами, середовище. Розуміння всіх хімічних процесів, що відбуваються в геосферах, неможливе без врахування дії біогенних факторів, зокрема – еволюційних. Люди впливають на стан біосфери, змінюють її фізичний і хімічний склад, умови збалансованої віками біогенної міграції атомів. У майбутньому це спричинить дуже негативні зміни, які вже нині набувають здатності саморозвиватися і стають глобальними, некерованими (спустелювання, деградація ґрунтів, вимирання тисяч видів організмів).

Закон внутрішньої динамічної рівноваги: речовина, енергія, інформація та динамічні якості окремих природних систем та їх ієрархії дуже тісно пов'язані між собою, тому зміна одного з показників неминуче призводить до функціонально-структурних змін інших, але при цьому зберігаються загальні якості системи – речовинно-енергетичні, інформаційні та динамічні.

Наслідки дії цього закону виявляються в тому, що після будь-яких змін елементів природного середовища (речовинного складу, енергії, інформації, швидкості природних процесів тощо) обов'язково розвиваються ланцюгові реакції, які намагаються нейтралізувати ці зміни. Навіть незначна зміна одного показника може спричинити великі відхилення в інших і в усій екосистемі.

Зміни у великих екосистемах можуть мати незворотний характер, а будь-які локальні перетворення природи викликають у біосфері планети реакції-відповіді, які зумовлюють відносну незмінність еколого-економічного потенціалу. Штучне зростання еколого-економічного потенціалу обмежене термодинамічною стійкістю природних систем. Закон свідчить, що у випадку незначних втручань у природне середовище його екосистеми здатні саморегулюватися та відновлюватися, а коли ці втручання перевищують певні межі і вже не можуть згаснути в ланцюгу ієрархії екосистем, вони призводять до значних порушень енерго- і біобалансу на значних територіях і в усій

біосфері.

Закон генетичної різноманітності: все живе генетично різне й має тенденцію до збільшення біологічної різноманітності.

Закон має важливе значення у природокористуванні, особливо у сфері біотехнології, коли не завжди можна передбачати результат нововведень під час вирощування нових мікрокультур через виникаючі мутації або поширення дії нових біопрепаратів на ті види організмів, на які вони розраховувалися.

Закон історичної незворотності: розвиток біосфери й людства як цілого не може відбуватися від пізніших фаз до початкових, загальний процес розвитку односпрямований.

Закон константності (сформульований В. І. Вернадським): кількість живої речовини біосфери, утвореної за певний геологічний час, є величиною постійною.

Цей закон тісно пов'язаний із законом внутрішньої динамічної рівноваги. За законом константності будь-яка зміна кількості живої речовини в одному з регіонів біосфери неминуче призводить до такої самої за обсягом зміни речовини в іншому регіоні, лише зі зворотним знаком. Наслідком цього закону є правило обов'язкового заповнення екологічних ніш.

Закон кореляції (сформульований Ж. Кюв'є): в організмі як цілісній системі всі його частини відповідають одна одній як за будовою, так і за функціями.

Зміна однієї частини неминуче викликає зміни в інших. Закон максимізації енергії (сформульований Г. і Ю. Одумами та доповнений М. Реймерсом): у конкуренції з іншими системами зберігається та з них, яка найбільше сприяє надходженню енергії та інформації і використовує максимальну їх кількість найефективніше.

Система утворює накопичувачі високоякісної енергії, частину якої витрачає на забезпечення надходження нової енергії, забезпечує нормальний кругообіг речовин і створює механізми регулювання, підтримки, стійкості системи, її здатності пристосовуватися до змін, налагоджує обмін з іншими системами. Максимізація забезпечує підвищення шансів на виживання.

Закон максимуму біогенної енергії (закон Вернадського – Бауера): будь-яка біологічна та біонедосконала система, що перебуває у стані стійкої нерівноваги (динамічно рухомої рівноваги з довкіллям), збільшує, розвиваючись, свій вплив на середовище.

У процесі еволюції видів виживають ті, які збільшують біогенну геохімічну енергію. Живі системи ніколи не перебувають у стані рівноваги й виконують за рахунок своєї вільної енергії корисну роботу проти рівноваги, якої потребують закони фізики і хімії за існуючих зовнішніх умов. Цей закон поряд з іншими є основою розроблення стратегії природокористування.

Закон обмеженості природних ресурсів: усі природні ресурси в умовах Землі вичерпні.

Планета є природно обмеженим тілом, і на ній не можуть існувати нескінченні складові частини.

Закон односпрямованості потоку енергії: енергія, яку одержує екосистема і яка засвоюється продуцентами, розсіюється або разом із їх біомасою незворотно передається консументам першого, другого, третього та інших порядків, а потім редуцентам, що супроводжується втратою певної кількості енергії на кожному трофічному рівні як наслідок процесів, що супроводжують дихання.

У зворотний потік (від редуцентів до продуцентів) потрапляє дуже мало початкової енергії (не більше 0,25 %), тому термін «кругообіг енергії» є досить умовним.

Закон оптимальності: ніяка система не може звужуватися або розширюватися до нескінченності.

Ніякий цілісний організм не може перевищити певних критичних розмірів, які забезпечують підтримку його енергетики. Ці розміри залежать від умов живлення і факторів існування. У природокористуванні закон оптимальності допомагає знайти оптимальні, з точки зору продуктивності, розміри для ділянок полів, вирощуваних тварин, рослин. Ігнорування закону – створення величезних площ монокультур, вирівнювання ландшафту масовими забудовами тощо – призводить до неприродного одноманіття на великих територіях і викликає порушення у функціонуванні екосистем, зумовлює екологічну кризу.

Закон піраміди енергій (сформульований Р. Ліндеманом): з одного трофічного рівня екологічної піраміди на інший переходить у середньому не більше 10 % енергії. Зворотний потік із більш високих на більш низькі рівні набагато слабший – не більше 0,5–0,25 %, тому говорити про кругообіг енергії в біоценозі не доводиться.

За цим законом можна виконувати розрахунки земельних площ, лісових угідь з метою забезпечення населення продовольством та іншими ресурсами.

Закон рівнозначності умов життя: усі природні умови середовища, необхідні для життя, відіграють рівнозначні ролі. Звідси впливає інший закон – сукупної дії екологічних факторів.

Закон розвитку довкілля: будь-яка природна система розвивається лише за рахунок використання матеріально-енергетичних та інформаційних можливостей навколишнього середовища.

Абсолютно ізольований саморозвиток неможливий – це висновок із законів термодинаміки.

Із цього закону випливають такі висновки:

- абсолютно безвідходне виробництво неможливе;
- будь-яка більш високоорганізована біотична система у своєму розвитку є потенційною загрозою для менш організованих систем. Тому в біосфері Землі неможливе повторне зародження життя – воно буде знищене існуючими організмами;
- біосфера Землі як система розвивається за рахунок внутрішніх і космічних ресурсів.

Закон зменшення енерговіддачі у природокористуванні: процес одержання з природних систем корисної продукції, із часом (в історичному

аспекті) на її виготовлення в середньому витрачається дедалі більше енергії (зростають енергетичні витрати на одну людину).

Зростання енергетичних витрат не може бути нескінченним. Його необхідно розраховувати, гармонізуючи стосунки людини з природою.

Закон сукупної дії природних факторів (закон Мітчерліха – Тінемана – Бауле): обсяг урожаю залежить не від окремого, навіть лімітуючого фактора, а від всієї сукупності екологічних факторів одночасно.

Частку кожного фактора в сукупній дії можна визначити. Закон набуває чинності, коли вплив монотонний і максимально виявляється кожний фактор за незмінності інших у тій сукупності, що розглядається.

Закон ґрунтостомлення (зниження родючості): поступове зниження природної родючості ґрунтів відбувається через тривале їх використання й порушення природних процесів ґрунтоутворення, а також унаслідок тривалого вирощування монокультур, унаслідок накопичення токсичних речовин, що виділяються рослинами, залишків пестицидів і мінеральних добрив.

Закон фізико-хімічної єдності живої речовини (сформульований В. І. Вернадським): уся жива речовина Землі має єдину фізико-хімічну природу.

Із цього випливає, що шкідливе для однієї частини живої речовини шкодить й іншій її частині, лише різною мірою. Через наявність у будь-якій популяції стійких до фізико-хімічного впливу видів швидкість відбору за витривалістю популяцій до шкідливого агента прямо пропорційна швидкості розмноження організмів і чергування поколінь. Унаслідок цього тривале використання пестицидів є екологічно недопустимим, оскільки шкідники, які розмножуються значно швидше, пристосовуються та виживають, а обсяги хімічних забруднень доводиться дедалі збільшувати.

Закон екологічної кореляції: в екосистемі, як і в будь-якій іншій, всі види живої речовини та абіотичні екологічні компоненти функціонально відповідають один одному, випадіння однієї частини системи неминуче призводить до вимикання пов'язаних із нею інших частин екосистеми і функціональних змін.

Відомі також чотири закони екології американського вченого Б. Коммонера:

- усе пов'язане з усім;
- усе мусить кудись діватися;
- природа знає краще;
- ніщо не дається даремно.

Перший закон Б. Коммонера, на думку М. Реймерса, близький за змістом до закону внутрішньої динамічної рівноваги, другий – до цього самого закону та закону розвитку природної системи за рахунок довкілля, третій – застерігає людство від самовпевненості, четвертий – знову стосується проблем, що узагальнюють закон внутрішньої динамічної рівноваги, закони константності й розвитку природної системи. Згідно з четвертим законом Б. Коммонера ми повинні повертати природі те, що беремо від неї, інакше катастрофа неминуча.

У 1991–1993 рр. відомий американський еколог Д. Чірас дійшов висновку, що Природа існує вічно (з точки зору людини) і чинить опір

деградації завдяки дії чотирьох екологічних законів:

- рециклічності або повторного багаторазового використання найважливіших речовин;
- постійного відновлення ресурсів;
- консервативного споживання (коли живі істоти споживають лише те й у тій кількості, що їм необхідно: не більше і не менше);
- популяційного контролю (природа не допускає «вибухового» росту популяцій, регулюючи кількісний склад того чи іншого виду шляхом створення відповідних умов для його існування й розмноження).

Найважливішим завданням екології Д. Чірас вважає вивчення структури і функцій екосистем, їх врівноваженості або неврівноваженості, тобто причин стабільності й розбалансування екосистем.

Серед законів природи зустрічаються звичні в науці закони детерміністського типу, які жорстко регулюють взаємини між компонентами екосистеми, але більшість є законами-тенденціями, які діють не в усіх випадках. У деякому сенсі вони нагадують юридичні закони, що не перешкоджають розвиткові суспільства, якщо зрідка порушуються незначною кількістю людей, але заважають нормальному розвиткові, якщо порушення стають масовими. Є і закони-афоризми, які можна віднести до типу законів як обмеження різноманітності.

Закон емерджентності: ціле завжди має особливі властивості, відсутні у його частин.

Закон необхідної різноманітності: система не може складатися з абсолютно ідентичних елементів, але може мати ієрархічну організацію й інтегративні рівні.

Закон незворотності еволюції: організм (популяція, вид) не може повернутися до попереднього стану, реалізованого його предками.

Закон ускладнення організації: історичний розвиток живих організмів призводить до ускладнення їх організації шляхом диференціації органів та функцій. Біогенний закон (Е. Геккель): онтогенез організму є коротким повторенням філогенезу даного виду, тобто розвиток індивіда скорочено повторює історичний розвиток свого виду.

Закон нерівномірності розвитку частин системи: система одного виду розвивається не строго синхронно – в той час, коли один досягає більш високої стадії розвитку, інші залишаються в менш розвиненому стані. Цей закон безпосередньо пов'язаний із законом необхідної різноманітності.

Закон збереження життя: життя може існувати лише у процесі руху через живе тіло потоку речовин, енергії та інформації.

Принцип збереження впорядкованості (І. Пригожий): у відкритих системах ентропія не зростає, а зменшується, поки не досягається мінімальна постійна величина.

Принцип Ле Шательє – Брауна: при зовнішній дії, що виводить систему зі стану стійкої рівноваги, ця рівновага зміщується в напрямку послаблення ефекту зовнішньої дії. Цей принцип у рамках біосфери порушується сучасною людиною. «Якщо в кінці минулого сторіччя ще відбувалося збільшення

біологічної продуктивності та біомаси внаслідок зростання біологічної продуктивності та біомаси як відповіді на зростання концентрації вуглекислого газу в атмосфері, то з початку нашого сторіччя це явище не спостерігається» (М. Ф. Реймерс).

Принцип економії енергії (Л. Онсагер): при ймовірності розвитку процесу в деякій множині напрямків, що допускаються початками термодинаміки, реалізується той, який забезпечує мінімум розсіювання енергії.

Закон максимізації енергії та інформації: найкращі шанси самозбереження має система, що найбільшою мірою сприяє надходженню, виробленню й ефективному використанню енергії та інформації; максимальне надходження речовини не гарантує системі успіху в конкурентній боротьбі.

Періодичний закон географічної зональності Григор'єва – Будико: зі зміною фізико-географічних поясів Землі аналогічні ландшафтні зони і деякі загальні властивості періодично повторюються, тобто в кожному поясі – субарктичному, помірному, субтропічному, тропічному та екваторіальному – відбувається зміна зон за схемою: ліси → степи → пустелі.

Закон розвитку системи за рахунок навколишнього середовища: будь-яка система може розвиватися лише за рахунок використання матеріально-енергетичних і інформаційних можливостей навколишнього середовища; абсолютно ізольований саморозвиток неможливий.

Правило загасання процесів: зі зростанням ступеня зрівноваженості з навколишнім середовищем або внутрішнього гомеостазу (у випадку ізольованості системи) динамічні процеси в системі загасають.

Закон фізико-хімічної єдності живої речовини В. І. Вернадського: вся жива речовина Землі фізико-хімічно єдина, що не виключає біогеохімічних відмінностей.

Термодинамічне правило Вант-Гоффа – Арреніуса: зростання температури на 10 °С призводить до 2–3-кратного прискорення хімічних процесів. Звідси впливає небезпека підвищення температури внаслідок господарської діяльності людини.

Правило Шредінгера «про живлення» організму негативною ентропією: при впорядкованості організму краще за навколишнє середовище він віддає в це середовище більше неупорядкованості, ніж отримує. Це правило погоджується з принципом збереження впорядкованості Прижогіна.

Правило прискорення еволюції: зі зростанням складності організації біосистем тривалість існування виду в середньому скорочується, а темпи еволюції зростають. Середня тривалість існування виду птахів – 2 млн років, виду ссавців – 800 тис. років. Число вимерлих видів птахів та ссавців порівняно зі всією їхньою кількістю велике.

Принцип генетичної передадаптації: здатність до пристосування в організмів закладена споконвічно і обумовлена практичною невичерпністю генетичного коду. У генетичній різноманітності завжди знаходяться необхідні для адаптації варіанти.

Правило походження нових видів від неспеціалізованих предків: нові великі групи організмів беруть початок не від спеціалізованих представників

предків, а від їхніх порівняно неспеціалізованих груп.

Принцип дивергенції Ч. Дарвіна: філогенез будь-якої групи супроводжується поділом її на ряд філогенетичних гілок, які розходяться в різних адаптивних напрямках від середнього вихідного стану.

Принцип прогресуючої спеціалізації: група, що ступає на шлях спеціалізації, у подальшому розвитку буде рухатися шляхом все більш глибокої спеціалізації.

Правило більш високих шансів вимирання глибоко спеціалізованих форм (О. Марш): швидше вимирають більш спеціалізовані форми, генетичні резерви яких для подальшої адаптації знижені.

Закон збільшення розмірів (зростання) та ваги (маси) організмів у філогенетичній гілці (В. І. Вернадський): у ході геологічного часу форми, що виживають, збільшують свої розміри (а відтак – вагу), а потім вимирають. Відбувається це тому, що чим менші особини, тим важче їм протистояти процесам ентропії (які призводять до рівномірного розподілу енергії), організовувати енергетичні потоки для здійснення життєвих функцій. Отже, в процесі еволюції розмір особин збільшується.

Аксиома адаптованості Ч. Дарвіна: кожний вид адаптований до певної, специфічної для нього сукупності умов існування.

Екологічне правило С. С. Шварца: кожна зміна умов існування прямо або опосередковано викликає відповідні зміни способів реалізації енергетичного балансу організму.

Закон відносної незалежності адаптації: висока адаптивність до одного з екологічних факторів не дає такого самого ступеня пристосовуваності до інших умов життя (навпаки, вона може обмежувати ці можливості через фізіолого-морфологічні властивості організмів).

Закон єдності «організм – середовище»: життя розвивається внаслідок постійного обміну речовиною та інформацією на базі потоку енергії в сукупній єдності середовища та організмів, що його населяють.

Правило відповідності умов середовища генетичній обумовленості організму: вид може існувати лише тоді, коли навколишнє середовище відповідає генетичним можливостям пристосування цього виду до його коливань та змін.

Закон обмеженого росту (Ч. Дарвін): існують обмеження, які перешкоджають тому, щоб нащадки однієї пари особин, розмножуючись за геометричною прогресією, заповнили всю земну кулю.

Принцип мінімального розміру популяцій: існує мінімальний розмір популяції, нижче якого її чисельність не може опускатися.

Правило А. Уоллеса: у міру просування з півночі на південь видова різноманітність зростає. Причина полягає в тому, що північні біоценози історично молодші і знаходяться в умовах меншого надходження енергії від Сонця.

Закон збіднення живої речовини в його згущеннях (Г. Ф. Хільмі): індивідуальна система, яка працює в середовищі з рівнем організації, більш низьким, ніж рівень самої системи, приречена: постійно втрачаючи структуру,

система через деякий час розчиняється в навколишньому середовищі. Звідси випливає важливий висновок для природоохоронної діяльності: штучне збереження екосистем малого розміру (на обмеженій території, наприклад, заповідника) призводить до їх поступової деструкції і не забезпечує збереження видів та спільнот.

Правило біологічного підсилення: при переході на більш високий рівень екологічної піраміди накопичення ряду речовин, у тому числі токсичних і радіоактивних, зростає приблизно в такій самій пропорції.

Правило екологічного дублювання: зниклий або знищений вид у рамках одного рівня екологічної піраміди замінює інший, аналогічний за схемою: дрібний замінює великого, нижче організований – більш високоорганізованого, більш генетично лабільний та мутабельний – менш генетичномінливого. Особини стають дрібнішими, але загальна кількість біомаси збільшується.

Правило обов'язковості заповнення екологічних ніш: порожня екологічна ніша завжди і обов'язково заповнюється.

Правило екотопу або крайового ефекту: на межі біоценозів зростає число видів та особин у них, оскільки зростає число екологічних ніш унаслідок виникнення на межі нових системних властивостей.

Правило взаємоприспосованості організмів в біоценозі Мебіуса – Морозова: види в біоценозі пристосовані один до одного настільки, що їхня спільнота складає внутрішньо суперечливе, але єдине і взаємозв'язане ціле.

Принцип формування екосистеми: тривале існування організмів можливе лише в рамках екологічних систем, де їхні компоненти та елементи доповнюють один одного і взаємно пристосовані.

Закон сукцесійного сповільнення: процеси, що відбуваються у зрілих рівноважних системах, які знаходяться у стійкому стані, мають тенденцію до зниження темпів.

Правило максимуму енергії підтримання зрілої системи: сукцесія відбувається в напрямку фундаментального зміщення потоку енергії в бік зростання її кількості з метою підтримки системи.

Правило константності числа видів у біосфері: число видів, що з'являються, в середньому відповідає числу вимерлих, і загальна видова різноманітність у біосфері є постійною. Це правило стосується сформованої біосфери.

Правило множинності екосистем: множинність конкурентно-взаємодіючих екосистем є обов'язковою для підтримання надійності біосфери.

Контрольні запитання і завдання до самостійної роботи до розділу

1. Дайте визначення оптимального значення екологічного чинника для певної біосистеми.
2. Навести приклади синергічної і антагоністичної дії екочинників.
3. Що таке «простір екофакторів»?
4. Як визначити лімітуючий фактор та як порівняти біотичні й абіотичні чинники за силою їхнього впливу?
5. Які основні лімітуючі чинники водного і наземного середовища існування?
6. Чи є висота над рівнем моря і глибина екологічними факторами?
7. Яке значення має коливальний режим екофакторів для біосистем різного рівня організації?
8. Чим відрізняються макроелементи від мікроелементів і яка їхня роль для живих організмів?
9. Які є типи класифікації екологічних чинників?
10. Як можна класифікувати екологічні системи?
11. Які функції виконує жива речовина на різних ієрархічних рівнях у біосфері?
12. На конкретних прикладах проаналізуйте процеси, що відбуваються під час самоочищення екосистем.
13. Чим відрізняється екосистема від геосистеми?
14. У чому полягають еволюційні процеси в екосистемах?
15. Як на динаміку екосистем впливає антропогенний чинник і за якими сценаріями можуть відбуватися зміни структури природних систем?
16. Як пов'язані між собою біопродуктивність та енергетичний баланс екосистем.

3. МЕТОДОЛОГІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ДОВКІЛЛЯ

3.1. Суть і завдання системного аналізу

Системний аналіз є одним із напрямів системного підходу. Системний аналіз у вузькому сенсі є методологією ухвалення рішень, а в широкому сенсі – синтез методології загальної теорії систем, системного підходу і системних методів обґрунтування і ухвалення рішень.

Системний аналіз дозволяє розділити складне завдання на сукупність простих, розчленувати складну систему на елементи з урахуванням їх взаємозв'язку. Таким чином, системний аналіз є процесом послідовної декомпозиції вирішуваної складної проблеми на взаємозв'язані приватні проблеми.

Суть системного аналізу полягає в такому:

1. Системний аналіз пов'язаний з ухваленням оптимального рішення з багатьох можливих альтернатив.
2. Кожна альтернатива оцінюється з позиції тривалої перспективи.
3. Системний аналізі розглядається як методологія поглибленого з'ясування (розуміння) і впорядкування (структуризації) проблеми.
4. У системному аналізі робиться упор на розроблення нових принципів наукового мислення, що враховують взаємозв'язок цілого і суперечливі тенденції.
5. Застосовується в першу чергу для вирішення стратегічних проблем.

У системному аналізі використовуються як математичний апарат загальної теорії систем, так і інші якісні й кількісні методи з області математичної логіки, теорії ухвалення рішень, теорії ефективності, теорії інформації, структурної лінгвістики, теорії нечітких множин, методів штучного інтелекту, методів моделювання.

До складу **завдань системного аналізу** в процесі створення інформаційної системи входять завдання декомпозиції, аналізу і синтезу.

Завдання декомпозиції означає представлення системи у вигляді підсистем, що складаються з дрібніших елементів.

Завдання аналізу полягає в знаходженні різного роду властивостей системи або середовища, що оточує систему. Метою аналізу може бути визначення закону перетворення інформації, який задає поведінку системи. У останньому випадку йдеться про агрегацію (композиції) системи в один єдиний елемент.

Завдання синтезу системи протилежне завданню аналізу. Необхідно за описом закону перетворення побудувати систему, що фактично виконує це перетворення за певним алгоритмом. При цьому повинен бути заздалегідь визначений клас елементів, з яких будуватися шукана система, що реалізовує алгоритм функціонування.

3.2. Основні принципи системного аналізу

Перший принцип системного аналізу – це вимога розглядати сукупність елементів системи як одне ціле або, жорсткіше, – заборона на розгляд системи як простого об'єднання елементів.

Другий принцип полягає у визнанні того, що властивості системи не просто сума властивостей її елементів. Тим самим постулюється можливість того, що система має особливі властивості, яких може і не бути у окремих елементів.

Дуже важливим атрибутом системи є її ефективність. Теоретично доведено, що завжди існує функція цінності системи – у вигляді залежності її ефективності (майже завжди це економічний показник) від умов побудови і функціонування. Крім того, ця функція обмежена, а отже, можна і потрібно шукати її максимум. Максимум ефективності системи може вважатися **третім** її основним принципом.

Четвертий принцип забороняє розглядати цю систему у відриві від навколишнього її середовища – як автономну, відособлену. Це означає обов'язковість обліку зовнішніх зв'язків або, у більш загальному вигляді, вимога розглядати аналізовану систему як частину (підсистему) деякої більш загальної системи.

Погодившись із необхідністю обліку зовнішнього середовища, визнаючи логічність розгляду цієї системи як частини деякої, більшої за неї, можна дійти **п'ятого принципу** системного аналізу – можливості (а іноді і необхідності) поділу системи на частини, підсистеми. Якщо останні виявляються недостатньо простими для аналізу, з ними вчиняють так само. Але в процесі такого поділу не можна порушувати попередні принципи – поки вони дотримані, ділення виправдане, дозволене в тому сенсі, що гарантує застосовність практичних методів, прийомів, алгоритмів розв'язання задач системного аналізу.

3.3. Етапи і послідовність системного аналізу

При вивченні системного підходу утворюється такий образ мислення, який, з одного боку, сприяє усуненню зайвої ускладненості, а з іншого – допомагає керівнику з'ясувати суть складних проблем і ухвалювати рішення на основі чіткого уявлення про навколишнє оточення. Важливо структурувати завдання, обкреслити межі системи. Але також важливо врахувати, що системи, з якими керівнику доводиться стикатися в процесі своєї діяльності, є частиною більших систем, можливо, що включають усю галузь або декілька, інколи багато компаній і галузей промисловості або навіть все суспільство в цілому. Далі необхідно зазначити, що ці системи постійно змінюються, створюються, діють, реорганізуються і іноді ліквідовуються.

У більшості випадків практичного застосування системного аналізу для дослідження властивостей і подальшого оптимального управління системою можна виділити такі **основні етапи**:

1. Змістовна постановка завдання.

2. Побудова моделі системи.
3. Відшукування розв'язання задачі за допомогою моделі.
4. Перевірка розв'язання за допомогою моделі.
5. Підстроювання розв'язання під зовнішні умови.
6. Здійснення розв'язання.

У кожному конкретному випадку етапи системного займають різну «питому вагу» в загальному обсязі робіт за тимчасовими, витратними і інтелектуальними показниками. Дуже часто важко провести чіткі межі – вказати, де закінчується даний етап і починається черговий.

Системний аналіз не може бути повністю формалізований, але можна вибрати деякий алгоритм його проведення.

Системний аналіз може виконуватися в такій **послідовності**:

1. *Постановка проблеми* – відповідний момент дослідження. У дослідженні складної системи йому передуює робота за структуризацією проблеми.

2. *Розширення проблеми* до проблематики, тобто знаходження системи проблем, істотно пов'язаних з досліджуваною проблемою, без урахування яких вона не може бути вирішена.

3. *Виявлення цілей*: цілі вказують напрям, в якому треба рухатися, щоб поетапно вирішити проблему.

4. *Формування критеріїв*. Критерій – це кількісне віддзеркалення ступеня досягнення системою поставлених перед нею цілей. Критерій – це правило вибору переважного варіанта рішення з ряду альтернативних. Критеріїв може бути декілька. Багатокритеріальність є способом підвищення адекватності опису мети. Критерії повинні описувати по можливості всі важливі аспекти мети, але при цьому необхідно мінімізувати число необхідних критеріїв.

5. *Агрегація критеріїв*. Виявлені критерії можуть бути об'єднані або в групи, або замінені на узагальнювальні критерії.

6. *Генерування альтернатив* і вибір із використанням критеріїв якнайкращої з них. Формування безлічі альтернатив є творчим етапом системного аналізу.

7. *Дослідження ресурсних можливостей*, включаючи інформаційні ресурси.

8. *Вибір формалізації* (моделей і обмежень) для вирішення проблеми.

9. *Побудова системи*.

10. *Використання результатів* проведеного системного дослідження.

Схема алгоритму розв'язання задач системного дослідження конкретної проблеми наведена на рис. 3.1.

На рис. 3.2 наведені можливі етапи системного аналізу для розв'язання практичних екологічних задач. Пунктирні лінії свідчать про те, що іноді необхідно та можливо повернення до якогось попереднього етапу – тобто якщо виникли труднощі на попередніх етапах, вони призведуть до неправильного розв'язку. Обговоримо стисло кожний із цих етапів.

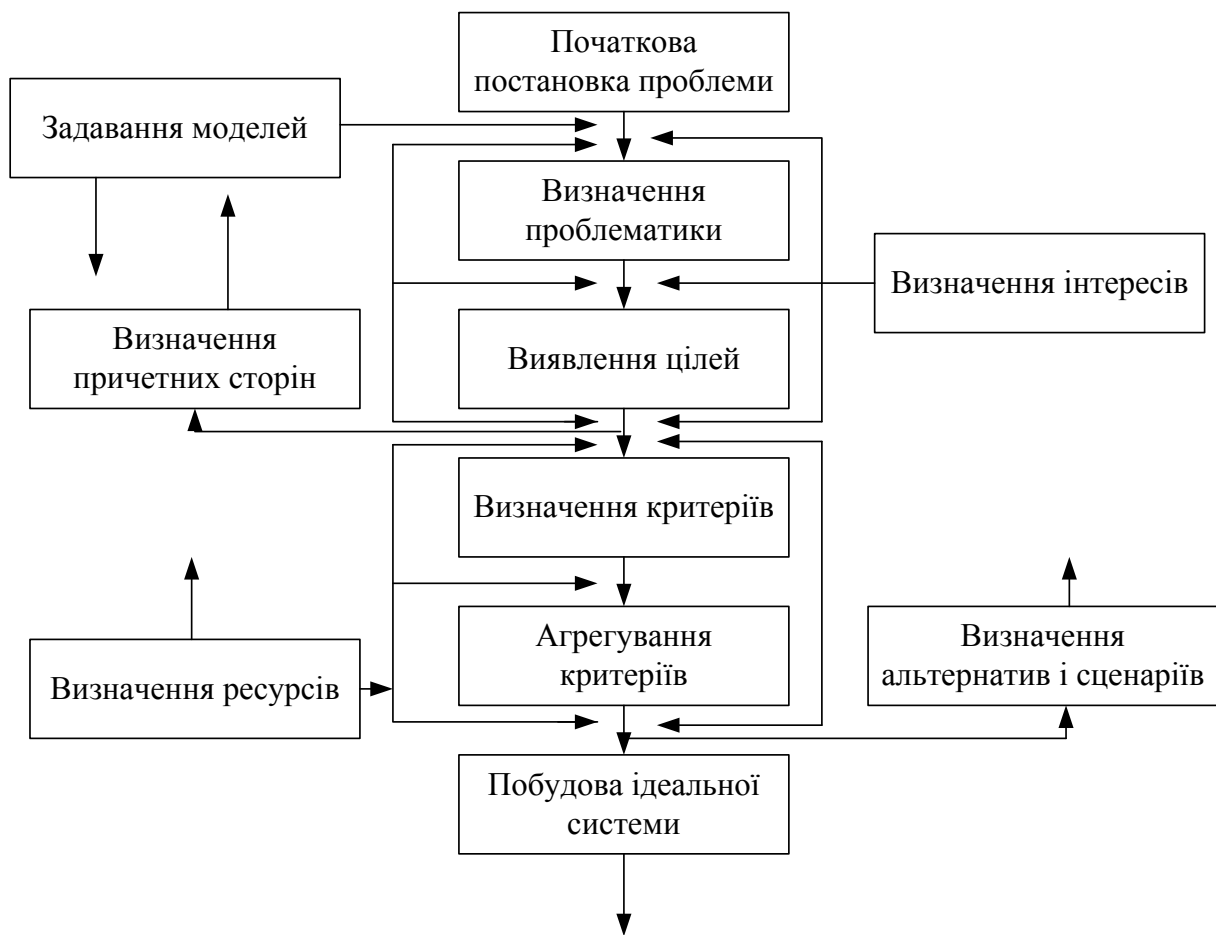


Рисунок 3.1 – Узагальнений алгоритм розв’язання задач системного дослідження конкретної проблеми

Етап 1. Вибір проблеми

Цей етап передбачає вибір правильного методу дослідження для вирішення актуальної екологічної проблеми. Як показує досвід, на практиці часто не враховуються істотні практичні аспекти екології, з одного боку; а з іншого – ряд уявлень про екологічні процеси настільки поширений, що їх можна використовувати без додаткових обґрунтувань. Тому, з одного боку, можна узятися за вирішення проблеми, непіддатливої системному аналізу, а з іншого – вибрати проблему, яку можна економніше вирішити, не використовуючи всю потужність методів системного аналізу. Така подвійність першого етапу робить його критичним для успіху (або невдачі) всього дослідження.

Етап 2. Постановка завдання і обмеження ступеня її складності

Коли існування проблеми буде усвідомлене, потрібно спростити завдання настільки, щоб вона мала по можливості аналітичне вирішення, зберігаючи в той самий час усі ті елементи, які допускають змістовну практичну інтерпретацію. Це теж критичний етап, характерний для будь-якого системного дослідження, на якому успіх або невдача багато в чому залежать від тонкої рівноваги між спрощенням і ускладненням – рівноваги, при якій збережені всі істотні зв’язки з початковою проблемою, і при цьому можна одержати рішення, що піддається якісному аналізу і що має наочну інтерпретацію.

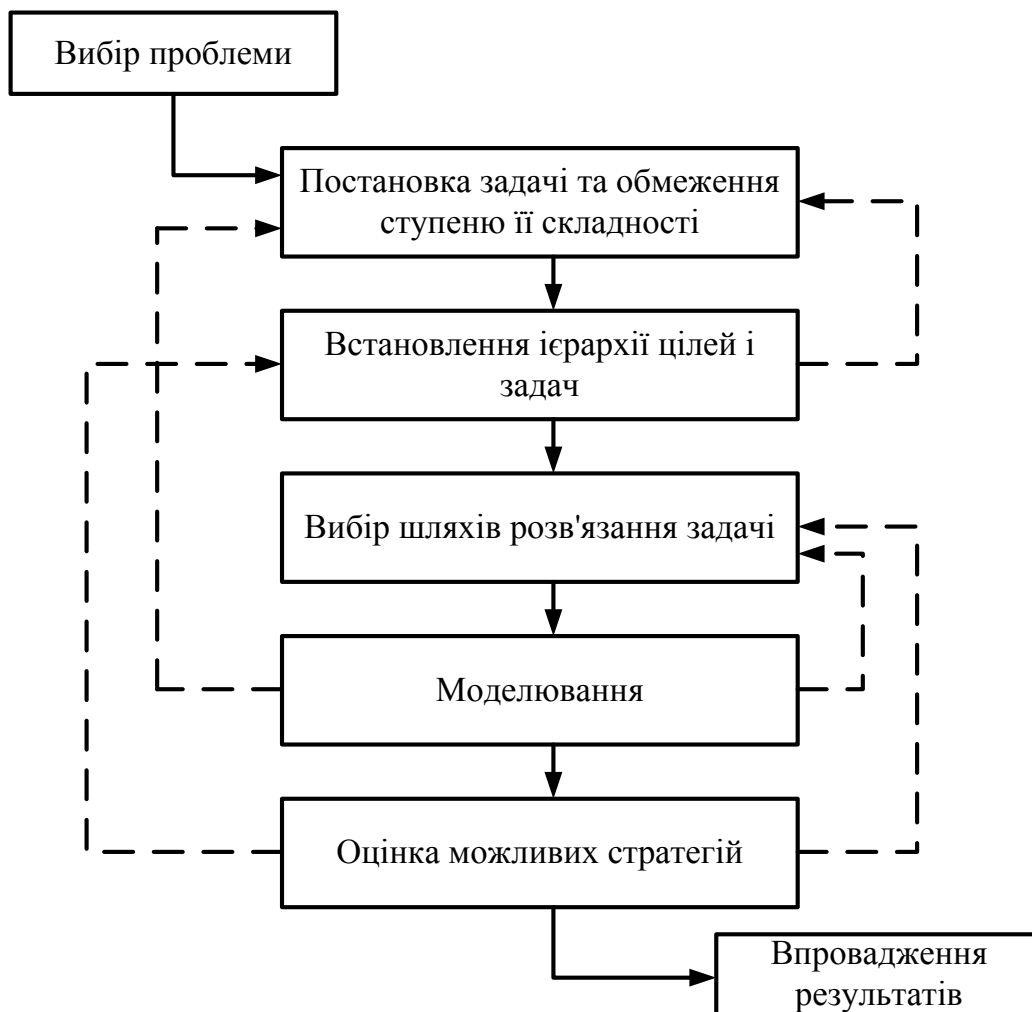


Рисунок 3.2 – Принципова схема системного аналізу для вирішення екологічних задач

Етап 3. Встановлення ієрархії цілей і завдань

Після постановки завдання і обмеження ступеня її складності (як правило, розумного спрощення) можна розпочинати встановлення цілей і завдань дослідження. Як правило, цілі і завдання вибудовують у деякий ланцюжок (утворюють ієрархію) за ступенем їх можливості; при цьому проводять розподіл (декомпозицію) основних завдань на ряд простіших (другорядних). Проте тут необхідно мати на увазі, що завдання, важливі з погляду отримання наукової інформації, у ряді випадків досить слабо впливають на вигляд рішень, що приймаються щодо дії на екосистему і управління нею. Тому встановлення пріоритетності тих або інших завдань в ієрархічному ланцюжку – одна з центральних проблем системного аналізу. Особливо це проявляється при ситуації, коли дослідник свідомо обмежений певними формами управління і концентрує максимум зусиль на завданнях, безпосередньо пов'язаних з самими екологічними процесами.

Етап 4. Вибір шляхів рішення задач

На цьому етапі можна вибрати декілька шляхів рішення проблеми. У загальному випадку природно шукати найбільш загальне аналітичне рішення, оскільки це дозволить максимально використовувати результати дослідження

аналогічних завдань і відповідний математичний апарат. При цьому вибір сімейства, в рамках якого проводиться пошук аналітичного рішення, багато в чому залежить від фахівця із системного аналізу. Як правило, аналітик розробляє декілька альтернативних рішень і вибирає з них те, яке краще підходить для досліджуваного завдання.

Етап 5. Моделювання

Після того як проаналізовані відповідні альтернативи розпочинають важливий етап моделювання складних динамічних взаємозв'язків між різними аспектами проблеми. Тут необхідно зазначити, що модельованим процесам, а також механізмам зворотного зв'язку властива внутрішня невизначеність, що значно ускладнює розуміння як самої системи, так і можливостей її керованості.

Етап 6. Оцінка можливих стратегій

Коли моделювання доведене до стадії, на якій модель можна (принаймні заздалегідь) використовувати, починається етап оцінки потенційних стратегій, одержаних із моделі. У ході оцінки досліджується чутливість результатів до припущень, зроблених при побудові моделі. Якщо виявиться, що основні припущення некоректні, можливо, доведеться повернутися до етапу моделювання і скоригувати модель.

Як правило, це пов'язано із дослідженням моделі на «чутливість» до тих аспектів проблеми, які були виключені з формального аналізу на другому етапі, коли ставилося завдання і обмежувався ступінь її складності.

Етап 7. Впровадження результатів

Завершальний етап системного аналізу є застосуванням на практиці результатів, одержаних на попередніх етапах. Якщо дослідження проводилося за описаною вище схемою, то кроки, які для цього необхідно зробити, будуть досить очевидними. В той самий час саме на останньому етапі може виявитися неповнота тих або інших стадій або необхідність їх перегляду, унаслідок чого доведеться скоригувати модель і знову пройти якісь із уже завершених етапів.

У цілому вивчення конкретної проблеми необхідно розпочинати з визначення концепції щодо цієї проблеми та розроблення робочої гіпотези її суті. Після цього розпочинають визначення рамок проблеми, концептуалізації і формалізації задачі, вивчення наявної інформації та формування бази даних.

Концепція – певний спосіб розуміння, трактування якогось предмета, явища, процесу, основна точка зору на предмет та ін., керівна ідея їх систематичного висвітлення.

Гіпотеза – наукове припущення або передбачення, істинне значення якого не визначене. Як метод розвитку наукового знання гіпотеза включає висунення та наступну експериментальну перевірку передбачень.

Формалізація – відображення результатів мислення у точних поняттях або твердженнях.

Можна виділити три етапи системного підходу до вивчення конкретної проблеми із застосуванням елементів моделювання.

I етап. Ідентифікація (визначення) проблеми

1. Який клас задач необхідно вирішувати експертові (експертам) або даній аналізуючій системі?
2. Як ці задачі можуть бути охарактеризовані або визначені?
3. Які існують важливі підзадачі (ієрархічний ряд)?
4. Які концепції можуть бути використані при вирішенні даної проблеми?
5. Які є важливі поняття і які їх взаємозв'язки?
6. Який видгляд повинен мати розв'язок?
7. Які аспекти досвіду експерта (експертів) є суттєвими при вирішенні цієї проблеми?
8. Яка природа і який обсяг знань, необхідних для вирішення цієї проблеми?
9. Які можливі ситуації, що можуть стати перешкодою під час реалізації задачі?
10. Як ці перешкоди будуть впливати на експерта (експертів) або аналізуючу систему та на виконання задач з вирішення проблеми?
11. Які є дані, як вони отримуються, чи достаньо їх?
12. Які типи даних є дефіцитними, яка доступність до необхідної інформації?
13. Які питання необхідно вирішити, щоб їх отримати?
14. Яка вартість отримання даних?

II етап. Концептуалізація

1. Які є типи даних?
2. Що задано і що повинно бути виведено?
3. Чи мають підзадачі назви і які вони?
4. Чи мають стратегії назви і які вони?
5. Чи є зрозумілі часткові загально визнані гіпотези і які вони?
6. Як зв'язані між собою об'єкти предметної області?
7. Чи можна відобразити ієрархічну структуру задачі і показати причинно-наслідкові відношення, родовидові зв'язки, відношення типу «частина–ціле» і т.ін.? Який вид має ця структура?
8. Які процеси беруть участь у розв'язанні задачі?
9. Які обмеження накладено на ці процеси?
10. Як реалізується передача інформації?
11. Чи можна визначити та розділити знання, які необхідні для отримання результату, і знання, які використовуватимуться для обґрунтування результату?

III етап. Формалізація

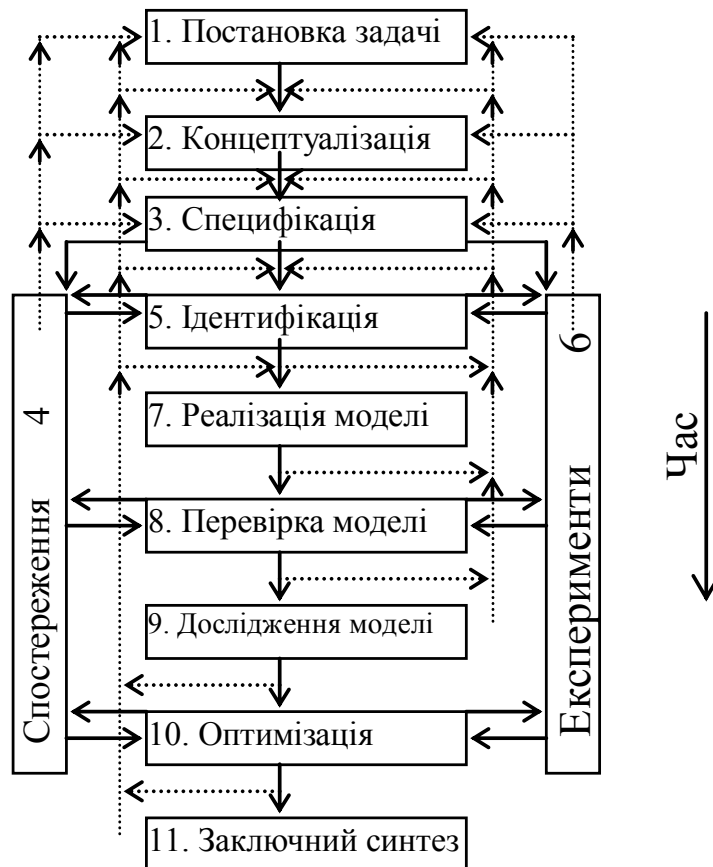
1. Чи є невизначеність у даних?
2. Чи залежить логічна інтерпретація даних від порядку їх появи у часі?
3. Які характеристики проблеми можна отримати на базі вибірки із постійного потоку даних? Які конкретні показники, властивості тощо можуть бути отримані із графіків та рисунків?
4. Чи є дані надійними, точними, однозначними (стійкими), чи вони ненадійні, неточні, неоднозначні (розмиті)?

5. Чи не викликають отримані дані протиріч, чи повні та достатні вони для розв'язання поставленої задачі?

6. Який тип формалізації і який понятійно-термінологічний апарат найбільш адекватно віддзеркалюють цю проблему?

7. Який вибрати тип моделювання (моделі) та прогнозу?

Загальна схема процесу системного дослідження, яке організується при вирішенні конкретної задачі із використанням методів інформатики, моделювання, спостереження та експериментування, показана на рисунку 3.4.



Рисунку 3.3 – Схема процесу системного дослідження (за Федоровим та ін.)

При вивченні природних об'єктів або процесів взаємодії природи і суспільства розгляд певних рівнів організації екосистем набуває практичного значення, оскільки інформаційне забезпечення модельних побудов безпосередньо пов'язане з розмірністю, а отже, і з особливостями географічної організації природного об'єкта. Однією із проблем вивчення екосистем є визначення необхідної і достатньої кількості показників (та їх інформативності) для адекватного опису поведінки екосистем на кожному ієрархічному рівні. В цілому при ландшафтному підході вважають, що розмірність геосистем визначається «особливостями кругообігу субстанції» (тобто речовини). Для вивчення та контролю загроз щодо біорізноманітності цей принцип можна перефразувати так: розмірність території (таксон ландшафту як екосистеми), необхідної для вирішення конкретної задачі, визначається масштабом явища

(антропо-техногенної специфічної загрози, дії визначального негативного чинника). Наприклад, ерозійні процеси в агроландшафтах доцільно вивчати у рамках площі поверхневого водозбору (за Чеботарьовим); трансформації гідроекосистем – у межах площі басейну даного гідрологічного об'єкта (за Чеботарьовим); аеротехногенне забруднення природних екосистем – з урахуванням умов, що визначають розподіл домішок у просторі: фізичних та хімічних властивостей аерополітантів, метеорологічного режиму місцевості тощо. Наразі вже напрацьовано методи моделювання розподілу забруднювачів у просторі та їх міграції у природних екосистемах, а також визначено принципи розподілу ефекту наслідків за структурно-функціональними компонентами екосистем.

Основним критерієм вибору необхідної площі дослідження є визначення розмірів екосистеми, яка перебуває під найбільшою загрозою (чи кількох екосистем – залежно від ситуації), та виділення екосистеми-господаря (середовища існування) вибраної нами екосистеми. Саме ця більша територія екосистеми-господаря повинна бути об'єктом для початку дослідження з метою встановлення зовнішніх зв'язків при описі вибраної нами екосистеми (рис. 3.4). Як правило, в результаті рекогносціювальних обстежень території із використанням експрес-методів вдається звужити задачу до найбільш значущих в цих умовах елементів явища та елементів екосистем. Приклади таких розв'язків задач показано нижче у підрозділах, присвячених діагностиці трансформацій екосистем та вивченню конкретних специфічних загроз.

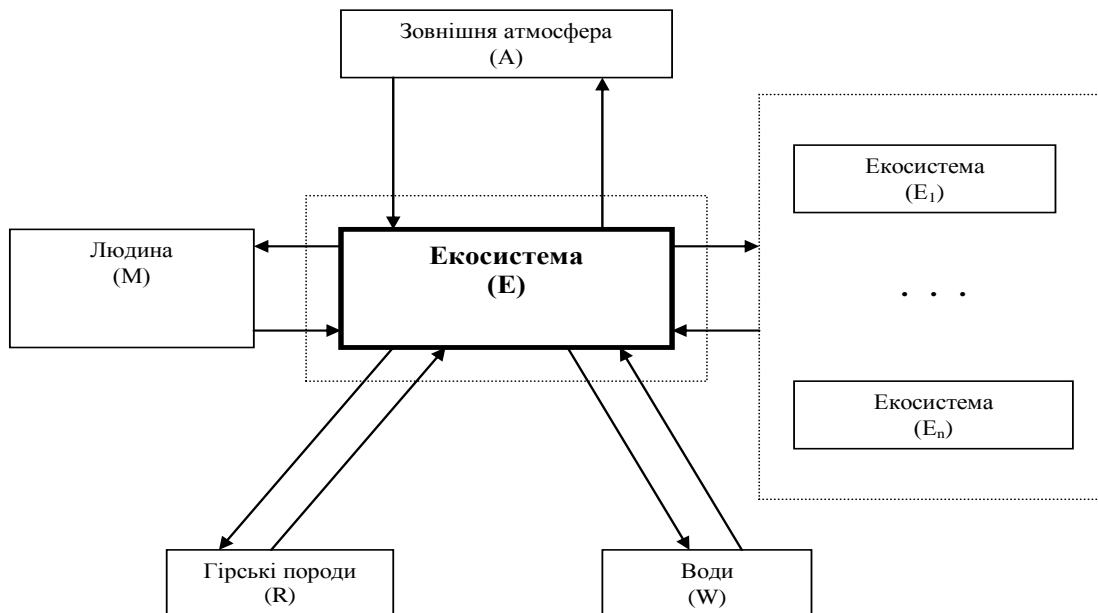


Рисунок 3.4 – Концептуалізація зовнішніх зв'язків при описі екосистеми (за Федоровим та ін.)

При постановці задачі моделювання природних систем необхідно вирішити два завдання: 1) визначити «паспортні» (або незамінні) дані чи

характеристику екосистем та 2) визначити інформаційний фон. Якщо не вистачає частини характеристики об'єкта дослідження, то це не дозволить точно описати предмет (явище, процес). При відборі даних для «паспорта» завжди прагнуть мінімізувати число показників, але це потрібно робити не за рахунок зменшення повноти опису предмета дослідження (явища, процесу). Ці дані повинні бути найбільш інформативними для даного ієрархічного рівня. Тут дотримуються такого принципу: якщо характеризується підсистема у межах великої системи, то в наборі «паспортних даних» можуть бути загальні показники. Однак для різних ієрархічних рівнів набір показників характеристики повинен бути різним, оскільки неадитивність більш високих рівнів стосовно нижчих уже закладає появу нових властивостей, які не характерні для нижчих рівнів (принцип емерджентності).

У цілому при вивченні впливу антропогенного навантаження на певну територію (екосистему) необхідно починати з побудови логічних моделей, які віддзеркалюють структуру ландшафтно-геохімічних систем та їх підсистем до рівня елементарних ландшафтних одиниць. У практиці структуру природних екосистем вивчають до рівня, необхідного для вирішення конкретної екологічної задачі. Перш за все виділяють основні блоки, з яких будується модель. Такими блоками можуть бути організми, популяції, трофічні рівні, структурно-функціональні компоненти екосистеми, цілі екосистеми (компоненти ландшафту). Обов'язкові деталі моделі – потоки речовини (у т. ч. агентів збурення екосистеми) та енергії. Структура моделі та її масштаб залежать від типу екосистеми, яка вивчається, та характеру антропогенного впливу.

3.4 Методика проведення системного аналізу

Принциповою особливістю системного аналізу є використання методів двох типів – *формальних* (кількісних) і *неформальних* (якісних, змістовних).

Методика системного аналізу розробляється і застосовується в тих випадках, коли в осіб, що ухвалюють рішення, на початковому етапі немає достатніх відомостей про проблемну ситуацію, що дозволяють вибрати метод її формалізованого уявлення, сформуванню математичну модель або застосувати один із нових підходів до моделювання, що поєднують якісні і кількісні прийоми. У таких умовах може допомогти представлення об'єктів у вигляді систем, організація процесу ухвалення рішення з використанням різних методів моделювання.

Для того щоб організувати такий процес, потрібно визначити послідовність етапів, рекомендувати методи для виконання цих етапів, передбачити за необхідності повернення до попередніх етапів. Така послідовність певним чином виділених і впорядкованих етапів з рекомендованими методами або прийомами їх виконання є методикою системного аналізу.

Таким чином, методика системного аналізу розробляється для того, щоб організувати процес ухвалення рішення в складних проблемних ситуаціях.

Вона повинна орієнтуватися на необхідність обґрунтування повноти аналізу, формування моделі ухвалення рішення, адекватно відображати цей процес або об'єкт.

Одними із принципових особливостей системного аналізу, що відрізняють його від інших напрямів системних досліджень, є розроблення і використання засобів, що полегшують формування і порівняльний аналіз цілей і функцій систем управління. Спочатку методики формування і дослідження структур цілей базувалися на зборі і узагальненні досвіду фахівців, що накопичують цей досвід на конкретних прикладах.

Таким чином, основною особливістю методик системного аналізу є поєднання в них формальних методів і неформалізованого (експертного) знання. Останнє допомагає знайти нові шляхи вирішення проблеми, що не містяться у формальній моделі, і таким чином безперервно розвивати модель і процес ухвалення рішення, але одночасно бути джерелом суперечностей, парадоксів, які іноді важко вирішити. Тому дослідження із системного аналізу починають все більше спиратися на методологію прикладної діалектики.

3.5 Методи системного аналізу

Арсенал методів системного аналізу досить великий, кожний із методів має свої переваги і недоліки, а також сферу застосування стосовно як до типу об'єкта, так і до етапу його дослідження.

Основними методами системного аналізу є такі методи:

- **неформальні методи:** методи «мозкової атаки», метод експертних оцінок, метод «Дельфі», діагностичні методи, морфологічні методи, метод дерева цілей;

- **формалізовані методи:**

- *графічні:* матричні методи, мережеві методи;

- *статистичні:* математична статистика, теорія імовірності, теорія масового обслуговування;

- *аналітичні:* методи як класичної математики, так і математичного програмування.

3.5.1. Неформальні методи

Методи «мозкової атаки». Методи цього типу переслідують основну мету – пошук нових ідей, їх широке обговорення і конструктивну критику. Основна гіпотеза полягає у припущенні, що серед великого числа ідей є щонайменше декілька гарних. При проведенні обговорень із досліджуваної проблеми застосовуються такі правила:

- сформулювати проблему в основних термінах, виділивши єдиний центральний пункт;

- не оголошувати помилковою і не припиняти дослідження жодної ідеї;

- підтримувати ідею будь-якого роду, навіть якщо її доцільність здається вам зараз сумнівною;

- подавати підтримку і заохочення, щоб звільнити учасників обговорення від скутості.

При всій простоті, що здається, дані обговорення дають непогані результати.

Методи експертних оцінок. Основа цих методів – різні форми експертного опитування з подальшим оцінюванням і вибором найбільш переважного варіанта. Можливість використання експертних оцінок, обґрунтування їх об'єктивності базується на тому, що невідома характеристика досліджуваного явища трактується як випадкова величина, віддзеркаленням закону розподілу якої є індивідуальна оцінка експерта про достовірність і значущість тієї або іншої події. При цьому передбачається, що дійсне значення досліджуваної характеристики знаходиться усередині діапазону оцінок, одержаних від групи експертів, і що узагальнена колективна думка є достовірною. Найбільш спірним моментом у цих методиках є встановлення вагових коефіцієнтів за висловлюваними експертами оцінками і приведення суперечливих оцінок до деякої середньої величини. Ця група методів знаходить широке застосування в соціально–економічних дослідженнях.

Етапи експертизи:

- формування мети;
- розроблення процедури експертизи;
- формування групи експертів;
- опитування;
- аналіз і обробка інформації.

При обробці матеріалів колективної експертної оцінки використовуються методи теорії рангової кореляції. Для кількісної оцінки ступеня узгодженості думок експертів застосовується коефіцієнт конкордації, який дозволяє оцінити, наскільки узгоджені між собою ряди переваг, побудовані кожним експертом. Для наочності представлення ступеня узгодженості думок двох будь-яких експертів використовується коефіцієнт парної рангової кореляції. Тип використовуваних процедур експертизи залежить від завдання оцінювання. До найбільш використовуваних процедур експертних вимірювань належать:

- ранжирування;
- парне порівняння;
- множинні порівняння;
- безпосередня оцінка;
- Черчмена – Акоффа;
- метод Терстоуна;
- метод фон Неймана – Моргенштерна.

Доцільність застосування того чи іншого методу багато в чому визначається характером аналізованої інформації. Якщо виправдані лише якісні оцінки об'єктів за деякими якісними ознаками, то використовуються методи ранжирування, парного і множинного порівняння.

Якщо характер аналізованої інформації такий, що доцільно одержати числові оцінки об'єктів, то можна використовувати який-небудь метод числової

оцінки, починаючи від безпосередніх числових оцінок і закінчуючи тоншими методами Терстоуна і фон Неймана – Моргенштерна.

Метод «Дельфі». Спочатку метод «Дельфі» був запропонований як одна із процедур при проведенні мозкової атаки і повинен був допомогти знизити вплив психологічних чинників і підвищити об'єктивність оцінок експертів. Потім він став використовуватися самостійно. Його основа – зворотний зв'язок, ознайомлення експертів із результатами попереднього туру і урахування цих результатів при оцінці значущості експертів.

Діагностичні методи є прийомами обстеження системи, її підсистем з метою удосконалення форм і методів її роботи. Діагностичні методи застосовуються на етапі діагностики обстежуваного об'єкта і можуть застосовуватися також і на інших етапах для отримання необхідної інформації, зокрема на етапі формулювання проблеми, етапі аналізу структури системи.

Мета використання діагностичних методів – це встановлення і вивчення ознак, що характеризують стан систем для прогнозу можливих відхилень і запобігання порушенню нормального режиму функціонування системи.

Морфологічні методи. *Основна ідея морфологічних методів* – систематично знаходити всі мислимі варіанти рішення проблеми або реалізації системи шляхом комбінування виділених елементів або ознак. Цей підхід був розроблений і застосований швейцарським астрономом Ф. Цвікки і тривалий час був відомий як метод Цвікки.

Найбільш відомими *різновидами методу* є:

Метод систематичного покриття поля (МСПП). Базується на виділенні так званих опорних пунктів знання в будь-якій досліджуваній області і використанні для заповнення поля деяких сформульованих принципів мислення.

Метод заперечення і конструювання (МОКНУВ), що полягає в тому, що на шляху конструктивного прогресу стоять догми і компромісні обмеження, які є сенс заперечувати, і отже, сформулювавши деякі положення, корисно замінити на протилежні і використовувати при проведенні аналізу.

Метод морфологічного ящика (ММЯ), що знайшов найбільш значне поширення. Ідея ММЯ полягає в тому, щоб визначити всі мислимі параметри, від яких може залежати рішення проблеми, подати їх у вигляді матриць-рядків, а потім визначити в цьому морфологічному матриці-ящику всі можливі поєднання параметрів по одному з кожного рядка. Одержані таким чином варіанти можуть знову піддаватися оцінці й аналізу з метою вибору найкращого. Морфологічний ящик може бути не тільки двовимірним.

Метод дерева цілей. Термін «дерево цілей» передбачає використання ієрархічної структури, одержаної шляхом розділення загальної мети на підцілі, а їх, у свою чергу, на детальніші складові.

Дерево цілей є зв'язним графом, вершини якого інтерпретуються як цілі, а ребра або дуги – як зв'язки між цілями.

Основною вимогою до дерева цілей є відсутність циклів. Дерево цілей є головним інструментом ув'язки цілей вищого рівня із конкретними засобами їх досягнення на нижчому рівні через ряд проміжних ланок. При цьому в поняття

цілей на різних рівнях вкладається різний зміст: від об'єктивних народногосподарських потреб і бажаних напрямів розвитку на верхньому рівні до розв'язання задач і здійснення окремих заходів на нижніх рівнях.

Метод дерева цілей використовується для:

- структуризації і аналізу проблеми;
- структуризації системи;
- декомпозиції критеріїв оптимальності;

3.5.2. Формалізовані методи

Матричні методи. Матричні форми уявлення і аналізу інформації не є специфічним інструментом системного аналізу, проте широко використовуються на різних його етапах як допоміжний засіб. Матриця є не лише наочною формою подання інформації, але і формою, яка у багатьох випадках розкриває внутрішні зв'язки між елементами, допомагає з'ясувати і проаналізувати спостережувані частини структури. Прикладом використання властивостей матриці є таблиця Менделєєва.

Матриці використовуються для уявлення й аналізу систем і їх структур. Перестроювання дерева цілей у матрицю зручне для аналізу структури дерева цілей, для виявлення взаємозв'язків і відносин між цілями на етапі відбору варіантів і усічення цілей.

Мережеві методи. Мережеві методи є найбільш наочним і зручним засобом віддзеркалення динамічних процесів, їх аналізу і планування, що розвиваються в часі, із додаванням елементів оптимізації. Використовуються головним чином на етапі побудови програм розвитку. Елементи нижніх рівнів дерева цілей, перегруповані за ознакою тимчасових логічних взаємозв'язків, можна перетворити у мережу. Аналіз цих мереж може послужити для подальшого коректування дерев цілей. Складніші багатовимірні мережі використовуються для розподілу сфер відповідальності, розподіли робіт за конкретними виконавцями в організаціях, орієнтованих на мету.

Статистичні методи. Величини, які можуть набувати різних значень залежно від зовнішніх умов, прийнято називати **випадковими** (стохастичними за природою). Так, наприклад, стать зустрінутої нами людини може бути жіночою або чоловічою (дискретна випадкова величина); її зріст також може бути різним, але це вже безперервна випадкова величина – з тією або іншою кількістю можливих значень (залежно від одиниці вимірювання).

Для випадкових величин доводиться використовувати особливі, статистичні методи їх опису. Залежно від типу самої випадкової величини – дискретної або безперервної – це робиться по-різному.

Дискретний опис полягає в тому, що зазначаються всі можливі значення даної величини (наприклад – 7 кольорів звичайного спектру) і для кожної з них зазначається імовірність або частота спостережень саме цього значення при нескінченно великому числі всіх спостережень.

Можна довести, що при збільшенні числа спостережень у певних умовах за значеннями деякої дискретної величини частота повторень цього значення

все більше наблизатиметься до деякого фіксованого значення – яке і є імовірністю цього значення.

До поняття імовірності значення дискретної випадкової величини можна підійти й по-іншому – через випадкові події. Це найбільш просте поняття в теорії імовірності і математичній статистиці – подія з імовірністю 0,5, або 50 % у 50 випадках із 100 може відбутися або не відбутися, якщо ж її імовірність більше 0,5 – вона частіше відбувається, ніж не відбувається. Події з імовірністю 1 називають достовірними, а з імовірністю 0 – неможливими.

Звідси просте правило: для випадкової події X імовірності $P(X)$ (подія відбувається) і $P(X)$ (подія не відбувається) у сумі для простої події дають 1.

У ряді ситуацій доводиться мати справу із **безперервно розподіленими** випадковими величинами – вагою, відстанями і т. п. Для них ідея оцінки середнього значення (математичного очікування) і міри розсіяння (дисперсії) залишається тією самою, що і для дискретних випадкових величин. Доводиться лише замість відповідних сум обчислювати інтеграли. Друга відмінність – для безперервної випадкової величини питання про те, яка імовірність ухвалення нею конкретного значення, як правило, не має сенсу – як перевірити, що вага товару становить точно 242 кг – не більше і не менше?

Для всіх випадкових величин – дискретних і безперервно розподілених – дуже великий сенс має питання про діапазон значень. Насправді, іноді знання імовірності тієї події, що випадкова величина не перевершить заданий рубіж, є єдиним способом використовувати наявну інформацію для системного аналізу і системного підходу до управління. Правило визначення імовірності потрапляння в діапазон дуже просте – треба підсумувати імовірність окремих дискретних значень діапазону або проінтегрувати криву розподілу на цьому діапазоні.

Математичне програмування («планування») – це розділ математики, що займається розробленням методів відшукування екстремальних значень функції, на аргументи якої накладені обмеження. Методи математичного програмування використовуються в економічних, організаційних, військових та інших системах для вирішення так званих розподільних завдань. Розподільні завдання виникають у разі, коли наявних ресурсів не вистачає для виконання кожної з намічених робіт ефективним чином і необхідно найкращим чином розподілити ресурси за роботами відповідно до обраного критерію оптимальності.

Залежно від виду цільової функції і обмежень виділяють такі методи математичного програмування:

Лінійне програмування використовується, якщо цільова функція лінійна і система обмежень також лінійна.

Якщо розв'язки задачі лінійного програмування повинні бути цілими числами, то це завдання **цілочислового лінійного програмування**.

Якщо цільова функція і система обмежень нелінійні, то це завдання **нелінійного програмування**.

У тому випадку, якщо в завданні математичного програмування є змінна часу і цільова функція виражається не в явному вигляді, як функція змінних, а

побічно, через рівняння, що описує перебіг операції в часі, то таке завдання є завданням динамічного **програмування**. Якщо цільова функція і система обмежень задаються формулами вигляду

$$C \cdot X^{\alpha_1} \cdot X^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot X^{\alpha_n}, \quad (3.1)$$

то це завдання **геометричного програмування**.

У завданнях **параметричного програмування** цільова функція і система обмежень залежать від параметрів.

Якщо у цільовій функції і системі обмежень визначається область можливої зміни змінних, містяться випадкові величини, то таке завдання належить до завдань **стохастичного програмування**.

Якщо точний оптимум знайти алгоритмічним шляхом неможливо, через велике число варіантів розв'язку, то використовуються методи **евристичного програмування**.

3.6 Методологія побудови або ідентифікації складних систем

Щоб сформулювати систему, необхідно, виходячи із поставленої мети дослідження:

- визначити елементи, що належать до неї, щодо обраних ознак;
- визначити ієрархічну структуру елементів, тобто підсистеми, щодо єдності їх ознак;
- визначити взаємозв'язки між підсистемами і їх зв'язки із навколишнім середовищем, зазначивши відповідні потоки речовин, енергії, послуг та інформації.

Часто буває корисним проведення якісного розгляду структурного розбиття проблеми, яка вирішується під час системного аналізу, на складові та моделювання системи. Структурне розбиття полягає в розділенні загальної проблеми на дрібніші часткові проблеми, а моделювання системи – у спробі визначити взаємодію між її елементами. Доцільність дослідження структурного розбиття і моделювання системи обумовлена такими причинами:

- легше вивчати складові проблеми, ніж вирішувати одразу проблему в цілому;
- якщо проблема розділена на складові частини, полегшується доручення роботи окремим виконавцям;
- можуть бути визначені якісні взаємозв'язки типу «хто впливає, на що і як саме»;
- якщо проведено моделювання системи, то, як правило, легко визначити, яку додаткову інформацію необхідно мати для повнішого розуміння системи;
- число змінних, що належать до системи в цілому, може перевищити можливості сприйняття, або обробка відомостей в таких змінних може виявитися дорогою.

Структурне розбиття і моделювання не є однозначними і незмінними, оскільки існує багато шляхів виконання відповідних операцій, і виключно мало ймовірно, що сформульоване конкретне уявлення про систему

залишатиметься незмінним упродовж усього аналізу. Дійсно, у процесі дослідження, звичайно, відбувається вдосконалення моделі від досить грубої до більш детальнішої.

Один із методів структурного розбиття проблеми полягає у розгляді проблеми в рамках окремих інтервалів часу з ухваленням рішень і оцінок їх для кожного інтервалу. Є декілька причин, за якими розгляд проблеми в тимчасових інтервалах доцільний. Одна з причин полягає в тому, що коли відносна зміна змінних у даному інтервалі часу мала, то їх можна вважати постійними.

Інша причина може бути пов'язана з тим, що в системі відбуваються дискретні зміни змінних у певні моменти часу. Наприклад, якщо фінансування проекту змінюється кожні три роки, то, ймовірно, було б доцільно проводити розгляд стосовно трирічних інтервалів часу. Нарешті, розгляд проблеми в тимчасових інтервалах може дозволити укладачеві плану ухвалювати рішення не відразу, а поетапно, оскільки при цьому число змінних на будь-якому інтервалі часу буде менше, ніж при розгляді проблеми в цілому.

Структурне розбиття проблеми може здійснюватися також на основі наукових дисциплін. Такий підхід до створення структури зручний тим, що дозволяє легше здійснювати розподіл робіт між різними виконавцями і керівниками. Проте якщо в процесі планування бажаним є урахування тісного взаємозв'язку між різними частковими проблемами, то розбиття основної проблеми відповідно до наукових дисциплін може виявитися невідповідним, оскільки при такому підході послаблюється контакт між представниками різних дисциплін.

Уявлення про структуру проблеми може бути створене відповідно до загальних інтересів осіб, віднесених до однієї групи. Наприклад, дослідження проблеми випуску екологічно чистої продукції може бути проведене з погляду інтересів споживачів, власників, суспільства і членів виконавчих органів.

Ще один метод структурного розбиття проблеми базується на її розгляді щодо різних географічних областей. Такий розгляд зручний у тих випадках, коли введення змін в одну область не викликає значних змін в інших областях.

Різні часткові проблеми можуть бути у подальшому розбиті. Наприклад, розробки, що проводяться на першому тимчасовому інтервалі, можуть бути розбиті на географічній основі. Чим глибше структурне розбиття проблеми в цілому, тим меншу кількість рішень необхідно прийняти щодо кожного елемента структури (одиниці розбиття) і, отже, простіше проводити аналіз. Проте кожен елемент структури по-різному взаємодіє з рештою елементів, тому поведінка системи в цілому не визначатиметься сумою рішень, що відповідають усім елементам, розглянутим окремо.

Чим більше число підсистем, на які розбита система, тим складніше визначити роботу всієї системи щодо роботи підсистем. Звичайно корисно розчленовувати проблему так, щоб взаємодія між її структурними елементами була відносно малою або визначною. Якщо складність взаємодії між елементами при подальшому розбитті помітно спрощується, то воно доцільне. У кожному конкретному випадку необхідний компроміс між меншістю

структурних елементів, що полегшує їх аналіз, і трудностю синтезу цілого щодо його частин.

Однією з цілей розбиття є визначення меж проблеми. Дослідження може бути обмежене певною географічною областю, конкретним періодом часу, набором груп осіб із загальними інтересами і числом вхідних і вихідних змінних. Припустимо, що вдалося визначити кордони, в межах яких проблема не втрачає значущості. Тоді незалежно від того, як проходять ці кордони, виникає питання: чому щось включене у розгляд. При встановленні меж проблеми необхідно шукати компроміс між можливістю її ефективного рішення і урахуванням кількості критичних чинників.

Розбиття може також проводитися на базі джерел і потоків об'єктів. Як об'єкти можуть розглядатися гроші, матеріали, люди, речовини, що забруднюють повітря, та інше.

3.7 Опис системи на вербальному рівні

Після визначення цілей, точки зору та контексту наступним кроком системного аналізу є збір, аналіз і структуризація інформації про систему. На перших етапах аналітик має певні загальні знання про дану систему, що мають загальний, розпливчастий, неконкретизований характер, вони неповні, невпорядковані.

Існують чотири способи отримання необхідної інформації:

- літературні джерела;
- натурні дослідження;
- експериментальні дослідження;
- експертні оцінки.

Літературні джерела – найбільш дешевий спосіб отримання інформації, вона достатньо достовірна (але не завжди).

Натурні дослідження полягають у вивченні реального процесу або явища шляхом кількісного визначення необхідних характеристик (наприклад, концентрації розчиненого кисню).

Експериментальні дослідження полягають у проведенні спостережень в умовах, коли на об'єкт або процес, що досліджується, чиниться контрольована дослідником дія. Експеримент може бути натурним, тобто проводитися на реальному об'єкті, і може бути лабораторним експериментом.

Експертна оцінка застосовується тоді, коли неможливо застосувати вище перелічені методи або коли параметри, що цікавлять, не мають реальних фізичних показників, тобто не можуть бути заміряні фізично. Вона базується на досвіді й знаннях експертів. У цьому разі великою є складова суб'єктивного чинника, оскільки експертам ніщо людське не чуже. З урахуванням суб'єктивного чинника одне і те саме явище може отримувати різну оцінку, навіть якщо експерти входять до групи осіб зі схожими інтересами, досвідом і знаннями. Головне завдання під час організації експертного оцінювання полягає в мінімізації внеску суб'єктивного чинника. Тому для проведення експертного оцінювання необхідно підібрати команду експертів з різними

поглядами на дану проблему. Отримання інформації від експертів може бути корисним для:

- оцінки наявних даних з погляду їх надійності, точності й застосовності;
- уточнення варіантів рішення і керівних змінних системи;
- вказівки показників, які можуть бути використані для оцінки рішень.

У міру вивчення проблеми кількість знань збільшується, знання певним чином упорядковуються, структуруються. Вони здебільшого мають описовий, словесний характер. Виникає необхідність їх упорядкувати, систематизувати. Першим етапом упорядкування інформації є відображення її в описовій формі аналізу системи. Одержана інформація про систему знаходить відображення на так званому вербальному рівні. Аналіз системи на цьому рівні містить такі три найбільш загальні форми опису:

- історична (історичний аналіз);
- предметна (морфологічний аналіз);
- функціональна (функціональний аналіз).

Ці форми опису системи, її аналізу зумовлені однією з головних вимог системного аналізу, а саме вимоги багатоплановості розгляду системи. Система має бути розглянута з різних сторін, у різних планах.

3.7.1 Історична форма опису системи

Для вирішення будь-якої проблеми завжди потрібно з'ясувати, як виникла система, як вона розвивалася, який шлях пройшла, коли, на якому етапі розвитку виникла проблема. Відповіді на ці питання можна одержати, якщо розглядати систему в історичному аспекті, тобто починаючи із зародження і виникнення системи до її сучасного стану і перспектив розвитку в майбутньому. Такий аналіз є історичною формою опису. Вона поєднує в собі два види дослідження: генетичне й прогностичне.

Генетичне дослідження (генетичний опис) спрямоване на вивчення походження системи, процесів її формування, розвитку до того моменту, коли ми її вивчаємо. У ньому розкривають походження системи, умови її зародження та виникнення. Виконуючи це дослідження, одержують відповіді на запитання, хто, як, коли і для чого створена система, що було вихідним матеріалом для її створення, як вона розвивалася. Генетичний опис вміщує всі кроки розвитку системи, стани та етапи її життєвого циклу, причини, якими були зумовлені зміни в системі. Цей аналіз дозволяє зрозуміти, чому причина труднощів і проблем, що виникають у системі сьогодні.

Прогностичний опис (дослідження, аналіз) пов'язаний з розглядом перспектив майбутнього розвитку системи, її можливих станів і очікуваної поведінки на певний проміжок часу. Він передбачає вивчення майбутніх шляхів розвитку системи, її можливих станів, етапів життєвого циклу і спрямований на розуміння цілей, до яких прагне система. Прогностичний аналіз дає змогу відповісти на запитання, як потрібно діяти в даний час, яким шляхом можна вирішити проблеми системи. Він обмежує коло можливих рішень проблеми, дозволяє вибрати найбільш ефективні з них. Виконуючи прогностичний опис,

необхідно запобігати двом крайностям. Перша – це намагання дуже детально розробити план розвитку системи на етапі її попереднього розгляду, наприклад план розвитку міста на 10–20 років. Такий аналіз у системному аналізі виконується, але виконується він на наступних етапах і основою його є певні моделі системи. Друга крайність – це відрив від дійсності й складання нереальних утопічних планів. Прогностичний опис необхідний, щоб зрозуміти тенденції розвитку системи, узгодити їх з вирішенням проблем, що виникли в даний час.

3.7.2 Предметна форма опису системи

Предметна форма опису системи (морфологічний аналіз) містить:

- виявлення елементного складу системи (субстрактний аналіз);
- виявлення відношень (зв'язків) між елементами системи (структурний аналіз).

Субстрактний аналіз, тобто виявлення елементного складу системи виконують для того, щоб зрозуміти, з яких елементів складається система, яка її будова, які складові частини. Під час виконання субстрактного аналізу виходять з ознаки цілісності системи. Всі складові частини повинні у сукупності створювати систему, поняття цілісності дозволяє зрозуміти необхідність кожного елемента в системі. Під час вивчення елементного складу системи доводиться вирішувати ряд досить складних питань. Такими питаннями є визначення необхідного структурного рівня аналізу, виявлення всіх іманентних (властивих системі) й випадкових елементів. Відповіді на ці питання можна одержати на основі аналізу цілісності системи та умов, необхідних і достатніх для існування системи. Система, як ми це знаємо з попереднього матеріалу, завжди є структурована. Будь-яка система у своєму складі має певні структури, розміщені на різних ієрархічних рівнях. Чим детальніше ми виконуємо аналіз, тим більше структурних рівнів вивчаємо. Під час вивчення складу системи виникає запитання, який рівень вважати рівнем елементарних частинок системи, а який більш високим структурним рівнем, на якому рівні обмежити вивчення системи. Відповіді на ці запитання можна отримати на основі аналізу цілісності системи та умов необхідності й достатності даних структурних елементів у системі. Ці умови завжди пов'язані з цілями і завданнями системного аналізу. Коли глибина аналізу така, що можна одержати відповідь на питання дослідження системи, то вважають, що структурні складові системи є елементарними і подальший аналіз припиняється. Виявлення іманентних та випадкових елементів системи здійснюють на основі необхідності й достатності цих елементів для функціонування системи, для виконання нею своїх цілей. Відповідно до цього правила елемент є іманентним, тобто властивим даній системі, якщо він необхідний для її функціонування. Елемент, який з точки зору функціонування системи не є необхідним, вважається випадковим, не властивим системі. Для завершення аналізу відповіді на запитання, чи всі іманентні елементи системи виявлені, користуються правилом достатності. Відповідно до нього

встановлюють, чи виявлена сукупність елементів у їх взає-мозв'язку і достатня для виконання системою усіх її завдань.

Склад системи, як правило, описують такими термінами: система, підсистема, складова частина, елемент. Під час вивчення, наприклад, складу такої системи, як тролейбус, можуть бути виділені підсистеми: ходова частина, електрообладнання, кузов, шасі, система керування. Виділені на кожному рівні частини повинні задовольняти умову повноти, тобто в сукупності вони повинні становити всю систему. Кожна з підсистем може бути розділена на певні вузли, або елементи. Так, у підсистемі електрообладнання можна виділити такі вузли, як тяговий двигун, пусковий контролер, система прийому й передачі електроенергії, допоміжні двигуни, компресор, акумулятор тощо. Рівень, на якому складові частини вважаються елементарними, зумовлені цілями дослідження системи. Подальший склад елементарних частин не вивчається.

У процесі вивчення складу організаційних систем, наприклад системи міського електротранспорту, виділяють окремі підрозділи системи, її структурні одиниці. У нашому прикладі це може бути керівництво на чолі з директором, депо, енергослужба, служба руху, служба шляхового господарства тощо. Елементами організаційної системи можуть бути окремий цех, депо, дільниця і т. п. При визначенні елементного складу важливо дотримуватись умови цілісності, умови достатності та необхідності. Всі виділені елементи повинні бути необхідними і достатніми для забезпечення функціонування системи, виконання нею своїх цілей.

Для вирішення проблеми цілісності системи потрібно розглядати систему як частину деякої метасистеми (великої системи, до складу якої вона входить). Такий розгляд дозволяє зрозуміти призначення даної системи, головну роль, яку вона відіграє у метасистемі, необхідність зовнішніх функцій та внутрішнього складу системи.

Структурний аналіз – це виявлення зв'язків між складовими частинами системи. Якщо субстрактний аналіз дозволяє виявити, які частини входять до складу системи, то структурний аналіз встановлює взаємозв'язки між цими складовими частинами. Структурний аналіз вирішує два типи завдань:

- виявлення закономірності зв'язків елементів системи,
- виявлення ступеня складності системи.

Закономірності зв'язків частин системи дозволяють зрозуміти внутрішню будову системи, призначення окремих елементів. Вони визначають, як частини системи взаємодіють між собою, як система працює і здійснює свої функції. Виявленню всіх зв'язків допомагає розгляд цілісності системи, аналіз її цілей. Внутрішні зв'язки елементів повинні забезпечувати цілісність і виконання функцій системи. Для перевірки повноти виконаного аналізу потрібно також використовувати принципи необхідності й достатності. Якщо виділені зв'язки забезпечують усі функції системи, то аналіз необхідно вважати виконаним повністю. Аналіз необхідності дозволяє не брати до уваги випадкові зв'язки, що існують між елементами, але не відіграють ролі під час функціонування системи.

Значну допомогу при структурному аналізі має розгляд системи як

складової частини метасистеми. Розуміння ролі системи у метасистемі, взаємодії системи з навколишнім середовищем і функцій, які вона відіграє у мета системі, дозволяє проаналізувати, наскільки повно виконано структурний аналіз системи, вивчена взаємодія її частин.

Ступінь складності системи залежить від того, на скількох структурних рівнях розміщені складові частини системи.

Існує ряд підходів до розділення систем за ступенем складності. Зокрема, Р. Н. Поваров залежно від числа елементів, що входять до системи, виділяє чотири класи систем: малі системи ($10-10^3$ елементів), складні (10^4-10^7 елементів), ультраскладні (10^7-10^{30} елементів) суперсистеми ($10^{30}-10^{200}$ елементів). Оскільки поняття «елемент» виникає щодо завдання і мети дослідження системи, то і дане визначення складності є відносним, а не абсолютним.

Англійський кібернетик С. Бір класифікує всі кібернетичні системи на прості й складні залежно від способу опису: детермінованого або теоретико-ймовірнісного. А. І. Берг визначає складну систему як систему, яку можна описати не менше ніж на двох різних математичних мовах (наприклад, за допомогою теорії диференціальних рівнянь та алгебри Буля).

Залежно від складності у системах розрізняють координаційні й субординаційні зв'язки між елементами. Координаційні зв'язки – це зв'язки між частинами систем, що знаходяться на одному структурному, або ієрархічному, рівні. Ці зв'язки полягають у сумісній роботі частин, яка в сукупності забезпечує функціонування системи. Субординаційні зв'язки – це зв'язки, що здійснюються на різних структурних рівнях і мають характер підпорядкованості. При субординаційних зв'язках складова частина системи повністю або частково підпорядкована іншій частині, що знаходиться на більш високому структурному рівні.

Розглянуту предметну форму опису системи ми будемо називати морфологічним описом системи.

3.7.3 Функціональна форма опису системи (функціональний аналіз)

Під функціями розуміють прояви властивостей будь-якого об'єкта в даній системі відношень. Функціональний аналіз дозволяє вивчити роботу системи в цілому, враховуючи її призначення, склад, структуру, взаємодію частин, зрозуміти процеси, що відбуваються в системі, і взаємодію системи з навколишнім середовищем. Розрізняють дві форми функціонального аналізу, а саме розкриття внутрішнього і зовнішнього функціонування системи.

Вивчення внутрішнього функціонування полягає у виконанні аналізу основних процесів, що відбуваються у системі, їх взаємної узгодженості між собою та цілями системи. У функціональному описі відображають:

- призначення складових частин;
- роль кожної складової частини;
- взаємозв'язок між частинами;
- процеси, зумовлені зв'язками між частинами;

- можливі стани й режими;
- здатність до дії;
- порядок виконання дій;
- обов'язки підрозділів в організаційній системі;
- шляхи передачі команд управління;
- взаємозв'язок результатів дій одних частин від дій інших частин;
- взаємозв'язок дій частин з цілями системи.

Зовнішнє функціонування досліджується з метою виявлення способів пристосування системи для існування в навколишньому середовищі, адаптивної та адаптуючої активності системи. Під адаптивною активністю розуміють здатність системи змінюватися відповідно до змін зовнішнього середовища, пристосовуватися до цих змін. При описі адаптивної активності відображають механізми, властиві системі для пристосування до умов навколишнього середовища. Тут відображають можливі умови навколишнього середовища і механізми системи, що зумовлюють реакцію на ці зміни.

Адаптуюча активність полягає у здатності системи змінювати навколишнє середовище, пристосовувати його до своїх потреб. Тут описують механізми, за допомогою яких система може змінювати й перетворювати навколишнє середовище.

Контрольні запитання і завдання до самостійної роботи до розділу

1. З якої точки зору потрібно розглядати систему?
2. Що містить у собі визначення контексту розгляду теми?
3. У чому відмінність формулювання цілей у системному аналізі порівняно з іншими науковими дисциплінами?
4. Які форми опису систем використовує системний аналіз?
5. Що означає термін «опис системи на вербальному рівні»?
14. Які різновидності історичного опису систем ви знаєте?
6. Що таке генетичний опис системи?
7. Для яких цілей служить прогностичний аналіз системи?
8. Які види аналізу містить морфологічний опис?
9. Які питання вивчає субстрактний аналіз?
10. Які завдання структурного аналізу?
11. Що розуміють під ступенем складності системи? У чому полягає адаптивна діяльність системи?

4. ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ І ПРОЦЕСІВ

4.1. Поняття «модель» і «моделювання». Абстрактна модель системи довільної природи

Оскільки загальна теорія систем розглядає не деякі конкретні системи, а те загальне, що є в різних системах незалежно від їх природи, предметом її вивчення є абстрактні моделі відповідних реальних систем. *Основною процедурою системного аналізу є побудова моделей систем і вивчення систем за допомогою цих моделей.* Вирішення проблеми розпочинається з вивчення системи. Результатом попереднього вивчення є опис системи на вербальному рівні. В описі системи знання певним чином упорядковуються. Сам опис повинен бути всебічним, систему ми повинні розглянути з різних сторін: історичної, морфологічної і функціональної. Наступним етапом системного аналізу є побудова моделей системи, в яких одержані знання об'єднуються, структуруються, поглиблюються. Модель системи, або сукупність моделей, служить інструментом розуміння і вивчення системи, засобом подачі знань про систему і їх збереження. Моделі систем використовують для вирішення конкретних проблем, що виникають у системі.

Модель є поданням реального об'єкта, системи або поняття в деякій формі, відмінній від форми їх реального існування.

Будь-яка модель – це деяка аналогія (абстракція): для однієї системи повинна існувати інша система, елементи якої з деякої точки зору подібні елементам першої. Повинне існувати відображення, яке елементам модельованої системи ставить у відповідність елементи деякої іншої системи. Крім того, повинне існувати відображення, яке властивостям елементів модельованої системи ставить у відповідність властивості елементів модельовальної системи.

Моделі створюються у процесі моделювання. *Моделювання* – це непрямий, опосередкований метод наукового дослідження об'єктів пізнання, безпосереднє вивчення яких з певних причин неможливе, недоцільне чи ускладнене шляхом дослідження моделі.

Модель – це деякий матеріальний чи уявний об'єкт, який за певних умов замінює оригінал і може використовуватися для вирішення проблеми щодо об'єкта-оригінала.

Модель – спеціально створений для зручності дослідження об'єкт, який має потрібний ступінь подібності до модельованого об'єкта, адекватний цілям дослідження, створений суб'єктом чи особою, яка приймає рішення щодо досліджуваної системи.

Більш строге визначення вміщене в енциклопедичному словнику: *модель* – це матеріальна, знакова або уявна система, що відтворює, імітує чи відображає принципи внутрішньої організації, функціонування, ознаки, характеристики об'єкта дослідження, безпосереднє вивчення якого неможливе, ускладнене чи недоцільне.

Для більшості випадків абстрактна модель системи довільної природи може бути подана за допомогою схеми, зображеної на рис. 4.1, яка є, по суті, ілюстрацією до введених понять.

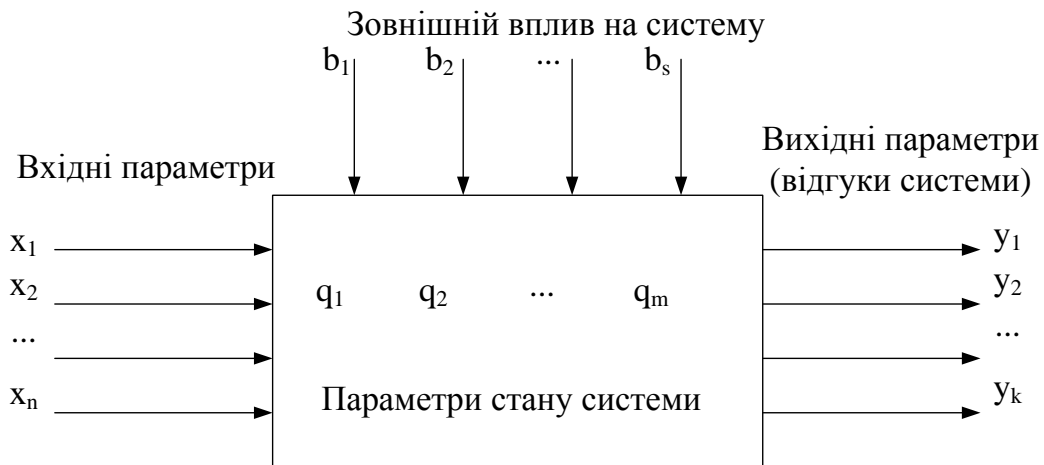


Рисунок 4.1 – Абстрактна модель системи довільної природи

Система не існує сама по собі, а виділяється з навколишнього середовища за якою-небудь системоутворювальною ознакою, якою найчастіше є мета системи. Взаємодія системи із зовнішнім середовищем здійснюється через вхід і вихід системи (безліч вхідних і вихідних параметрів).

Під *вхідними параметрами системи* розуміють комплекс параметрів зовнішнього середовища (зокрема вихідні параметри систем, зовнішніх по відношенню до тієї, що розглядається, наприклад систем управління), що чинять значний вплив на стан і значення вихідних параметрів даної системи і які піддаються обліку і аналізу засобами, що є у розпорядженні дослідника.

Вихідні параметри – це комплекс параметрів системи, що чинить безпосередній вплив на стан зовнішнього середовища і значущих з погляду мети дослідження.

Важливою особливістю функціонування складних систем є принципова невизначеність дійсного стану зовнішнього середовища в кожен момент часу. Природа цієї невизначеності пов'язана з наявністю низки причин, найважливіші з яких обумовлені такими чинниками.

1. Про певні параметри зовнішнього середовища, що, можливо, безпосередньо впливають на поведінку системи (тобто параметри, які потрібно було б віднести до категорії «вхідних»), дослідник часто не знає й, отже, не може їх урахувати.

2. Деякі параметри зовнішнього середовища не можуть бути виміряні через технічну непристосованість інформаційних засобів.

3. Числові значення параметрів, що враховуються, оцінюються з помилками вимірювань, визначуваними, з одного боку, – внутрішніми шумами вимірювальних пристроїв, а з іншого – зовнішніми перешкодами.

Дія на систему подібних неврахованих чинників компенсується введенням у модель додаткових зв'язків – зовнішніх збурювальних дій або «шумів».

Система може знаходитися в різних станах. Стан будь-якої системи в певний момент часу можна з певною точністю охарактеризувати сукупністю значень параметрів стану q .

Таким чином, система характеризується трьома групами змінних:

- вхідні змінні, що генеруються системами, зовнішніми щодо досліджуваної системи:

$$\bar{x} = x_1, x_2, x_3 \dots x_n; \quad (4.1)$$

- вихідні змінні, що визначають дію досліджуваної системи на навколишнє середовище:

$$\bar{y} = y_1, y_2, y_3 \dots y_k; \quad (4.2)$$

- параметри стану, що характеризують динамічну поведінку досліджуваної системи:

$$\bar{q} = q_1, q_2, q_3 \dots q_m. \quad (4.3)$$

У ході дослідження більшості систем усі три групи введених величин передбачаються функціями часу.

4.2 Класифікація моделей

Модель завжди подібна до об'єкта моделювання. Вона може бути ізоморфна або гомоморфна до об'єкта. **Ізоморфна модель** – це коли існує взаємно однозначна відповідність між елементами і зв'язками моделі та об'єкта. **Гомоморфна модель** – коли відповідність однозначна лише в одному з аспектів. Процес моделювання передбачає такі етапи:

- постановку проблеми;
- побудову або вибір моделі;
- дослідження моделі;
- екстраполяцію результатів дослідження на оригінал.

Побудову моделі системи ми розглядаємо як етап вирішення проблемної ситуації, етап вивчення системи. Існує багато моделей систем, що істотно відрізняються одна від одної.

Модель є не просто заміником оригіналу, а його цільовим відбитком, і якою є модель, залежить від цілей моделювання. Залежно від цілей моделями можуть бути найрізноманітніші предмети.

З того, що модель є відбитком об'єкта, залежним від цілей моделювання, впливає:

- по-перше, що моделей одного і того самого об'єкта може бути велика кількість,
- по-друге, що один і той самий предмет може бути моделлю різних об'єктів.

Цільова спрямованість дозволяє класифікувати моделі за цілями моделювання. Найбільш загальний поділ за цілями моделювання – це поділ на пізнавальні та прагматичні моделі.

Пізнавальні моделі – це моделі, що є формою організації та подання

знань, засобом одержання нових знань і їх об'єднання з відомими.

Прагматичні моделі – це моделі, які є засобом регулювання практичної діяльності і слугують для певних практичних цілей, є стандартами, зразками, законом тощо.

Прикладів пізнавальних моделей безліч. Це – лабораторні установки, за допомогою яких студенти вивчають наукові дисципліни, експериментальні установки, створені для розроблення певного проекту, моделі створені за допомогою комп'ютера, схеми електричних мереж, тягових підстанцій, наукові теорії, моделі атома, всесвіту і т. п.

Прагматичні моделі – це певні збірки законів, стандартів, правил що регламентують поведінку людей.

Порівнюючи зазначені два типи моделей, головну різницю між ними знаходимо у співвідношенні моделі та дійсності, моделі та об'єкта моделювання. Це співвідношення проявляється в тому, як діють, коли модель не відповідає дійсності. Пізнавальні й прагматичні моделі відрізняються своїм співвідношенням моделі та об'єкта моделювання.

Це співвідношення полягає в тому, що коли пізнавальна модель не відповідає дійсності (модель не адекватна оригіналу), то потрібно змінити модель, коли ж прагматична модель не відповідає дійсності, то навпаки – потрібно змінювати сам об'єкт моделювання. Розглянемо кілька прикладів. Пізнавальною моделлю будови світу в Середні віки була геоцентрична модель, або модель Птолемея (Птолемеєва система світу, що знайшла завершення у працях давньогрецького астронома Птолемея, є геоцентричною системою, в центрі якої знаходилася Земля, навколо Землі знаходилися 7 кристалевих сфер, на кожній з яких розмішувалися планети та Сонце і рухалися разом зі сферами, а також по поверхні сфер за певними циклами. За сферами – місце для богів, які керували світом). Коли наука довела невідповідність такої моделі об'єкту моделювання, неадекватність її для пояснення астрономічних явищ, то модель була замінена геліоцентричною моделлю Сонячної системи Коперника, в центрі якої знаходиться Сонце, а планети, зокрема Земля, рухаються навколо нього.

Інший приклад – планетарна модель атома, створена Резерфордом: атом містить ядро, навколо якого по еліптичних орбітах рухаються електрони. Після відкриття законів квантової механіки вона була замінена моделлю, в якій електронам відповідає певна електронна хмаринка, розподілена в просторі навколо ядра атома. Таких прикладів можна навести багато. Важливо підкреслити, що для зазначеного типу моделей, а саме для пізнавальних моделей, у разі невідповідності моделі дійсності модель змінюється.

Зовсім інше співвідношення між об'єктом і дійсністю для прагматичних моделей. У разі, коли прагматична модель не відповідає об'єкту, виникає необхідність зміни об'єкта моделювання, а не моделі. Наприклад, якщо обладнання для очищення викидів або скидів, що розробляє конструктор або виготовляється на заводі, за певними параметрами не відповідає стандарту, то змінюється конструкція очисного обладнання, тобто об'єкт моделювання – певний апарат приводиться у відповідність до прагматичної моделі, а саме до

стандарту.

Поділ на пізнавальні та прагматичні моделі, як і будь-який поділ, є відносним. Наприклад, твори мистецтва можуть бути як пізнавальними, так і прагматичними моделями. Вони відображають світ, дозволяють глибше його пізнати. З цієї точки зору твори мистецтва є пізнавальними моделями. Але ці самі твори мистецтва можуть бути зразками для наслідування і тоді вони виступають як прагматичні моделі.

Залежно від того, з чого створені моделі, їх можна поділяти на:

- матеріальні (реальні);
- ідеальні (уявні, продукти свідомості).

Матеріальні моделі – це матеріальні об'єкти, які у певному відношенні замінюють об'єкт моделювання. Для того щоб даний матеріальний об'єкт чи конструкція могли бути моделлю, необхідно, щоб вони відповідали декільком умовам:

- по-перше, відповідали цільовому призначенню моделі;
- по-друге, замінювали оригінал, давали відповіді щодо оригіналу з потрібною точністю.

Для цього повинно бути встановлене певне співвідношення подібності між об'єктом моделювання і моделлю. Існує декілька способів установа такого співвідношення. Розглянемо три типи співвідношення подібності:

- пряма подібність;
- опосереднена подібність;
- умовна подібність.

Найпростіше *пряме співвідношення подібності* – це моделі, створені на основі фізичної подібності. Моделі створюються такими самими, як об'єкти, подібні до них: наприклад, модель літака, макет будівлі чи промислової конструкції, макет гідропоруди, дитяча іграшка, лялька, викрійка тощо. Тут можлива повна відповідність, наприклад копії картин, голограми, протези, або часткова, коли збігаються деякі деталі. Модель може бути побудована у зменшеному, або збільшеному масштабі реального об'єкта. Вона може відрізнятись розмірами, матеріалом, з якого виготовляється. Однак якою б доброю не була модель, вона є тільки заміником об'єкта, виконує роль його лише в певних умовах. При матеріальному моделюванні на основі прямої подібності виникає проблема перенесення результатів моделювання з моделі на оригінал. У технічних науках для цього використовують принципи подібності. Вирішенню практичних завдань за допомогою моделювання допомагає спеціальна наукова дисципліна – теорія подібності.

Опосереднена подібність – це подібність, що базується на єдності законів природи, на існуючій у природі аналогії між різними явищами. Моделі створюють не на основі механічного відтворення, а на основі об'єктивно існуючої єдності явищ природи.

Умовна подібність – використовується там, де не можна встановити ні прямої, ні опосередненої подібності. Тут подібність установають на основі певних правил, домовленостей. Прикладом моделі з умовною подібністю може бути креслення, ми їх розглядаємо як модель конструкції. Аналогічно й

електрична схема – це модель електричного кола, що є моделлю лише завдяки певній домовленості, умовній подібності.

Моделями умовної подібності є також різні сигнали, що передаються тими чи іншими каналами і відображають певні події. Ці моделі існують лише завдяки домовленостям, які виступають як сукупність правил і діють у межах установлених правил.

Ідеальні моделі – це моделі, що є ідеальними конструкціями, побудованими засобами мислення, свідомості. До них належать мова, мовні конструкції, художні твори, наукові теорії, гіпотези, алгоритми діяльності тощо. Особливу роль серед них займає мова. Вона є головним засобом побудови ідеальних моделей. Мова – це насамперед засіб спілкування. У той же час вона є і засобом мислення. У психології мову вважають другою сигнальною системою людини. Самі поняття нашої мови вже є моделями дійсності. Наприклад, слово дерево – це певна модель. Говорючи «дерево», ми розуміємо об'єкт, який має стовбур, коріння, листя. Мова – це універсальний засіб побудови моделей. Універсальність мови як засобу побудови моделей полягає насамперед у тому, що окремі поняття мови є певними моделями світу. Крім того, мова допускає ієрархічну побудову моделей, а саме: слово, речення, текст. Моделлю об'єкта може бути одне слово, як це показано вище. У разі, коли для побудови моделі одного слова недостатньо, застосовують речення. За допомогою речення визначаються більш складні моделі. Моделлю певної системи може бути не одне речення, а цілий текст, побудований з речень. Наприклад, для опису сучасного уявлення про сонячну систему, моделі сонячної системи вже необхідний цілий текст досить великого обсягу.

Універсальність мови як засобу побудови моделей зумовлена ще й тим, що поняття чи мовні конструкції мають неоднозначний, розпливчастий характер. Це дозволяє охопити одним поняттям цілий ряд предметів або явищ, змодельовати їх. Неоднозначність мовних понять корисна, вона закріпилась у мові віками. Ця розпливчастість, неоднозначність дозволяє будувати моделі найбільш універсального характеру, дозволяє абстрагуватися від деяких неістотних властивостей об'єктів.

У випадках, коли розпливчастість понять буденної мови стає на заваді, коли потрібно чітко визначити предмет моделювання, виникають спеціальні мови, що мають більш чіткий, однозначний характер. Це мови наукових дисциплін: математики, екології, біології, фізики. Основою таких мов є чітко визначені поняття. Кожна наукова дисципліна має свої поняття, з якими вона оперує. Наукові поняття – найбільш чіткі, конкретизовані визначення предметів вивчення та їх відношень. Знання будь-якої науки ґрунтується на понятійному апараті. Наприклад, знання системного аналізу ґрунтується на поняттях системи, метасистеми, елемента системи, структури системи, моделі, об'єкта моделювання, навколишнього середовища тощо.

Ідеальні моделі можна поділити на семантичні (знакові) та інтуїтивні, на аналітичні й імітаційні.

Семантичні моделі – це знакові моделі, в яких установлені певні знаки та співвідношення між ними і які записуються та зберігаються у вигляді

сукупності знаків. Розрізняють математичні, логічні й графічні семантичні моделі. Розділити їх не завжди можливо, оскільки у кожній семантичній моделі певним чином переплітаються окремі елементи. Деколи говорять про логіко–математичні моделі, що поділяють на аналітичні й імітаційні. Аналітичні моделі – це моделі, призначені для аналізу, імітаційні – для відтворення певних процесів, явищ.

Інтуїтивні моделі – це моделі, що будуються на вербальному (описовому) рівні. Вони мають характер гіпотез, розуміння загальних характеристик розвитку об'єктів. Під час їх створення важливу роль відіграє підсвідомість.

Аналітичні й імітаційні моделі вказують на призначення моделі, як модель використовується у процесі пізнання.

Аналітичні моделі – це моделі, призначені для вивчення систем теоретичними методами, засобами алгебри, математики.

Імітаційні моделі – це моделі, що слугують для точного чи дещо видозміненого відтворення певних систем, процесів, явищ.

Формальні моделі – це окремі типи моделей, подані у формальному, описовому вигляді, до якого входять головні ознаки, за якими дана модель істотно відрізняється від інших. В описі формальної моделі подані також правила її побудови, складові частини моделі, зв'язки між частинами, вигляд моделі в цілому.

Формальна модель має загальний характер без конкретного наповнення, є немовби каркасом, на основі якого можна побудувати цілий ряд змістовних моделей. Формальних моделей існує обмежена кількість. В описі формальної моделі абстрагуються від змісту, внутрішнього наповнення, предметної області, для якої створюється модель. Формальні моделі є абстрактними моделями, описаними абстрактною, найбільш загальною мовою. Залежно від рівня абстракції формальні моделі можуть охоплювати різну кількість систем. До формальних моделей найбільш високого рівня абстракції належать моделі «чорний ящик», «склад системи», «структура системи», «структурна схема».

Змістовні моделі – це моделі, наповнені поняттями даної предметної сфери. Вони будуються на основі формальних моделей, що слугують шаблоном, зразком для побудови змістовних моделей.

Створення змістовної моделі – це процес інтерпретації формальної моделі мовою певної предметної області. *Інтерпретація* – це встановлення відповідності між формальною і змістовною моделями системи. Інтерпретація визначається як сукупність значень (змісту), які певним чином надаються елементам деякої системи, теорії чи моделі. У математиці інтерпретація – це встановлення відповідності, пояснення положень деякої формальної теорії мовою певної змістовної системи, причому положення змістовної системи повинні бути визначені незалежно від формальної системи. Інтерпретація вважається повною, якщо кожному елементу формальної системи відповідає певний елемент змістовної системи.

У системному аналізі змістовні моделі систем будують на основі формальних моделей. Формальна модель задає основні положення цієї моделі,

її елементи, зв'язки, правила побудови, а змістовна модель наповнює ці елементи і зв'язки певним змістом, узятим з конкретної системи, що досліджується. Таким чином, встановлюється відповідність між елементами формальної моделі та елементами змістовної моделі системи. У випадках, коли встановлено, що елементи формальної моделі однозначно відповідають елементам змістовної системи, існує взаємно однозначна відповідність, то всі результати, отримані для формальної моделі, підтверджуються у змістовній моделі.

Формальних моделей ми знаємо обмежену кількість, а змістовних моделей може бути побудовано в необмеженій кількості. Це викликано тим, що за однією формальною моделлю можна побудувати змістовні моделі для безлічі систем навколишнього світу. З іншого боку, навіть для однієї системи за однією і тією самою формальною моделлю можна побудувати необмежену кількість змістовних моделей залежно від цілей моделювання, точки зору та рівня знань того, хто будує модель. Якою буде побудована змістовна модель, залежить від цілей моделювання, складності системи, досвіду і знань аналітика та інших факторів. Успіхи вивчення систем і вирішення проблем системного аналізу значною мірою залежать від того, якою мірою аналітик володіє набором формальних моделей і вміє їх інтерпретувати.

4.3 Властивості моделей

Розглядаючи властивості моделей з матеріалістичної точки зору, насамперед відзначимо найбільш важливі, а саме:

- обмеженість;
- спрощеність;
- адекватність;
- правильність моделі.

Обмеженість моделей зумовлена обмеженістю ресурсів (матеріальних, енергетичних, інформаційних, часових), які ми використовуємо під час створення моделей. Будь-який об'єкт існує у просторі й часі. Він має нескінченне число відношень з іншими об'єктами. Під час створення моделі ми враховуємо лише певне число відношень об'єкта, створюємо модель обмеженою у просторі, маємо обмежений час для моделювання. Тому моделі завжди обмежені. Якщо так, то виникає питання, чи можна пізнати безмежний об'єкт обмеженими методами. Відповідь на це запитання дає практичний досвід людства. Так, обмеженими засобами, використовуючи моделі, побудовані цими засобами, можна пізнати навколишній світ. Ці моделі правильно відображають безмежний світ. Проте знання про світ є відносними, на кожному етапі пізнання вони певною мірою відповідають дійсності. Ми прагнемо до абсолютного знання, постійно наближаємося до нього, пізнаючи світ усе більш повно, точно і детально. Процес пізнання світу, пізнання абсолютної істини безмежний. Н. Вінер відмічав, що обмежені моделі при всіх їх недоліках – це єдиний вироблений людством спосіб розуміння світу.

Спрощеність моделі впливає з її обмеженості. Раз модель створена обмеженими засобами, то вона повинна бути спрощеною. Здавалося, що спрощеність моделі повинна призводити до її неправильності, невідповідності дійсності. Але парадоксом є те, що правильними є найбільш прості моделі. Для конкретних цілей моделювання спрощеність не лише допускається, а й є необхідною. Тут є один загадковий момент: чомусь з двох моделей, що описують явище чи об'єкт, ближче до дійсності завжди знаходиться найбільш проста модель. Найбільш яскравий приклад – геліоцентрична система, що замінила геоцентричну.

Світом правлять прості закони, що виражаються у простих моделях. Наприклад, закономірності руху будь-якого тіла виражені в обмеженій кількості понять: маса, сила, прискорення, швидкість та взаємозв'язок між ними. Цей взаємозв'язок установлюють закони Ньютона. Вони надзвичайно точно описують рух тіл на землі та рух космічних об'єктів. Звичайно, уточненням їх є рівняння теорії відносності, які діють при швидкостях, близьких до швидкості світла, і рівняння квантової механіки справедливі для тіл із надзвичайно малою масою. Всі закони фізики, що регулюють процеси на Землі й у Всесвіті, в тілах субатомних розмірів і тілах космічних розмірів на рівні галактики і метagalактики, можуть бути записані на одному аркуші паперу – це приблизно 20 рівнянь.

Отже, спрощеність моделі – не лише недолік, а часто й перевага моделі. Спрощена модель виділяє головне, зосереджує увагу на ньому, відкидає все другорядне, неістотне. У багатьох визначеннях моделі підкреслюється, що будь-яка модель є спрощеною. Проте саме спрощеність дозволяє вирішувати складні завдання при аналізуванні складних систем.

Крім властивостей обмеженості й спрощеності моделей, особливе значення мають адекватність та її правильність.

Адекватність – це правильне відображення зв'язків та співвідношень навколишнього світу (від лат. *adaequatus* – рівний, прирівняний).

Адекватність моделі – здатність моделі дати правильну відповідь на запитання щодо об'єкта відповідно до цілей моделювання.

Адекватна модель – це модель, яка правильно відображає *істотні* властивості й відношення предметів та явищ навколишнього світу. Адекватною вважається модель, яка не взагалі повною мірою відповідає об'єкту, а тією мірою, що приводить до потрібної цілі, дозволяє одержати потрібні на практиці результати.

Правильність моделі – поняття не тотожне адекватності. Правильність поняття більш загальне, філософське – означає, що модель повністю відповідає дійсності. Робити висновки про правильність моделі ми не завжди можемо і користуємося більш вузьким і точним поняттям, а саме поняттям адекватності. Адекватна модель – це модель, що дає однозначні правильні відповіді на поставлені запитання.

Правильність (істинність) моделі – питання досить глибоке і знаходить відображення у філософії. Оскільки між моделлю та об'єктом завжди є різниця, то виникає питання про правильність наших знань, що сконцентровані в

моделях світу. Чи ця різниця є такою, що її неможливо усунути, чи можна подібність моделі до об'єкта весь час збільшувати? У філософії – це питання доступності абсолютної істини суб'єктивному пізнанню. Діалектичний матеріалізм стверджує, що людське пізнання – це відносна істина. Проте вона завжди може бути скільки завгодно близько наближеною до абсолютної істини.

Розглядаючи властивості моделей, ще раз звернемо увагу на *співвідношення правильного й неправильного в моделі*. Крім істинного, правильного, в моделі завжди є дещо неправильне, дещо таке, що не відповідає об'єкту моделювання. Співвідношення вірно правильного і неправильного порізнному виявляється в пізнавальних і прагматичних моделях. Якщо для прагматичної моделі неправильне згубне для моделі, призводить до відмови від моделі, то в пізнавальних моделях це один зі стимулів прогресу, можливість відірватися від деяких фактів, які часом не відіграють істотної ролі. У пізнавальних моделях важливе значення мають гіпотези. Ейнштейн сказав: «Уява важливіша від знань, оскільки знання обмежені, а уява охоплює весь світ і є джерелом знань». Але це не означає, що не потрібно вчитися, тому що лише знання дають критерій, що правильне, а що неправильне, де шукати істину.

Модель має свої межі істинності. Однією з небезпек моделювання є використання моделей без перевірки умов і меж, за яких *забезпечується адекватність моделі*. Тобто необхідно пам'ятати, що кожна модель завдяки спрощенням і прийнятим гіпотезам адекватно відтворює об'єкт або процес лише в певних умовах і межах.

Для того щоб модель відповідала своєму призначенню, щоб вона виконувала свої функції, недостатньо створити нову модель чи взяти готову, необхідно, щоб існували умови, які забезпечують реалізацію властивостей моделі. Це стосується не лише моделей, створених на основі умовної подібності, а й всіх моделей взагалі.

Необхідність певних умов для реалізації властивостей моделей можна продемонструвати і на історичних фактах. В історії відомі відкриття, що значно обігнали час і не знайшли своєї реалізації. Вертоліт, розроблений Леонардо Давінчі, реалізований тільки в ХІХ ст. Кібернетика Трентовського, розроблена у 1848 р., знайшла втілення лише через 100 років, обчислювальна машина Беббіджа (1883 р.) – лише після розвитку електроніки.

З необхідністю певних умов для реалізації властивостей моделей ми зустрічаємося також у політичному й економічному житті. Для прискорення розвитку України неодноразово пропонувалися моделі передових країн, проте вони не привели до бажаного результату. Економічні моделі розвитку передових ринкових країн не діють в умовах недостатньо розвинених країн. На жаль, із цим потрібно миритися і шукати такі моделі розвитку, які працюють у цих умовах.

Відповідність моделі та об'єкта моделювання встановлює певна особа, людина, група людей, наукова дисципліна, тобто певний суб'єкт. Без суб'єкта немає моделі. Суб'єкт моделювання будує модель залежно від цілей моделювання. У процесі побудови моделі суб'єкт моделювання (той, хто створює модель) певним чином відображає лише ті властивості об'єкта в

моделі, які є *істотними* для вирішення поставленої дослідником мети, відкидаючи неістотні властивості. Тому для інших цілей дослідження створена модель може бути неадекватною і не відтворювати всіх властивостей об'єкта за певних меж та умов. Про це постійно потрібно пам'ятати під час використання уже готових моделей для дослідження екологічних процесів.

4.4. Підходи до фізичного і математичного моделювання

Оскільки поняття «моделювання» є достатньо загальним і універсальним, до способів моделювання належать такі різні підходи як, наприклад, метод мембранної аналогії (фізичне моделювання) і методи лінійного програмування (оптимізаційне математичне моделювання). Для того щоб упорядкувати вживання терміна «моделювання», вводять класифікацію різних способів моделювання. У найбільш загальній формі виділяються дві групи різних підходів до моделювання, які визначаються поняттями «фізичне моделювання» і «математичне моделювання».

Фізичне моделювання здійснюється шляхом відтворення досліджуваного процесу на моделі, що має в загальному випадку відмінну від оригіналу природу, але однаковий математичний опис процесу функціонування.

Сукупність підходів до дослідження складних систем, визначувана терміном «математичне моделювання», є одним з різновидів ідеального моделювання. Математичне моделювання базується на використанні для дослідження системи сукупності математичних співвідношень (формул, рівнянь, операторів і т. д.), що визначають структуру досліджуваної системи та її поведінку.

Математична модель – це сукупність математичних об'єктів (чисел, символів, множин і т. д.), що відображають найважливіші для дослідника властивості технічного об'єкта, процесу або системи.

Математичне моделювання – це процес створення математичної моделі та операції нею з метою отримання нової інформації про об'єкт дослідження.

Побудова математичної моделі реальної системи, процесу або явища припускає рішення двох класів завдань, пов'язаних з побудовою «зовнішнього» і «внутрішнього» описів системи. Етап, пов'язаний з побудовою зовнішнього опису системи, називається *макронідходом*. Етап, пов'язаний з побудовою внутрішнього опису системи, називається *мікронідходом*.

Макронідхід – спосіб, за допомогою якого проводиться зовнішній опис системи. На етапі побудови зовнішнього опису робиться упор на сумісну поведінку всіх елементів системи, точно вказується, як система відгукується на кожну з можливих зовнішніх (вхідних) дій. Система розглядається як «чорний ящик», внутрішня будова якого невідома (рис. 4.2).

У процесі побудови зовнішнього опису дослідник має можливість, впливаючи різним чином на вхід системи, аналізувати її реакцію на відповідні вхідні дії. При цьому ступінь різноманітності вхідних дій принциповим чином пов'язаний з різноманітністю станів виходів системи. Якщо на кожну нову

комбінацію вхідних дій система реагує непередбачуваним чином, випробування необхідно продовжувати. Якщо на підставі одержаної інформації може бути побудована система, що в точності повторює поведінку досліджуваної, завдання макропідходу можна вважати вирішеним.



Рисунок 4.2 – Модель типу «чорний ящик»

На перший погляд дана модель досить проста і не заслуговує на велику увагу. Але ця простота дуже обманлива, за нею приховано багато складних речей. Ці речі виявляються, як тільки від формальної моделі ми переходимо до побудови змістовної моделі.

Маючи справу з невідомими для нас об'єктами, якщо ми знаємо їх вхідні й вихідні величини, ми вже досить багато знаємо про ці об'єкти. Розглянемо приклади біології, медицини. Вивчаючи клітину, ми з'ясовуємо, що в неї надходить і що є на виході. Такі знання вже багато говорять про функції клітини і роль її в організмі. Наші знання про органи людини: серце, легені, нирки та ін. – описуються *моделлю «чорний ящик»*. Такі знання про ядро клітини, мітохондрії та інші форми клітини достатні для лікування багатьох захворювань. Зміни екологічних систем під впливом антропогенної діяльності також можна описати цією моделлю, спостерігаючи, який рівень навантаження призводить до порушення рівноваги в екосистемах і незворотних змін. Таке спостереження за моделлю може бути підставою для встановлення норм граничнодопустимого навантаження (ГДН) на певні системи. Таким чином, модель системи «чорний ящик» доцільно використовувати у випадках, коли знання про структуру системи не дуже важливі, а метою дослідження є реакція систем на вхідні параметри.

Крім того, інколи подання системи у вигляді «чорного ящика» є єдиним способом вивчення системи. Наприклад, вивчення психології людини, коли вивчають способи дії на свідомість людини і наслідки цієї дії. Криміналісти також використовують модель «чорний ящик». Дослідження на так званому «детекторі правди» виконуються на рівні моделі «чорний ящик»: вхід – це слова, вихід – зміни ритму дихання, тиску, електричних імпульсів мозку, зміна провідності шкіри, виділення поту і т. ін. Зрозуміло, що використання цієї моделі за неможливості дослідження структури системи дозволяє вивчити її поведінку.

Модель «чорний ящик» при формальному математичному розгляді може мати подання системи у вигляді оператора, який діє на вхідні величини і перетворює їх у вихідні. Якщо оператор системи враховує, наприклад, зміну в часі, то такий опис системи буде динамічним. Сам оператор може бути простим

чи складним. Він може мати одну або декілька вхідних величин. Може змінюватися в часі, залежати від зовнішніх умов. Отже, як бачимо, модель «чорний ящик» може бути і надзвичайно складною.

Складність побудови моделі типу «чорний ящик» полягає ще й у тому, що вона є основою подальшого вивчення системи і розроблення конкретних пропозицій для практичної діяльності. На першому етапі аналізу системи можна вибрати або дуже багато вхідних величин, тоді система з простої перетвориться в складну, велику, і вивчити її дуже важко, або вибрати недостатню кількість вхідних величин і система стає спрощеною, вивчення її не дасть практичного результату. Якщо модель служить для цілей розроблення певного проекту, для певних практичних рекомендацій, то помилки моделювання й аналізу на початкових етапах виправити пізніше досить важко і коштує це в 10–100 разів більше. Наприклад, автомобілебудування. У моделі автомобіля на початку його промислового виробництва ніхто не врахував вихлопних газів, теплового випромінювання. Це призвело до виникнення смогу, в якому постраждали люди великих міст, до порушення озонового шару Землі, до глобального потепління. Цих явищ могли б уникнути якщо початково до моделі включили зазначені вихідні величини й автомобілебудування їх врахувало. Тепер виправити ці наслідки надто важко.

Отже, метод «чорного ящика» полягає в тому, щоб виявити, наскільки це можливо, структуру системи і принципи її функціонування, спостерігаючи лише входи та виходи. Подібний спосіб опису системи деяким чином аналогічний табличному завданню функції. Саме це дозволяє на першому етапі системного дослідження встановити властивості системи, структура якої в залежності від мети системного аналізу може розглядатися в подальшому за допомогою інших типів моделей.

При *мікронідході* структура системи вважається відомою, тобто передбачається відомим внутрішній механізм перетворення вхідних сигналів у вихідні. Дослідження зводиться до розгляду окремих елементів системи. Вибір цих елементів неоднозначний і визначається завданнями дослідження і характером досліджуваної системи. При використанні мікронідходу вивчаються структура кожного з виділених елементів, їх функції, сукупність і діапазон можливих змін параметрів.

Мікронідхід – спосіб, за допомогою якого проводиться внутрішній опис системи, тобто опис системи у функціональній формі.

Наслідком цього етапу дослідження повинне з'явитися виведення залежностей, що визначають зв'язок між множиною вхідних параметрів, параметрів стану і вихідних параметрів системи. Перехід від зовнішнього опису системи до її внутрішнього опису називають завданням реалізації.

Завдання реалізації полягає в переході від зовнішнього опису системи до її внутрішнього опису. Завдання реалізації є одним із найважливіших завдань у дослідженні систем і, по суті, відображає абстрактне формулювання наукового підходу до побудови математичної моделі. У такій постановці завдання моделювання полягає в побудові безлічі станів і вхід-вихідного відображення досліджуваної системи на основі експериментальних даних. На сьогодні

завдання реалізації вирішене в загальному вигляді для систем, у яких відображення вхід-вихід лінійне. Для нелінійних систем загального розв'язання завдання реалізації поки не знайдено.

Використання мікропідходу дозволяє, знаючи структуру системи, визначати, як вхідні параметри перетворюватимуться у вихідні. Наприклад, якщо ми знаємо структуру очисних споруд та параметри кожного елемента, тоді можливо розрахувати вихідні параметри скиду або викиду, якщо нам відомі концентрації забруднювальних речовин на вході.

Розглянемо модель типу «склад системи». Будь-яка система завжди є складною, неоднорідною У ній існують елементи і навіть самостійні системи (підсистеми). Підсистеми можуть також складатися з елементів та підсистем. Тому за необхідності розглядають ієрархію підсистем, розрізняють підсистеми 1, 2, 3-го і т. д. рівнів. Формальна модель типу «склад системи» – це прямокутник, що обмежує систему і визначає її межі, й зображення складових частин, елементів та підсистем у межах прямокутника системи. Як правило, підсистеми зображують прямокутником, а елементи – колом чи овалом, як це показано на рис. 4.5.

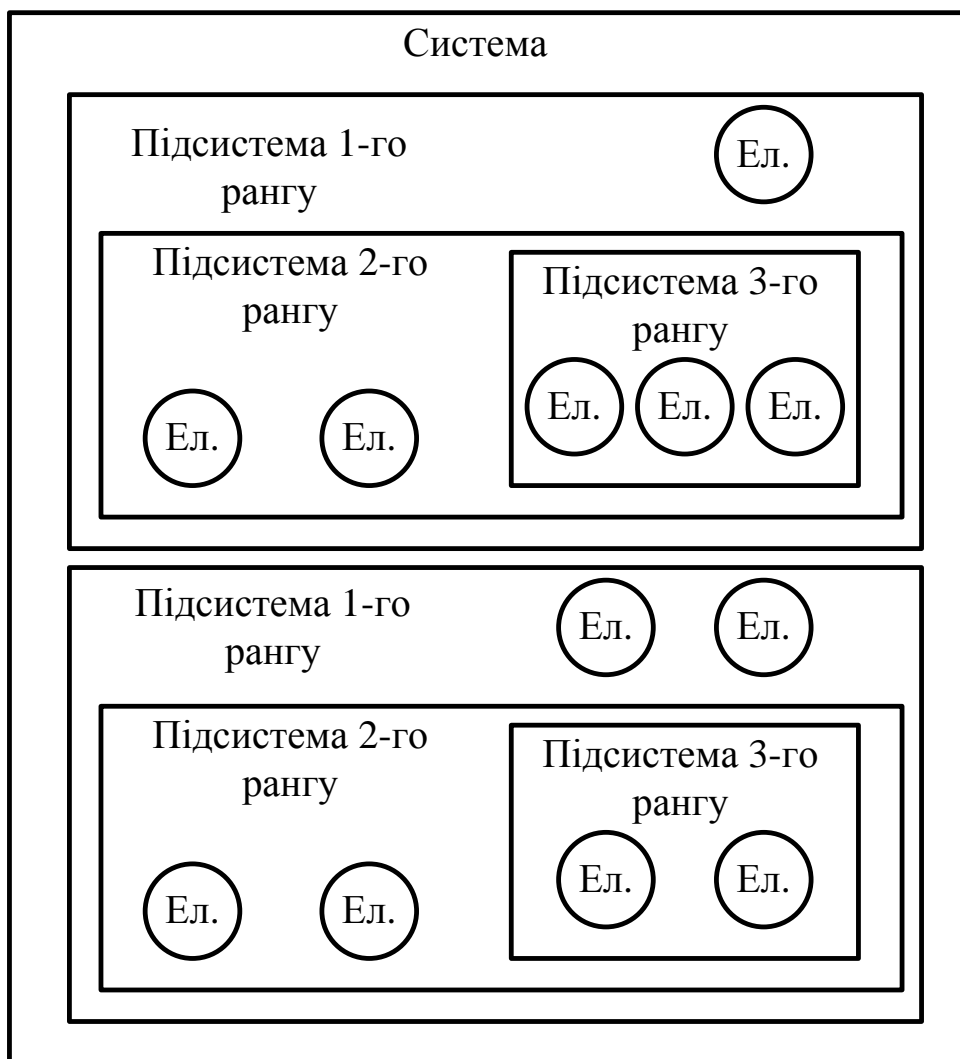


Рисунок 4.5 – Формальна модель «склад системи»

Розглянемо аналіз системи «біогеоценоз» із використанням формальної моделі «склад системи». У біогеоценозі можна виділити дві підсистеми: абіотичну (екотоп) та біотичну (біотоп). У свою чергу, екотоп складається з кліматопу та едафотопу, а біотоп (біоценоз) – із фітоценозу, зооценозу та мікробіоценозу і т. д. (табл. 4.1). Цей поділ може бути різним на різних рівнях організації. Зокрема як підсистеми ландшафтної екосистеми можна виокремити екосистеми лісу, степу, водойми тощо.

Таблиця 4.1 – Результати аналізу системи «біогеоценоз»

Система	Підсистема 1-го рівня	Підсистема 2-го рівня	Елемент
Біогеоценоз	Екотоп	Кліматоп	Повітряний екотоп
			Водний екотоп
		Едафотоп	Елементи рельєфу
			Ґрунт
	Біоценоз	Фітоценоз	Трава
			Вищі рослини
			Водорості
			Бріофіти
			Лишайники
		Зооценоз	Травоїдні види
			Види хижаків
			Всеїдні види
		Мікробіоценоз	Сапротрофи
			Хемотрофи
			Міксотрофи

Модель «склад системи» будують на основі вивчення складових частин системи. На вербальному рівні маємо морфологічний опис (аналіз) системи. Модель «склад системи» є подальшим розвитком *субстрактного аналізу*. Цей аналіз залежить від системи, що вивчаємо, і від цілей моделювання, контексту, рівня знань аналітика. Наприклад, під час виконання морфологічного аналізу системи «тролейбус» виділено її складові частини. Залежно від цілей аналізу окремі елементи можуть розглядатись як підсистеми. Підсистемою можуть бути кабіна водія, двері. До підсистеми «двері» можуть входити полотно дверей, вікно, петлі, механізм відкривання та інші елементи, до підсистеми «кабіна водія» – сидіння, вікно, кермо, панель керування тощо. Під час побудови змістовної моделі «склад системи» насамперед визначають межі системи, тільки тут їх визначити потрібно більш чітко, ніж при побудові моделі «чорний ящик», оскільки вони явно входять до моделі. Побудова змістовної моделі «склад системи» залежить від:

- цілей моделювання, проблем, які необхідно вирішувати;
- точки зору аналітика;

- контексту вивчення системи;
- ступеня потрібної деталізації;
- рівня знань і досвіду аналітика.

Труднощі побудови моделі мають низку причин.

По-перше, поняття елемента системи можна розуміти по-різному. Те, що в одному випадку для вирішення однієї проблеми є елементом, в іншому – складною системою.

По-друге, будь-яка модель є цільовою, а для різних цілей у системі потрібно розглядати різні частини.

По-третє, з різної точки зору система виглядає по-різному: наприклад, для директора, головного бухгалтера чи інженера заводу складається з різних систем.

По-четверте, будь-який поділ є відносним, наприклад гальмівну систему тролейбуса можна вважати складовою частиною системи керування або ж віднести до ходової частини.

Для успішної побудови моделі «склад системи» і при виборі підсистем та елементів системи потрібно виходити із принципу цілісності системи й враховувати умови необхідності та достатності виконаного аналізу.

Принцип цілісності побудови моделі полягає в тому, що модель повинна відображати систему повністю з урахуванням усіх її функцій.

Умова необхідності полягає в тому, що до моделі вносять лише елементи, необхідні для виконання системою своїх функцій. Вона дозволяє виявити істотні елементи й відділити їх від неістотних.

Умова достатності полягає у тому, що при побудові моделі враховують чи дозволяють виділені частини достатньою мірою враховувати всі функції системи. Вона забезпечує включення всіх необхідних частин до моделі і дозволяє обмежити аналіз його з різноманітних неоднорідних частин. Кожна частина системи має свої функції, свою будову і свою поведінку. Вона може визначатись як «підсистема» або «елемент» системи залежно від завдань дослідження, контексту розгляду системи. Суть понять «підсистема» і «елемент» дуальна: «підсистема» для частин системи, що знаходяться вище, виступає як елемент, а для частин системи, що знаходяться нижче в структурній ієрархії «підсистема», – як система.

Розглянуті нами моделі послідовно дозволяють збільшувати ступінь знань про систему. **Модель «структура системи»** несе ще більше інформації про систему. Якщо, наприклад, для системи «сім'я» достатньо зазначити склад сім'ї, то для характеристики екосистем, чи іншої системи одного переліку елементів та підсистем замало. Необхідно ще вказати зв'язки між елементами, об'єднати їх в одне ціле, тобто вказати структуру системи.

Під *структурою системи* розуміють сукупність необхідних та достатніх для досягнення цілі відношень і зв'язків між елементами.

У визначенні системи ми вказували на наявність зв'язків між елементами. У реальних системах зв'язків між елементами незкінченна кількість. Кожен природний об'єкт має множину зв'язків з усіма іншими об'єктами. Зв'язки в системі можуть відігравати істотну роль чи бути неістотними, а інколи й

шкідливими. У структурі системи вказують сукупність закономірних, істотних зв'язків, що забезпечують функціонування системи.

Для вивчення структури системи використовують два підходи, а саме:

- теорії множин;
- теорії графів.

У теорії множин структуру виражають відношеннями між елементами. Теорія розглядає подвійні, потрійні та інші відношення, їм у відповідність ставляться бінарні відношення, добутки елементів. У теорії множин структуру системи описують за допомогою матриць суміжності. Матриця суміжності – це математичний об'єкт, зображений у вигляді прямокутної матриці, елементи якої встановлюють зв'язки і відношення між складовими частинами системи. Як правило, матриці суміжності, що описують структуру системи, є розрідженими матрицями, тобто матрицями великих розмірів, значна кількість елементів якої дорівнює нулю. Теорія множин розглядає множини вхідних і вихідних процесів, рівняння, що встановлюють зв'язки між множинами вхідних і вихідних величин за допомогою операторів переходу.

Більш простим і менш формалізованим є підхід теорії графів. Зображення структури подається у вигляді графа. Граф структури системи встановлюють шляхом декомпозиції системи і вивчення зв'язків між складовими частинами.

Формальна модель "структура системи" – це, як правило, зображення системи у вигляді графа, хоча під час теоретичного вивчення може бути і матриця суміжності. Ми як формальну модель «структура системи» будемо розглядати певний граф. Ця модель містить елементи системи, зображені точками чи кружечками і зв'язки між ними зображені лініями або лініями зі стрілками. Як елементи в моделі «структурна схема» розглядають усі складові частини системи, не розрізняючи, підсистема це чи елемент, як це було в моделі «структурна схема».

Графом G називають деяку сукупність пар елементів вершин і ребер. Вершини зображають у вигляді точки, ребра – лініями.

Розглянемо деякі поняття теорії графів.

Підграф – підграфом графа G називають граф, усі вершини та ребра якого знаходяться серед вершин і ребер графа G .

Напрявлений граф – це такий граф, ребра якого мають напрямок.

Ненапрявлений граф – граф, у якому напрямок ребер не відіграє ролі або його неможливо визначити.

Зв'язаний граф – це граф, у якого для будь-яких двох різних вершин існує послідовний ланцюг вершин і ребер, що їх з'єднує.

Зважений граф – це граф, у якому всім ребрам ставиться у відповідність певне число.

Циклом називають будь-яку замкнену послідовність вершин і ребер.

Деревом називають граф, у якого відсутні цикли.

Поняття теорії графів широко використовують при аналізі структури системи. Структура системи відображає зв'язки між елементами. При розгляді структури елементами системи вважають усі складові частини, не виділяючи окремих підсистем, тобто у моделі структури системи підсистему вважають

елементом. Структуру системи зображають у вигляді графа. Вигляд графа структури описують його топологією.

Граф може мати таку топологію: лінійну, кільцеву, ієрархічну, деревоподібну, мережеву, матричну. Вигляд структур, що відповідають зазначеній топології, показаний на рис. 4.6.

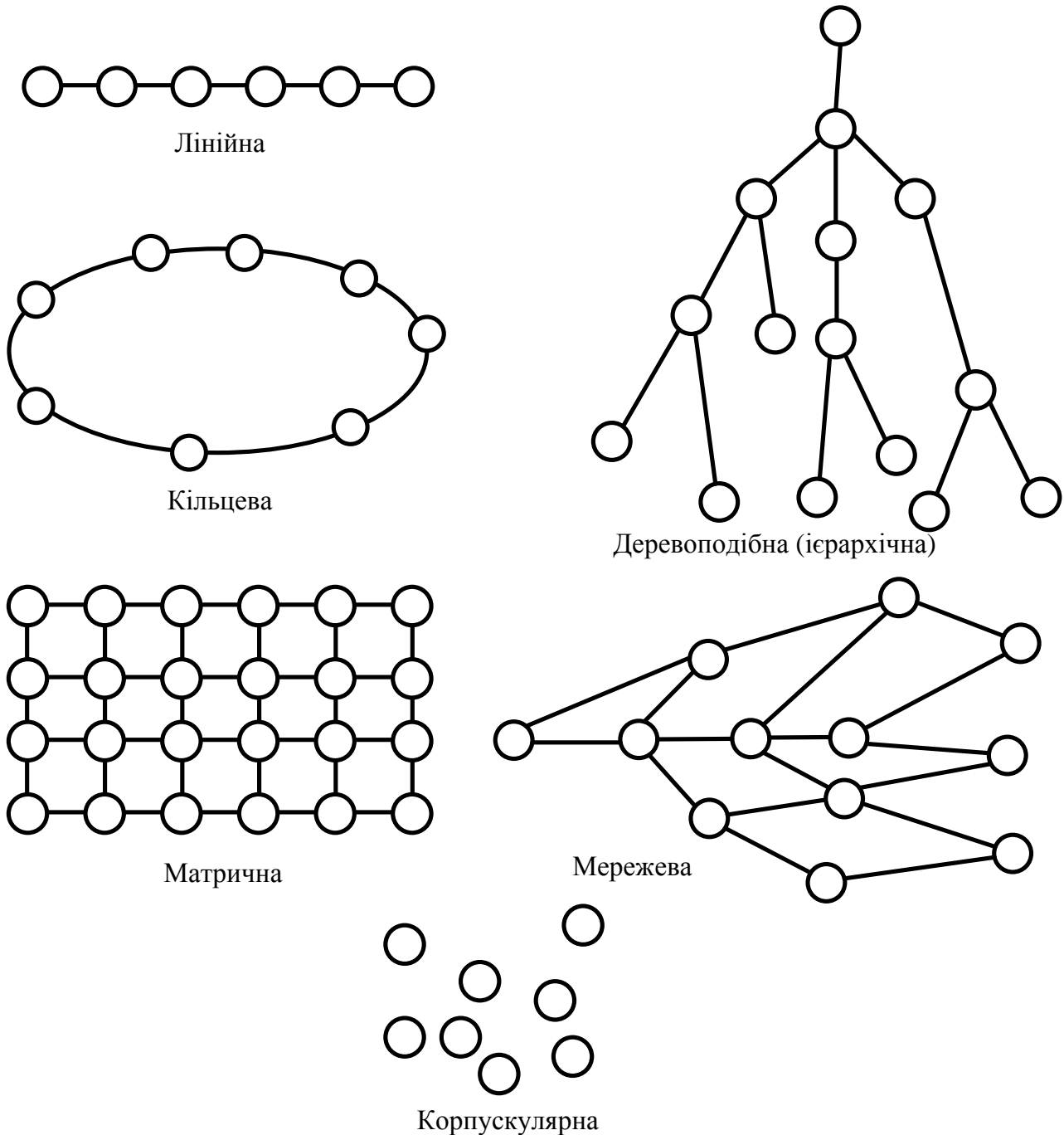


Рисунок 4.6 – Типи (топологія) структур систем

Лінійна структура – це структура, в якій кожна вершина зв’язана лише з двома іншими вершинами і є дві крайні вершини. У системах вона трапляється часто, наприклад на виробництві: виготовлення заготовки, послідовні операції обробки, технічний контроль деталі утворюють лінійну структуру. У системі «біогеоценоз» лінійна структура відповідає передачі енергії від продуцентів до

консументів найвищого порядку по трофічному ланцюгу.

Кільцева структура – це лінійна структура, в якій крайні вершини зв'язані між собою. Кільцева структура описує, наприклад, обіг грошей у фінансових організаціях. Вона характерна для технологічних операцій, коли цикл виробництва повторюється багаторазово. В екосистемах кільцеві структури описують, наприклад, колообіг біогенних речовин, колообіг води, періодичні зміни екологічних факторів (наприклад, кліматичні, фотоперіодичні) або інші матеріальні потоки.

Ієрархічні структури – це структури, в яких елементи розміщені на різних рівнях, причому елементи 1-го рівня підпорядковані елементам (i-1)-го рівня і впливають на елементи (i+1)-го рівня. Різновиди ієрархічних структур будуть розглянуті в подальшому. Найчастіше вони зтрапляються під час аналізу організаційних систем, у яких є чітка структура підпорядкування. Типовий приклад – це структура підпорядкування в армії. Ієрархічна структура може описувати і будову багатьох складних систем, рівнями яких є підсистеми, як, наприклад, ми це бачили при розгляді моделі «склад системи».

Для ієрархічних систем зв'язки між елементами можуть мати координаційний та субординаційний характер. Координаційний характер мають зв'язки між елементами, що знаходяться на одному рівні, субординаційні – між елементами різного рівня, тобто елементи нижчого рівня підпорядковані вищому. В екосистемах ієрархічно підпорядковані складові органчного світу (див. п. 2.1)

Деревоподібна структура – це ієрархічна структура, в якій відсутні цикли. Так поширення в навколишньому середовищі забруднювальної речовини від джерела викиду природного (наприклад, виверження вулканів) або антропогенного походження (наприклад, труба ТЕЦ) та її подальша міграція через трофічні зв'язки можуть бути описані цією структурою. Також яскравим прикладом такої структури в екосистемах є зв'язки між видами в консорції.

Мережева структура (матрична) – це різновид ієрархічної структури, в якій можливі зв'язки через декілька рівнів і допускається наявність циклів. Вона характерна для рівномірного (регулярного) розподілення особин певного виду чи популяції на території біогеоценозу, яке може спостерігатися, наприклад, за наявності внутрішньовидової конкуренції.

Корпускулярна структура – це структура, що складається з однакових елементів, слабозв'язаних між собою; зникнення частини елементів майже не відображається на функції системи. Таке розподілення елементів характерне для молекул під час броунівського руху, розташування частинок піску на березі тощо. Проте таку структуру можна спостерігати і на більш високому рівні організації органічного світу, наприклад випадкове розподілення особин популяції на певній території.

Під час виконання системного аналізу для складних біологічних систем будують декілька структур: структуру потоків енергії, речовини, інформації; видову структуру, структуру функціонування, розподілення елементів у просторі та ін. Вони, як правило, бувають різної топології: структура

керування – ієрархічна, структура потоків енергії – лінійна; структура потоків речовини – лінійна чи кільцева, структура розподілення у просторі – мережева або корпускулярна тощо.

Модель «структурна схема системи» – це сукупність розглянутих вище трьох типів моделей, а саме: «чорний ящик», «склад системи» та «структура системи». Вона є найбільш детальною та повною моделлю системи. Її зображують також у вигляді графа, але вузли його, як правило, наповнюють певним змістом, зображують прямокутником, еліпсом чи колом. У моделі «структурна схема системи» показують:

- границі системи;
- елементний склад системи;
- зв'язки між окремими елементами;
- зовнішні зв'язки системи.

Формальна модель «структурна схема» містить елементи системи, зображені, як правило, прямокутниками чи еліпсами, всередині яких записана назва елемента і зв'язки між елементами показані лініями чи стрілками. Ця модель одержала широке міждисциплінарне визнання. Її використовують у різних наукових дисциплінах, технічних організаційних та інших документах. Тому існує багато особливостей зображення складових частин на моделі «структура системи». Так, часто зовнішні межі системи на цій моделі не показують, назву системи записують як заголовок чи підпис до моделі, елементи зображають на різних рівнях і по-різному позначають, зв'язки між елементами показують лініями різних типів, стрілками, у вигляді шин та ін. Модель «структурна схема» системи примикає до великої різноманітності моделей, кожна з яких має своє призначення і свої особливості.

Модель «структурна схема» деколи називають моделлю «білий ящик», розуміючи під цим визначенням те, що на противагу моделі «чорний ящик» у ній повністю показана внутрішня будова системи.

Модель «структурна схема», як й інші моделі, залежить від точки зору, цілей аналізу, контексту розгляду системи, тому таких моделей може бути велика кількість. Як правило, для системи будують кілька моделей, що відображає різноманітність зв'язків у системі, різні підходи до вивчення системи, різні контексти її розгляду.

Розглянуті нами моделі є найбільш уживаними під час виконання системного аналізу. Вони описують систему. Для повноти аналізу їх доповнюють моделями зовнішнього середовища. Ці моделі відображають контекст розгляду проблеми. Як правило, будують декілька моделей зовнішнього середовища, а саме: модель середовища прямої дії та модель середовища опосередкованої дії, модель властивостей середовища (рис. 4.2).

На цих моделях систему, як правило, зображують у вигляді еліпса, а зовнішні по відношенню до неї системи – у вигляді прямокутників або прямокутників із тінню, щоб підкреслити той факт, що вони знаходяться в іншій площині, ніж система, що вивчається. Середовище прямої дії – це ті навколишні системи, з якими безпосередньо взаємодіє система. Середовище опосередкованої дії – це системи, безпосередньо з якими ця система не взаємодіє,

але вони через існуючі зв'язки впливають на функціонування системи.

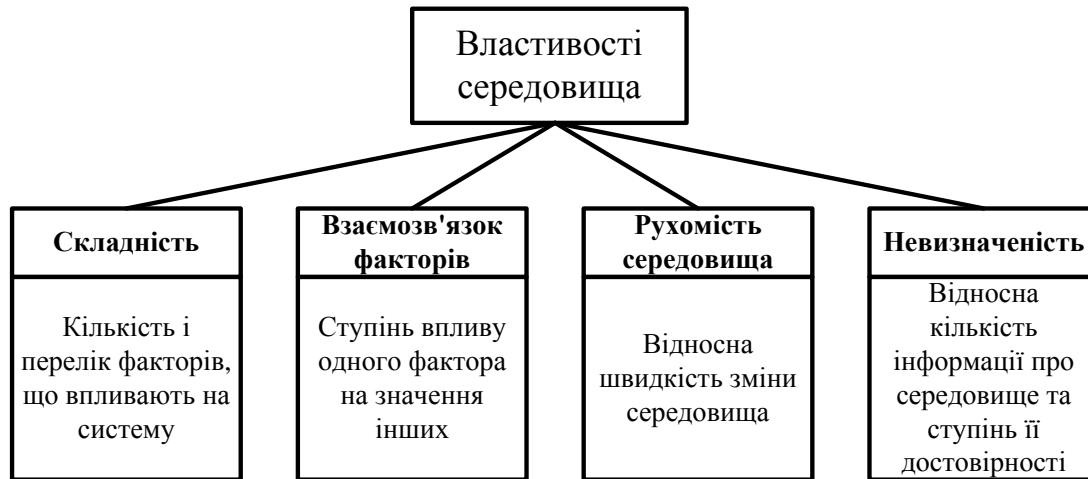


Рисунок 4.2 – Модель властивостей середовища

Крім того, у вигляді окремої моделі наводять властивості зовнішнього середовища. Такими властивостями є складність середовища, його рухомість, ступінь визначеності, взаємозв'язок факторів середовища.

4.5 Узагальнений алгоритм побудови математичної моделі

Процедуру побудови математичної моделі реальної системи, процесу або явища можна подати у вигляді алгоритму. Блок-схема, що ілюструє алгоритм побудови математичної моделі, наведена на рис. 4.3.

Основні етапи побудови математичної моделі:

1. Виділення системи із зовнішнього середовища. Виділення зв'язків із зовнішнім середовищем, розбиття множини зв'язків на вхідні та вихідні параметри. Спостереження за системою, накопичення інформації, достатньої для висунення гіпотез про структуру системи та її функціонування.

2. Вибір апарату формалізації здійснюється дослідником і залежить від багатьох чинників, зокрема – від цілей моделювання, наявної інформації, одержаних експериментальних даних.

3. Побудова зовнішнього опису зводиться до пошуку області визначення (у просторі вхідних дій) та області значень (у просторі виходу), розмірність яких була визначена на етапі 1, і визначенні відповідності між вхідними та вихідними параметрами.

4. Якщо перевірка адекватності показує, що побудована модель не задовольняє вимоги, що ставляться до неї, і причиною цьому є складніший характер поведінки системи, то проводиться вибір нового методу математичного опису.

5. У разі вдалого побудованого зовнішнього опису проводиться перехід до внутрішнього опису, при цьому розмірність простору станів системи (тобто розмірність вектора) повинна бути мінімальною.

6. Визначення (ідентифікація) якісних і кількісних характеристик параметрів, що визначають функціонування системи.

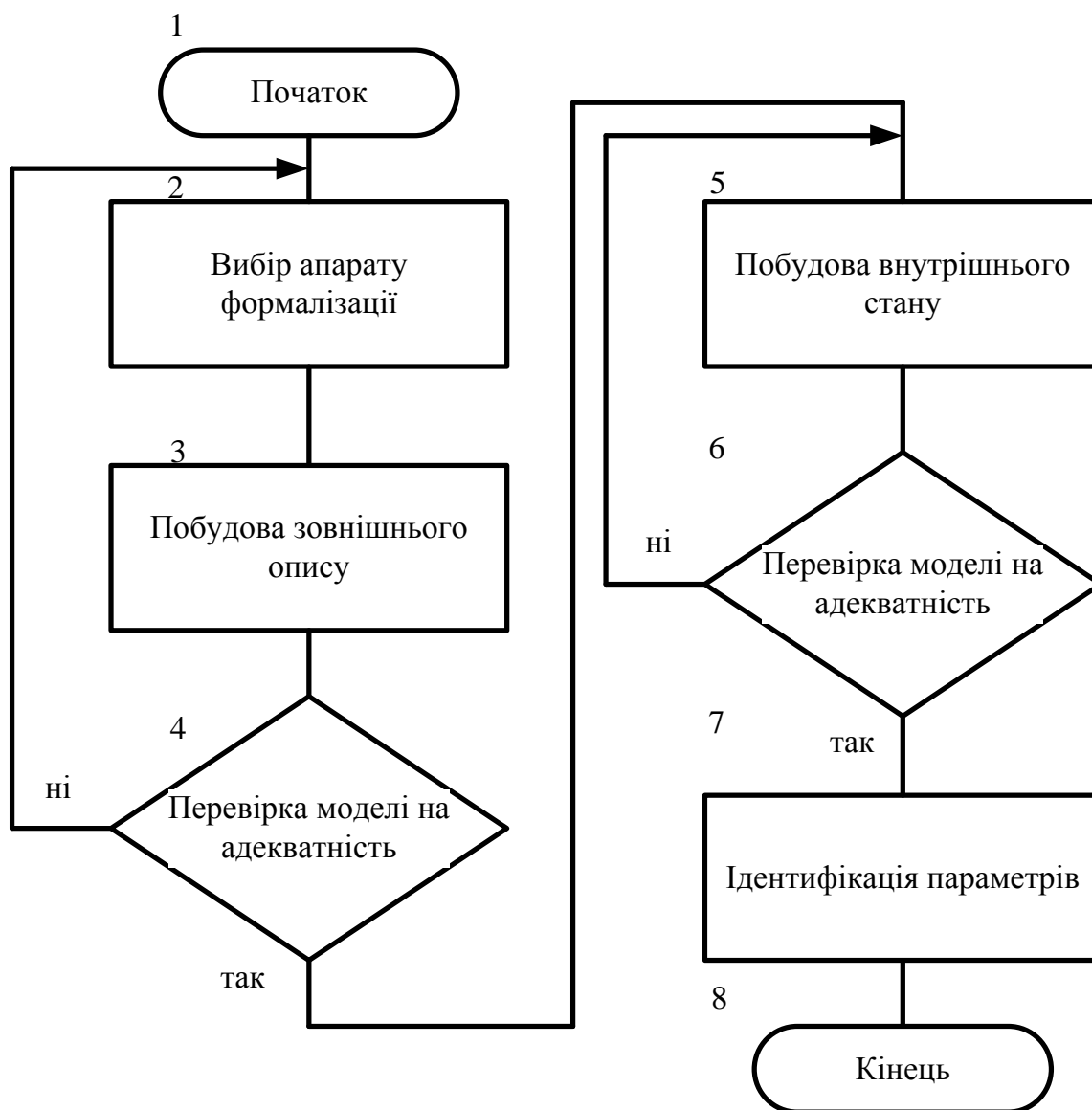


Рисунок 4.3 – Алгоритм побудови моделі системи

Серед зображених етапів побудови математичної моделі методи ідентифікації параметрів розроблені найкраще. При їх використанні передбачається, що структура системи відома, а невідомі тільки значення параметрів. Завдання параметричної ідентифікації в цьому разі зводиться до пошуку значень параметрів, що забезпечують мінімізацію деякої функції помилки. Особливе значення на всіх етапах побудови математичної моделі є перевірка адекватності, несуперечності моделі та її достатності для реалізації цілей дослідження.

Якщо побудована модель недостатньо повно відображає властивості модельованої системи, то ніяке застосування найсучасніших засобів і методів дослідження не може дати задовільних результатів. Така немінуча властивість використання математичної моделі. Всі одержувані під час її дослідження результати відображають властивості власне моделі, а не початкової системи, для дослідження якої модель була розроблена. Після того як модель побудована, вона починає «жити своїм власним життям».

4.6. Формалізовані процедури системного аналізу

4.6.1. Аналіз та синтез у теорії пізнання і системному аналізі

Системний аналіз – це складний процес вивчення системи і розроблення варіантів вирішення проблеми. Він вимагає від системного аналітика інтуїтивного мислення, неформального підходу до проблеми, глибоких знань і практичних навичок. У системному аналізі розроблено цілий ряд формалізованих процедур, орієнтованих на одержання практичного результату. Провідне значення серед цих процедур займають процедури декомпозиції та агрегації. У теорії пізнання їм відповідає метод наукового вивчення, відомий як аналіз та синтез.

Аналіз (грецьке *analysis* – розкладання, розчленування) – це метод наукового дослідження, який полягає в уявному або реальному розчленуванні цілого на складові частини і вивчення цих частин.

Синтез (грецьке *synthesis* – з'єднання, складання) – метод вивчення предмета в цілісності, єдності та взаємозв'язку його частин. Це з'єднання (уявне чи реальне) різних об'єктів, елементів в одне ціле (систему).

Аналіз та синтез – діалектично протилежні процеси уявного або реального розчленування цілого на частини та об'єднання частин в одне ціле. Діалектично протилежні ми говоримо тому, що один процес заперечує інший, але у теорії пізнання вони виступають разом і один без одного втрачають свій зміст, без аналізу немає сенсу виконувати синтез і навпаки. Це взаємозв'язані та взаємозумовлені логічні методи наукових досліджень. Вони виникли на основі практичної діяльності людей, їхнього досвіду. Єдність аналізу та синтезу забезпечує об'єктивне, адекватне відображення дійсності.

4.6.2. Декомпозиція та агрегація

Декомпозиція у системному аналізі відповідає аналізу в теорії пізнання. Вона полягає в розбитті системи на підсистеми і вивчення підсистем, завдання – на підзавдання, цілей – на підцілі.

Зазначений процес повторюють, що приводить до деревоподібних ієрархічних структур цілей завдань і завдань системи, вивчення яких дозволяє вивчити систему, її внутрішній склад та функціонування.

Агрегація – це об'єднання частин в одне ціле.

Якщо декомпозиція є етапом аналізу, при якому вивчають склад системи, роботу її елементів, одержують знання про те, як працюють складові частини системи, які функції вони виконують, то агрегація є етапом синтезу. При агрегації вивчають взаємодію елементів і функціонування системи в цілому, одержують знання, чому і для чого система функціонує. Співвідношення етапів аналізу й синтезу показане у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняння етапів аналізу та синтезу

Етап аналізу	Етап синтезу
Декомпозиція системи. Розбиття на частини	Розгляд системи як частини макросистеми (великої зовнішньої системи)
Пояснення поведінки кожної частини системи	Пояснення поведінки єдиного цілого
Знання про частини агрегуються (об'єднуються) в знання про ціле	Розуміння роботи цілого дезагрегуються для пояснення частин. Визначаються ролі агрегатів у цілому
В аналізі розкривається структура системи, те, як вона працює. Продукт аналізу – знання	У синтезі розкривається функціонування системи, те, чому система працює саме так. Продукт синтезу – розуміння
Мета аналізу – знання	Мета синтезу – розуміння

4.6.3. Процедура декомпозиції. Алгоритм декомпозиції

Процес декомпозиції завжди здійснюється на основі певної моделі системи. За основу береться модель і відповідно до неї виконується декомпозиція. Найбільш часто декомпозиція здійснюється за моделями «склад системи», «структура системи». Розглянемо особливості виконання декомпозиції з використанням цих моделей.

Більшість об'єктів, як правило, є складними, малоструктурованими, нечітко формалізованими. Тому декомпозиція – складний творчий процес. Відносно легко виконати декомпозицію технічних систем, створених людиною. При декомпозиції відповідно до моделі «склад системи» виділяють основні вузли системи (підсистеми та рівня). Пізніше кожен з цих вузлів можна розділити на підсистеми II, III і т. д. рівнів, доти, поки подальший поділ стане неможливим без зміни функціональних властивостей елемента. Значно більше питань виникає при декомпозиції біологічних, соціально-технічних, організаційних та інших систем.

Особливе значення в системному аналізі має декомпозиція цілей і завдань системи. На основі такої декомпозиції будуються функціональні й деякі інші моделі. Ця декомпозиція виконується у декілька етапів. На першому етапі відповідно до цілей системи визначають головні завдання системи, які в сукупності забезпечують виконання всіх цілей системи. На наступних етапах завдання розбивають на окремі завдання, завдання – на підзавдання і окремі функції. У результаті одержують ієрархічне дерево цілей системи.

Під час виконання декомпозиції і по її закінченні для оцінки якості виконаної роботи необхідно відповісти на два запитання: чи забезпечена повнота декомпозиції і чи завершеною є декомпозиція? Виконати декомпозицію і відповісти на ці запитання можна на основі моделі системи.

Модель системи, на основі якої виконується декомпозиція, називають моделлю-основою.

Процедура декомпозиції полягає у зіставленні з моделлю-основою. Раніше відмічалось, що модель визначається метою системи. Звідси випливає, що декомпозиція системи залежить від цілей системи чи цілей дослідження, яке виконує системний аналітик.

Повнота декомпозиції залежить від повноти формальної моделі, взятої за основу, тобто моделі-основи. Повні формальні моделі систем називають *фреймами*. Формальні моделі – це абстрактні моделі систем. Повною називається модель, яка забезпечує повноту аналізу, до якої входять всі елементи системи. Кількість таких моделей обмежена. Наприклад, модель, що поєднує: елемент, відношення між елементами, середовище – це фрейм – формальна модель найвищого рівня абстракції. Вона є повною, тому що містить усі можливі елементи систем. Конкретні змістовні моделі будують на її основі. Використовуючи таку модель, можна побудувати змістовні моделі планети, держави, економіки, тролейбуса і т. п. Формальною моделлю діяльності є модель, показана на рис. 4.4.

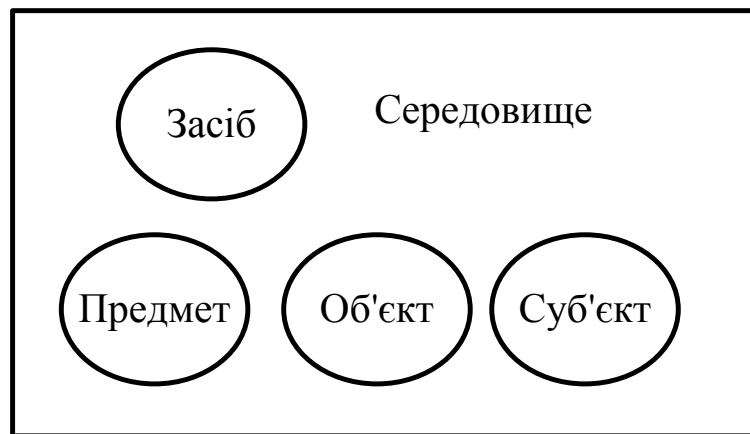


Рисунок 4.4 – Повна формальна модель діяльності (фрейм)

До неї входять предмет діяльності, засіб, суб'єкт, об'єкт і середовище. Закінчення процедури декомпозиції щодо кожної моделі-основи визначається двома вимогами – вимогою простоти і вимогою повноти створеної моделі. *Простота декомпозиційної моделі* оцінюється розмірами дерева декомпозиції вглибину і вширину. Рішення про припинення процедури декомпозиції приймається на основі компромісу між потрібною повнотою і бажаною простотою моделі. Основою компромісу є принцип «істотності». Згідно з ним до моделі вносять лише істотні компоненти по відношенню до цілей аналізу.

Повнота розгляду системи полягає у всебічному розгляді системи. Забезпечується вона використанням моделі-основи. Оскільки моделей-основ багато, то необхідно співвідносити цілі й завдання системного аналізу з питанням використання всіх потрібних й корисних моделей. Тобто декомпозиція – це не акт побудови однієї моделі, вона може містити побудову деякої кількості моделей. Чим більше буде використано моделей-основ для декомпозиції, чим більше змістовних моделей буде побудовано, тим глибшим і

кориснішим буде аналіз і більш виваженими рекомендації, які на основі такого аналізу будуть розроблені. На рис. 4.5 наведено загальний алгоритм виконання декомпозиції з використанням ряду фреймів.

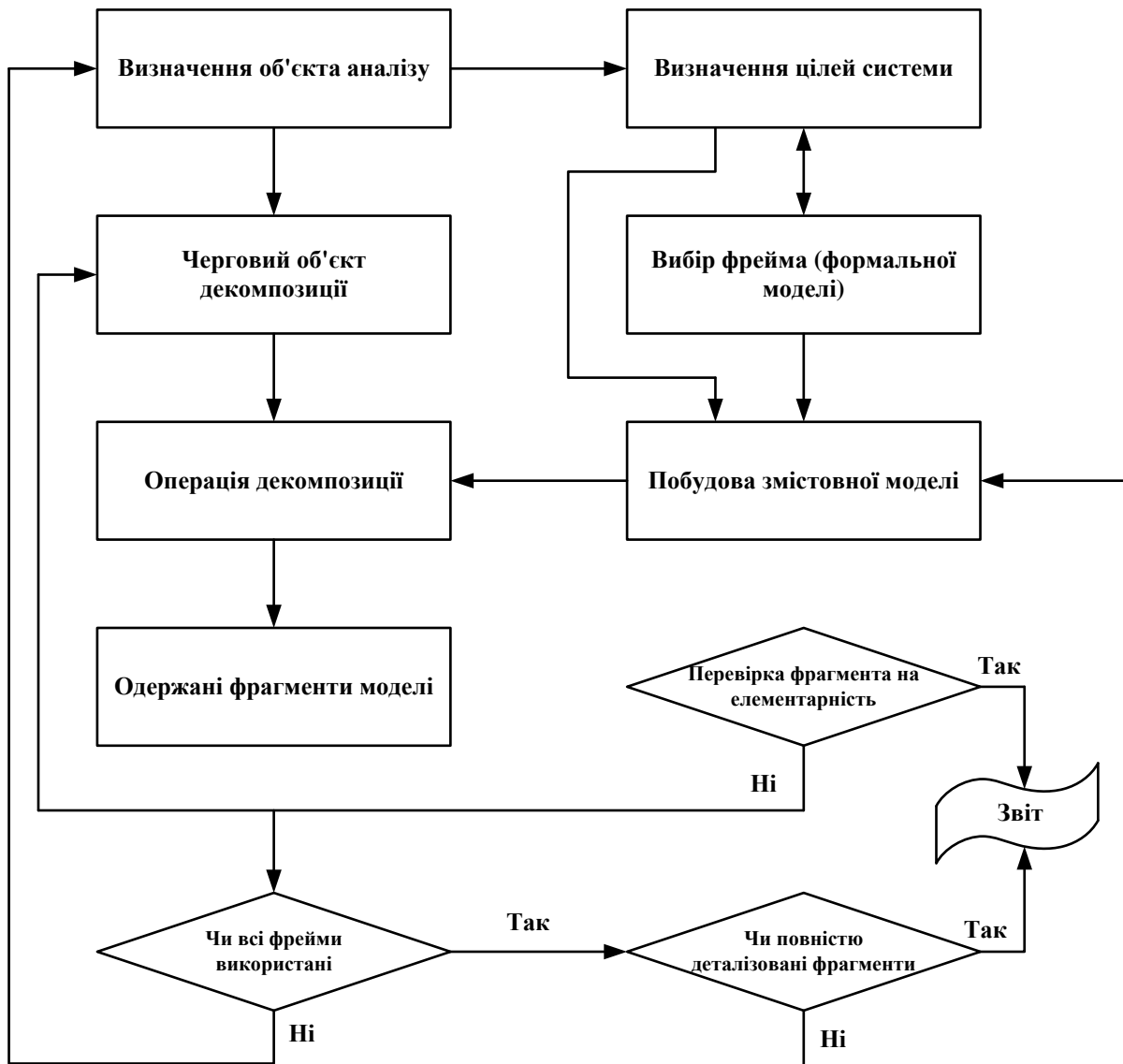


Рисунок 4.5 – Блок-схема алгоритму декомпозиції

4.6.4 Агрегування

Агрегування – це об'єднання декількох розрізнених елементів в одне ціле. Агрегат відрізняється від простої сукупності зовнішньою й внутрішньою цілісністю. Це означає, що між елементами агрегату з'являються нові зв'язки, що створюють нові властивості, яких не було до об'єднання.

Емерджентність – властивість агрегату, яка полягає в тому, що його властивості не зводяться до властивостей складових частин, а з'являються нові, властиві лише для даного об'єднання. Нові властивості в системі встановлюються «несподівано» і передбачити їх подекуди неможливо, а деколи неможливо й пояснити. Наприклад, відомо, що головний мозок людини має 10^{10} нейронів і кожен них має від 10 до 100 нервових закінчень – синапсів. Але для

науки не відомі ці взаємозв'язки нейронів головного мозку, як вони взаємодіють між собою, як відбувається запам'ятовування інформації мозком: чи встановлюються нові зв'язки між нейронами, чи виділяється якась речовина чи це відбувається якимось іншим чином? У нас є лише певні аналогії, а саме: пам'ять комп'ютера та голографія. У комп'ютері інформація записується послідовно в елементах пам'яті у вигляді кодових величин, розміщених у певному порядку. В голограмі інформація запам'ятовується всім об'ємом голограми і кожна частина її зберігає всю інформацію, лише менш чітко з меншою кількістю деталей. Яка з цих моделей відповідає механізму запам'ятовування мозком, ми поки що не знаємо.

Аналогічною проблемою, наприклад, є завдання вивчення того, як працюють ноги в геконів – тропічних ящірок. У них на нозі тисячі надзвичайно тоненьких волосків, які охоплюють нерівності поверхні. Це дозволяє гекону бігати по поверхні вниз головою. Як здійснюється взаємодія волосків, звідки кожен із них «знає», у який бік відхилитися, щоб охопити нерівність і в потрібний момент відпустити її?

Емерджентність – характеристика внутрішньої цілісності системи. Існує тісний зв'язок між мірою відміни цілого (агрегату) від сукупності частин і ступенем організованості цілого. Чим більша ця різниця, тим більш високий рівень організованості має система. Наприклад, властивості комп'ютера і його складових частин істотно відрізняються. Комп'ютер рисує картини, відтворює музику, а інколи і сам її створює, грає у шахи і т. п. Таких властивостей не має жоден елемент, що входить до складу комп'ютера.

У системному аналізі розрізняють декілька форм агрегатів. Найбільш важливі з них такі: конфігуратор, оператор, структура.

Конфігуратор – мінімальна сукупність мов чи сторін опису системи, достатніх для повного знання системи відповідно до цілей дослідження. Тут під мовами розуміємо різні описи, які доповнюють один одного. Наприклад, телевізор з метою його виготовлення може бути описаний структурною, принциповою і монтажною схемами. Кожна із цих схем описується по-різному, різною мовою, відрізняються правила побудови схем, умовні позначення, характеристики системи, які кожна з них описує.

Типовим конфігуратором є службова характеристика людини, що поєднує ділові й професіональні якості, морально-психологічні сторони, сімейний стан та стан здоров'я. Цих сторін опису достатньо для того, щоб прийняти людину на роботу і доручити виконання певних функцій.

Опис деталі в трьох проекціях – це також конфігуратор, він дозволяє повністю описати деталь і виготовити її. Для визначення кожної точки поверхні деталі достатньо знати три її координати. Причому останнє не залежить від того, якою системою координат ми користуємося: декартовою, циліндричною, сферичною чи іншою.

Отже, конфігуратор системи містить у собі мінімальну кількість сторін її опису. Він дозволяє одержати повну інформацію про систему. До нього завжди входить мінімальна і необхідна кількість описів системи. При зміні цілей конфігуратор може змінюватися, може також змінюватися необхідна кількість

описів, що входять до конфігуратора. Знаючи конфігуратор системи, ми вважаємо, що знаємо про систему все, що потрібно відповідно до цілей.

Іншим видом агрегату є *оператор*, наприклад оператор класифікації. Деколи висловлюється думка, що класифікація – це розбиття на групи і підгрупи, тобто це процес декомпозиції. Насправді ж навпаки. Класифікацію виконують тоді, коли є досить багато об'єктів і їх потрібно якось об'єднати, класифікувати, знайти спільне в них. Тоді в дію вступає оператор класифікації. Він має такий вигляд: ЯКЩО <умова чи ознака, сукупність умов>, ТО ВІДНЕСТИ ДО <ім'я класу>.

Прикладів дії оператора класифікації можна навести чимало. Розглянемо приклад з металургії. У матеріалознавстві вивчалися сплави чорних металів. Їх досить багато і кожен із них має різні характеристики. Класифікація за вмістом вуглецю дозволяє виділити чавун і сталі, а серед сталей леговані сталі. Серед електротехнічних матеріалів виділяють провідники й ізолятори.

Зовнішня простота оператора класифікації не означає простоти її виконання. Класифікація – це доволі складний та неоднозначний процес, який вимагає глибоких професійних знань. Робота спеціалістів багатьох професій потребує виконання операції класифікації, це робота лікаря, юриста, археолога, ботаніка та інших.

Візьмемо, наприклад, медицину. Лікар ставить діагноз захворювання. За певними ознаками, відповідно до операції класифікації, він повинен визначити захворювання і вказати назву хвороби пацієнта. Все подальше лікування, його успіх залежать від правильності діагнозу. Але ми знаємо чимало прикладів лікарів, які були дуже хорошими діагностами але, на жаль, відомі також випадки лікарських помилок, коли неправильний діагноз призводив до трагічних результатів лікування. Без глибоких професійних знань неможливо поставити діагноз і вилікувати людину.

У математиці до агрегатів типу «оператор» також можна віднести певні статистики, наприклад віднесення ймовірності випадкової величини до того чи іншого закону розподілу (гаусівського, рівномірного, пуасонівського тощо).

Наступний вид агрегатів – *структури*. Якщо при аналізі ми розбиваємо систему на елементи, то при синтезі елементи об'єднуємо у певні структури. Структури є найбільш поширеним видом агрегатів. До структур належать практично всі системи навколишнього світу. Автомобіль – це певна структура, живий організм – також структура, промислове підприємство, навчальний заклад, держава – все це приклади різноманітних структур. У них виявляються всі властивості агрегатів.

Структури ми описуємо структурними схемами. Важливо відзначити, що, як правило, для всебічного опису системи необхідно вказати декілька структур (структурних схем). Сукупність усіх істотних відношень системи, як ми це відзначили, визначається конфігуратором системи. Тому аналіз системи повинен містити стільки структур (структурних схем), скільки їх входить до конфігуратора системи. Кожна структура може мати різну топологію, але усі вони зв'язані між собою. Наприклад, для організаційно-технічної системи це структура керування, структура функціонування та інформаційна структура.

Контрольні запитання і завдання до самостійної роботи до розділу

1. Які моделі відносять до формальних моделей, яке їх значення в системному аналізі?
2. Що розуміють під поняттям «змістовна модель»?
3. Як ви розумієте поняття «інтерпретація», якою мірою воно належить до змістовних моделей?
4. Чим обмежена кількість формальних і змістовних моделей?
5. Що таке формальна модель типу «чорний ящик»?
6. Яке значення моделі типу «чорний ящик» у системному аналізі?
7. Наведіть приклади використання моделі типу «чорний ящик» у різних наукових дисциплінах.
8. У чому полягають труднощі побудови змістовної моделі типу «чорний ящик»?
9. Опишіть формальну модель типу «склад системи».
10. Що розуміють під поняттям «елемент системи»?
11. Який рівень підсистем потрібно врахувати під час системного аналізу?
12. Дайте визначення поняття «елемент».
13. У чому полягає відносність поділу системи на підсистеми та елементи?
14. У чому полягає умова необхідності й достатності під час побудови моделі «структура системи»?
15. Назвіть основні характеристики елемента.
16. У чому полягає використання підходу теорії множин для опису структури системи?
17. Що таке матриця суміжності, для чого її використовують у системному аналізі?
18. Дайте визначення поняття «граф».
19. Який граф називають деревом ?
20. Що розуміють під поняттям «топологія графа»?
21. Які типи топологій графа ви знаєте?
22. Дайте визначення ієрархічної структури.
23. Опишіть формальну модель «структурна схема».
24. Що розуміють під поняттям «динаміка системи»?
25. Які різновиди динаміки ви знаєте?
26. Що входить до середовища прямої дії?
27. Що входить до середовища опосередкованої дії?
28. Які властивості зовнішнього середовища ви знаєте?

ЧАСТИНА ДРУГА ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ СИСТЕМ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ЗАДАЧ

5. ЕЛЕМЕНТИ ЯКІСНОЇ ТЕОРІЇ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

5.1 Особливості математичного моделювання екологічних процесів

Найбільш важливе застосування математики для побудови такої математичної моделі явища, що вивчається, в якій були б правильно відбиті його найбільш істотні риси. Зівставлення властивостей математичної моделі зданими експерименту служить необхідною умовою перевірки початкових гіпотез, що покладені в основу моделі. Зрозуміло, що побудова адекватної моделі можлива лише із залученням конкретних даних і уявлень про механізми складних екологічних процесів, що досягається на певному рівні дослідження. Проте результати навіть найтонших експериментів далеко не завжди дозволяють однозначно відповісти на питання про те, які ж дійсно рушійні сили, механізми екологічних процесів. У вирішенні цих питань математичні моделі відіграють велику роль. Так, математичні моделі, що розкривають механізми взаємодій у біологічних циклах метаболізму, повинні базуватися на детальному знанні послідовності перетворення речовин й оцінці з експериментальних даних значень концентрацій і констант швидкостей їх взаємодії.

Вимога відповідності, або адекватності, математичної моделі та модельованого об'єкта не означає детального копіювання всіх властивостей останнього, що дуже б ускладнило модель, позбавивши її наочності і зробивши ускладненим її дослідження. Мова йде про те, щоб, не перенавантажуючи модель, зуміти відбити в ній дію найбільш істотних чинників, відповідальних за певні властивості екологічної системи, які цікавлять дослідника. Як правило, при побудові моделі практично немає вичерпного набору відомостей про внутрішню структуру об'єкта, а також точних значень параметрів, що входять у рівняння.

Виділення єдиних у функціональному відношенні підсистем як об'єктів моделювання є самостійним і часом досить важким завданням. Багато в чому тут надає допомогу ієрархічний характер організації живих систем, що складаються з ряду взаємодіючих, відносно автономних систем.

У процесі побудови моделі екологічних процесів необхідно проводити уточнення характеру зв'язків між взаємодіючими компонентами, так само як і значень параметрів, які на перших етапах можуть носити дуже орієнтовний характер. Подальша перевірка справедливості моделі полягає в такому варіюванні значень параметрів, яке максимально наблизило б поведінку моделі до оригіналу.

Вочевидь, на цьому шляху перевірки піддаються й початкові гіпотези, що покладені в основу моделі, які можуть за необхідності змінюватися. Таким чином, перевірка моделі, тобто порівняння її поведінки з оригіналом у різних умовах функціонування, приводить до уточнення наших уявлень про суть і організацію модельованих процесів. Саме у цьому й полягає основна мета математичного моделювання.

На сьогодні в області математичного моделювання застосовується різний математичний апарат залежно від характеру екологічних процесів, що вивчаються і відповідних ним моделей.

Проблема кінетичної поведінки складної системи зводиться до побудови та аналізу математичної моделі, в якій швидкості зміни концентрації різних складних компонентів були б виражені через швидкості окремих елементарних реакцій, що беруть участь у їх утворенні та зникненні.

Припустимо, що в нашій системі є n різних компонентів. Кожне i -те з'єднання із загального їх числа n характеризується значенням концентрації c_i ($i = 1, 2, \dots, n$), яке може змінюватися з часом $c_i = c_i(t)$ внаслідок взаємодії i -го з'єднання з будь-яким із решти $(n - 1)$ речовин. Такого припущення досить, щоб ми могли скласти відповідну даній ситуації загальну математичну модель, яка є системою з n диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{aligned} \frac{dc_1}{dt} &= f_1(c_1, c_2, \dots, c_n, t) \\ \frac{dc_2}{dt} &= f_2(c_1, c_2, \dots, c_n, t) \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dc_n}{dt} &= f_n(c_1, c_2, \dots, c_n, t) \end{aligned} \tag{5.1}$$

де $c_1(t), \dots, c_n(t)$ – невідомі функції від часу $\frac{dc_i}{dt}$ ($i = 1, \dots, n$) – швидкість

зміни концентрації i -ї речовини.

У цій моделі число рівнянь n дорівнює кількості змінних $c_1, c_2 \dots c_n$, речовин, що змінюються внаслідок взаємодії. Кожна з функцій $f_i(c_1, \dots, c_n, t)$ є функцією аргументів $c_1(t), \dots, c_n(t)$, залежних від часу, і самого часу t і є алгебраїчною сумою швидкостей окремих реакцій створення та зникнення i -ї речовини в системі.

Ми здебільшого розглядаємо системи рівнянь першого порядку, що містять перші похідні за часом від початкових функцій. Що стосується виду правих частин (5.1), то залежно від характеру процесів, що проходять у системі, функцією $f_i(c_1, \dots, c_n, t)$ можуть містити як лінійні, так і нелінійні члени відносно змінних c_1, \dots, c_n . Більша частина рівнянь, що розглядаються нами, матиме праві частини, не залежні явно від часу: $f_i(c_1, \dots, c_n)$. Це означає, що дані процеси проходять при постійних зовнішніх умовах. Рівняння, що не містять у правих частинах членів, явно залежних від часу, називаються автономними.

Зупинимося спочатку на властивостях екологічних систем, що дозволяють проводити спрощення їх математичних моделей. Ми вже згадували про ієрархічний принцип будови екологічних систем, відповідний різним рівням їх організації. У кінетичному відношенні цей принцип знаходить своє відображення в тому, що різні функціональні частини екологічних систем або їх підсистеми відрізняються одна від іншої за характерними швидкостями або часом процесів, що проходять у них.

В екологічній системі здійснюється принцип вузького місця, згідно з яким загальна швидкість перетворення речовини у всьому ланцюзі реакцій визначатиметься найбільш повільною стадією. Отже, якщо окремі стадії загального процесу володіють характерним часом T_1, T_2, \dots, T_n і найбільш повільна стадія має час T_k , такий, що $T_k \gg T_1, \dots, T_{k-1}, T_{k+1}, \dots, T_n$, то визначальною ланкою буде k -та, а загальний час процесу практично збіжиться зі значенням T_k цієї вузької ланки.

У той же час швидкі стадії процесу характеризуються високими швидкостями зміни змінних, що можна записати у вигляді

$$\frac{dc_p}{dt} = \frac{1}{\varepsilon} f_p(c_1, c_2, \dots, c_n), \quad (5.2)$$

де c_p – швидка змінна, $\varepsilon \ll 1$ – малий позитивний параметр.

Поява у правій частині множника $1/\varepsilon \gg 1$ визначає велику величину швидкості $\frac{dc_p}{dt} \gg 0$. Наявність часової ієрархії дозволяє істотно спростити

початкову модель екологічної системи, по суті, звівши завдання кінетичного опису системи до вивчення поведінки найбільш повільної стадії. У цьому сенсі найповільніша ланка буде такою, що керує, оскільки дія саме на неї, а не на швидші стадії може вплинути на швидкість проходження всього процесу. Це об'єктивна властивість екологічних систем істотно полегшує проблему моделювання. Одночасно полегшується й управління цим процесом у межах самої екологічної системи. Насправді регулювання складного багатостадійного процесу легко здійснити шляхом дії на одну його ключову стадію, наприклад зміною параметрів найповільнішої ділянки всього ланцюга. Це підвищує надійність управління складними багатостадійними екологічними процесами і в цьому сенсі є одною з важливих переваг екологічних систем.

Таким чином, хоча екологічні процеси і містять велику кількість проміжних стадій, їх кінетична поведінка регулюється порівняно невеликим числом окремих ланок, а отже, їх динамічна модель містить істотно меншу кількість рівнянь.

Практика математичного моделювання показує, що дослідження таких спрощених систем рівнянь може дати точніше уявлення порівняно з повними моделями про загальні динамічні властивості системи, особливо в тих випадках, коли не виникає необхідності знаходження точного розв'язку рівнянь, але важливо передбачити характер поведінки системи при зміні умов її функціонування. У біологічних, екологічних і хімічних системах це особливо важливо, оскільки значення їх параметрів і початкових умов, як правило,

змінні зміною швидких змінних можна нехтувати, вважаючи їх сталими величинами, а всю увагу зосередити на зміні повільних змінних, що визначають вузькі місця системи.

Основний підхід якісної теорії диференціальних рівнянь полягає в тому, щоб характеризувати стан системи в цілому значеннями змінних c_1, c_2, \dots, c_n , яких вони набувають у кожен момент часу в процесі зміни відповідно до (5.1). Якщо ми відкладемо на осях прямокутних координат в n -вимірному просторі значення змінних c_1, c_2, \dots, c_n , то стан системи описуватиметься якоюсь точкою M у цьому просторі з координатами

$$M = M(c_1, c_2, \dots, c_n).$$

У стаціонарному стані точка M з координатами $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ носить назву стаціонарної, або, як-то кажуть, точки рівноваги або точки спокою системи. Зміна стану системи зівстається зі зміною положення точки M в n -вимірному просторі. Простір з координатами c_1, c_2, \dots, c_n називається фазовим, крива, що описується в ньому точкою M , – фазовою траєкторією, а сама система (5.1) – динамічною системою. Як ми побачимо надалі, вивчення поведінки системи в такому фазовому просторі дає можливість описати загальні властивості стаціонарних станів системи і переходів між ними.

Досі наш розгляд динамічних систем був обмежений так званими системами ідеального змішування, або точковими системами.

Побудова точкової моделі є необхідним етапом при побудові моделі будь-якої системи, оскільки для опису системи в цілому, звісно, потрібно знати поведінку її частин.

Усі екологічні системи є незрівноваженими, а процеси, що проходять в них, – незворотними процесами. Саме ця обставина дозволяє живим системам використовувати потоки речовини та енергії для побудови та підтримки структурної і функціональної впорядкованості. Відповідно і математичні моделі екологічних систем мають бути істотно нелінійними моделями. Математичний опис нелінійних розподілених систем становить значні труднощі.

5.2 Моделі екологічних систем, що описуються одним диференціальним рівнянням першого порядку. Стійкість. Метод Ляпунова

Розглянемо системи першого порядку, тобто математичні моделі, яким відповідає одне диференціальне рівняння першого порядку

$$\frac{dx}{dt} = f(t). \quad (5.7)$$

Стан таких систем у кожен момент часу характеризується одною-єдиною величиною – значенням якоїсь змінної x в даний момент часу t .

Загальна теорія має кінцевою метою встановити залежність координати системи (значення змінної величини x) від часу, тобто виду функції $x(t)$. Проте істотну роль також відіграватиме встановлення картини в одновимірному фазовому просторі – на фазовій прямій (рис. 5.1).

Розглянемо площину t, x . Розв'язками нашого рівняння (5.7) $x(t)$ є криві на площині t, x , що носять назву інтегральних кривих (рис. 5.2). Нехай дані початкові умови $x = x_0$ при $t = t_0$, або, інакше, нехай на площині t, x дана точка з координатами (t_0, x_0) . Якщо для рівняння (5.7) виконані умови теореми Коші, то є єдиний розв'язок рівняння (5.7), що задовольняє ці початкові умови, і через точку (t_0, x_0) проходить одна-єдина інтегральна крива $x(t)$. Таким чином, інтегральні криві рівняння (5.7) не можуть перетинатися, і тому розв'язки рівняння (5.7) не будуть періодичними, оскільки вони монотонні. Це означає, що не можна за допомогою одного автономного рівняння вигляду (5.7) описати реальні періодичні процеси, які відіграють велику роль в екології.

Поведінку інтегральних кривих на площині t, x можна встановити, не розв'язуючи в явному вигляді диференціального рівняння (5.7), якщо відомий характер рухів відображальної точки на фазовій прямій (рис. 5.3).

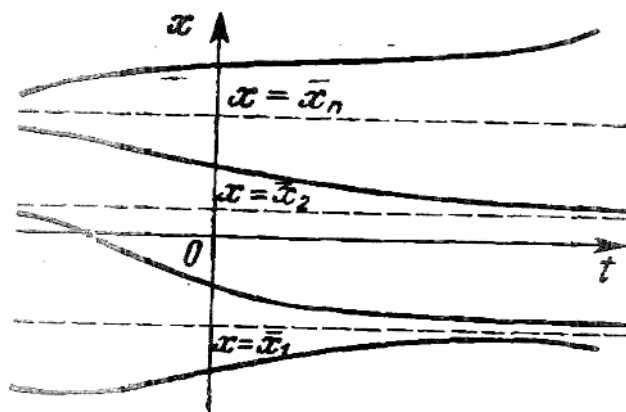


Рисунок 5.1 – Інтегральні криві t, x ; $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ – розв'язки рівняння (5.7)

Відображальна точка

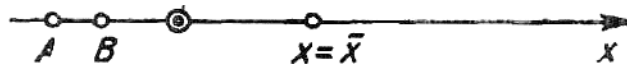
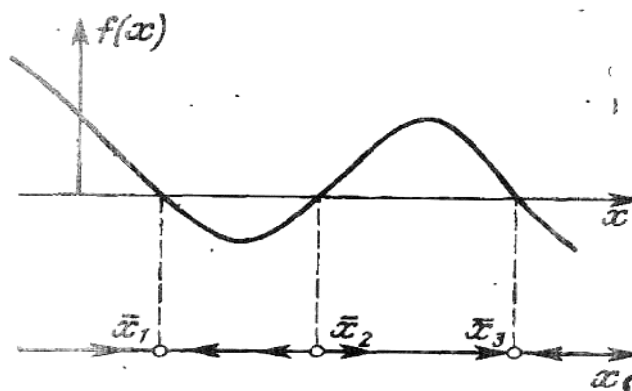


Рисунок 5.2 – Фазова пряма



Фазова пряма

Рисунок 5.3 – Допоміжна площина $x, f(x)$ для рівняння (5.7)

Дійсно, розглянемо площину t, x , причому фазову пряму сумістимо з віссю x . Нехай відображальна точка рухається по фазовій прямій x . Побудуємо на площині t, x точку з абсцисою t і з ординатою, що дорівнює зсуву відображальної точки по осі x у даний момент часу t . Оскільки абсциса та ордината точки t, x змінюються, точка переміщатиметься на площині t, x , описуючи якусь криву. Ця крива і буде інтегральною кривою нашого рівняння (рис. 5.4).

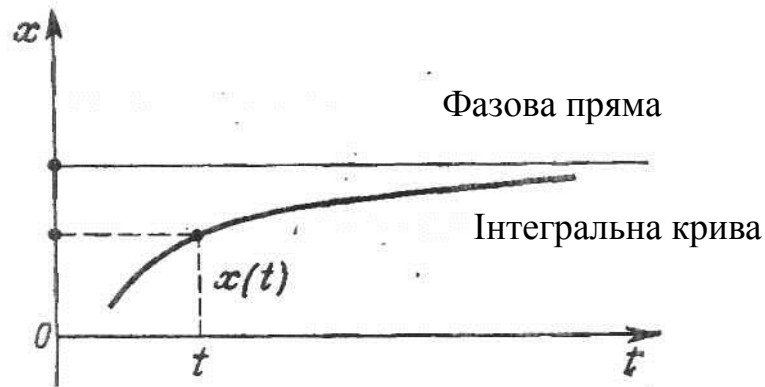


Рисунок 5.4 – Залежність змінної x від часу t для рівняння (5.7)

Важливо визначити, чи є стан рівноваги (особливі точки системи) стійкими або нестійкими стаціонарними вирішеннями цієї системи.

Розглянемо критерії стійкості станів рівноваги. Нехай дана система знаходиться в стані рівноваги. Тоді за визначенням $\frac{dx}{dt} = 0$. Якщо тепер ми виведемо систему зі стану рівноваги, то система поводитиметься відповідно до рівняння (5.7), що описує її поведінку в області, де вже на відміну від стану рівноваги $\frac{dx}{dt} \neq 0$.

Стійкий стан рівноваги можна охарактеризувати таким чином: якщо при досить малому початковому відхиленні від положення рівноваги система ніколи не відійде далеко від особливої точки, то особлива точка буде стійким станом рівноваги, що відповідає стійкому стаціонарному режиму функціонування системи. Часто цю умову формулюють так: стан рівноваги стійкий, якщо достатньо мале збурення завжди залишається малим.

Точне математичне визначення стійкості стану рівноваги для випадку, що розглядається нами, коли система описується одним диференціальним рівнянням вигляду (5.7) матиме такий вигляд.

Стан рівноваги $x = \bar{x}$ стійкий за Ляпуновим, якщо, задавши скільки завгодно мале позитивне ε , завжди можна знайти таке δ , що

$$|x(t) - \bar{x}| < \varepsilon \quad (5.8)$$

якщо $|x(t_0) - \bar{x}| < \delta$. Інакше кажучи, для стійкого стану рівноваги справедливе твердження: якщо у момент часу t_0 відхилення від стану рівноваги мале ($|x(t_0) - \bar{x}| < \delta$), то в будь-який подальший момент часу $t > t_0$ відхилення розв'язання системи від стану рівноваги буде також малим ($|x(t) - \bar{x}| < \varepsilon$). Подивимося тепер, як можна визначити, стійкий або нестійкий стан рівноваги досліджуваної системи. Ляпунов дав аналітичний метод дослідження стійкості стану рівноваги, який ми стисло викладаємо. Нехай наша система відхилилася від точки рівноваги \bar{x} і перейшла в сусідню з нею точку x . Покладемо $x = \bar{x} + \xi$, де ξ – мале відхилення від стану рівноваги, таке, що $\frac{\xi}{\bar{x}} \ll 1$. За нашим припущенням $f(x)$ – аналітична функція. Перейдемо від змінної x до змінної ξ в рівнянні (5.7), підставивши туди $x = \bar{x} + \xi$. Отримаємо

$$\frac{d(\bar{x} + \xi)}{dt} = \frac{d\xi}{dt} = f(\bar{x} + \xi). \quad (5.9)$$

Функцію, що стоїть у правій частині цього рівняння, розкладемо в ряд Тейлора в точці \bar{x} :

$$\frac{d\xi}{dt} = f(\bar{x}) + f'(\bar{x})\xi + \frac{1}{2}f''(\bar{x})\xi^2 + \dots$$

Оскільки $f(\bar{x}) = 0$, то рівняння (5.9) набере вигляду

$$\frac{d\xi}{dt} = a_1\xi + a_2\xi^2 + a_3\xi^3 + \dots, \quad (5.10)$$

де $a_1 = f'(\bar{x})$, $a_2 = f''(\bar{x})$ і т. д.

Відкинемо в рівнянні (5.10) нелінійні члени як величини вищого порядку малості. Ми отримаємо тоді лінійне рівняння

$$\frac{d\xi}{dt} = a_1\xi, \quad (5.11)$$

яке має назву лінеаризованого рівняння, або рівняння першого наближення. Інтеграл цього рівняння для $\xi(t)$ знаходиться відразу:

$$\xi(t) = e^{\lambda t}, \quad \text{де } \lambda = a_1 = f'(\bar{x}).$$

Якщо $\lambda < 0$, то при $t \rightarrow \infty$ $\xi \rightarrow 0$, а отже, первинне відхилення ξ від рівноваги з часом загасає. Таким чином, стаціонарний розв'язок $x = \bar{x}$ рівняння (5.7) стійкий за Ляпуновим. Якщо $\lambda > 0$, то при $t \rightarrow \infty$ $\xi \rightarrow \infty$ і початковий стан рівноваги нестійкий. Якщо $\lambda = 0$, то рівняння першого наближення, загалом кажучи, не може дати відповіді на питання про стійкість початкової системи. Таким чином, метод Ляпунова дозволяє за знаком похідної $f(x)$ у правій частині початкового рівняння отримати правильну відповідь на питання про стійкість його точок рівноваги.

Аналогічні міркування будуть корисними при розгляді складніших динамічних систем. У разі одного рівняння неважко, досліджуючи безпосередньо характер функції $f(x)$ поблизу стану рівноваги $x = \bar{x}$,

однозначним чином вирішити питання стійкості стану рівноваги.

За визначенням в особливій точці функції $f(x)$, величина $f(x) = \frac{dx}{dt} \Big|_{x=\bar{x}}$ перетворюється в нуль. Тут можливі три різні випадки (рис. 5.5 а–в).

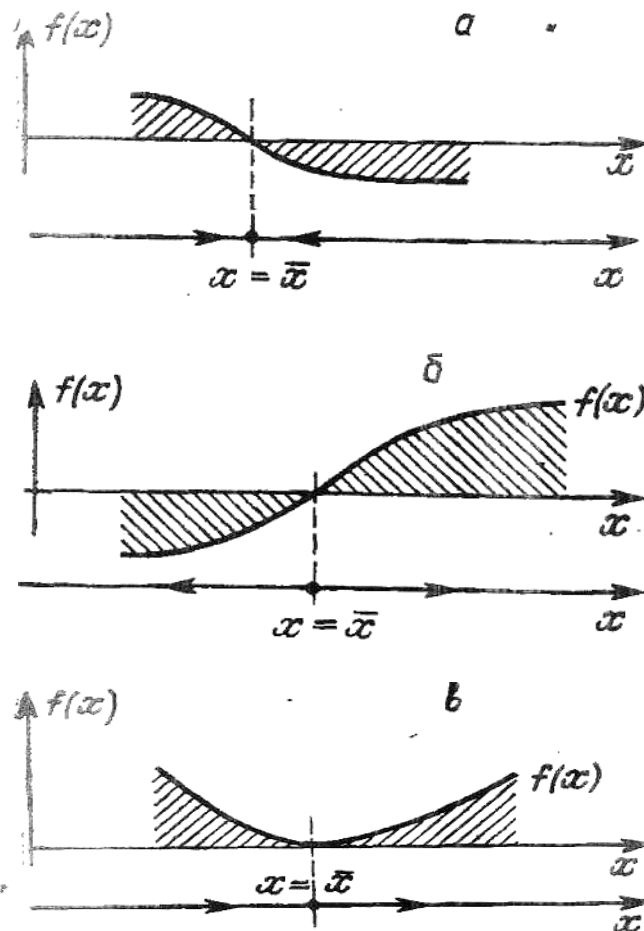


Рисунок 5.5 – Характер стійкості особливої точки залежно від знака функції $f'(x)$ а – стійка особлива точка; б, в – нестійкі точки

1. Поблизу стану рівноваги $x = \bar{x}$ $f(x)$ змінює знак з плюса на мінус при зростанні x (див. рис. 5.5 а).

Така зміна знака $f(x)$ у точці $x = \bar{x}$ означає, що при $x < \bar{x}$ швидкість зміни $\frac{dx}{dt} = f(t)$ позитивна. При цьому x збільшується, тобто прямує до \bar{x} . При

$\frac{dx}{dt} = f(t) < 0$, тобто x зменшується і знову прямує до \bar{x} . Звідси випливає, що

відображальна точка знаходиться в достатній близькості від стану рівноваги $x = \bar{x}$ й асимптотично до нього наближатиметься при зростанні t . Звісно, що в цьому разі стан рівноваги стійкий за Ляпуновим

2. $f(x)$ змінює знак поблизу стану рівноваги $x = \bar{x}$ з мінуса на плюс при зростанні x (див. рис. 5.5 б). Проводячи аналогічні судження, легко побачити, що відображальна точка, поміщена в достатній близькості до стану рівноваги,

віддалятиметься від нього. Звідси випливає, що в цьому разі стан рівноваги нестійкий за Ляпуновим.

3. $f(x)$ не змінює знака поблизу стану рівноваги при зростанні x (рис. 5.5 в). Це означає, що відображальна точка, поміщена достатньо близько до положення рівноваги, з одного боку, наблизатиметься до нього, а поміщена з іншого віддалятися. Зрозуміло, що стан рівноваги є нестійким за Ляпуновим.

Для даного випадку критерій стійкості можна сформулювати ще стисліше. Перенесемо початок координат у точку $x = \bar{x}$. Тоді для стійкості стаціонарного стану x необхідно, щоб x і $f(x)$ по обидва боки від положення рівноваги були різних знаків. Коли ж $\frac{dx}{dt} = f(t)$ і x одного знака, то такий стан рівноваги нестійкий.

Прикладом моделі, що складається з одного диференціального рівняння, може служити відоме рівняння логістичної кривої – рівняння швидкості зростання популяції в обмеженому за своїми ресурсах середовищі, в якому забезпечений лише певний максимум щільності популяції.

Логістичне рівняння Ферхюльста має вигляд

$$\frac{dN}{dt} = rN \cdot \frac{K - N}{K}. \quad (5.12)$$

Тут N – число особин у момент часу t ; r – константа зростання; K – максимальна чисельність популяції, можлива в даних умовах. Графік логістичної кривої зображений на рис. 5.6.

Крива, що описується цим рівнянням, спочатку (при $N \ll K$) збігається з простою експоненціальною кривою, нахил якої рівномірно збільшується до деякого максимального значення (точка перегину), після якого нахил поступово зменшується і крива наближається до верхньої асимптоти $N = K$ – рівню, максимально досяжному популяцією в даних умовах.

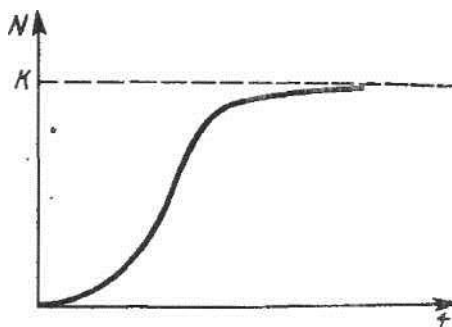


Рисунок 5.6 – Логістична крива

Запишемо рівняння для чисельності популяції в стандартному вигляді, перепозначивши тотожно $N = x$. Тоді відповідно до з рівняння (5.7) ми матимемо

$$\frac{dx}{dt} = f(t) = rx \cdot \frac{R - x}{R}. \quad (5.13)$$

Легко побачити, що рівняння стаціонарних станів в даному випадку має

два корені: $\bar{x}_1 = 0, \bar{x}_2 = K$.

Подивимося, чи є ці корені стійкими. Для цього спочатку скористаємося аналітичним методом Ляпунова. Введемо нову змінну ξ , що позначає відхилення змінної x від її стаціонарного значення: $\xi = x - \bar{x}$.

Запишемо лінеаризоване рівняння вигляду (5.11) для рівнянь (5.13):

$$\frac{d\xi}{dt} = a_1 \xi, \text{ де } a_1 = f'(\bar{x})$$

Нагадаємо, що знак величини a_1 визначає стійкість відповідної особливої точки.

$$f'(x) \Big|_{x=\bar{x}} = r - \frac{2r\bar{x}}{K}. \quad (5.14)$$

Підставивши у вираз (5.14) значення першого кореня \bar{x}_1 , отримаємо $a(\bar{x}_1) = r$. Ця величина завжди позитивна, оскільки, за визначенням, коефіцієнт природної швидкості зростання популяції r – величина додатна. Отже, \bar{x}_1 – нестійка особлива точка. Якщо ж ми підставимо у вираз (5.14) $\bar{x}_2 = K$, то отримаємо $a(\bar{x}_2) = -r$ – від'ємну величину. Це дає нам право стверджувати, що розв'язок рівняння (5.13) $\bar{x}_2 = K$ є стійким і відповідає стійкому стаціонарному режиму існування популяції в обмеженому середовищі.

Проведемо тепер дослідження стійкості стаціонарних розв'язків цього рівняння, виходячи з графіка функції $f(x)$.

З рис. 5.7 бачимо, що (при переході від від'ємних до додатних значень x) у точці $\bar{x}_1 = 0$ функція $f(x)$ змінює знак з мінуса на плюс, тобто особлива точка є нестійкою. Навпаки, в точці $\bar{x}_2 = K$ спостерігається зміна знака $f(x)$ зі зростанням x з плюса на мінус, отже, ця особлива точка стійка.

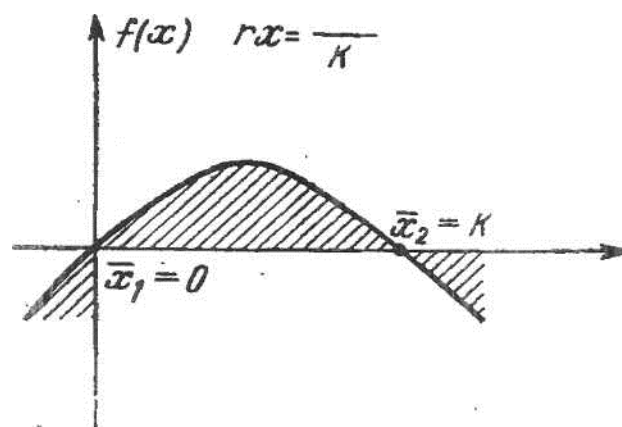


Рисунок 5.7 – Графік функції для рівняння (5.13)

Розглянемо ще один приклад – спрощену модель проточного культиватора, в якому відбуваються розмноження бактеріальних клітин, їх загибель і, крім того, спостерігається приплив клітин ззовні в культиватор

зісталою швидкістю. Нехай швидкість загибелі клітин пропорційна їх концентрації, а швидкість розмноження – квадрату концентрації клітин (у двостатевій культурі при малих концентраціях клітин швидкість розмноження пропорційна ймовірності зустрічі двох клітин різної статі). Тоді диференціальне рівняння, що описує зміну концентрації живих клітин у такій системі, матиме вигляд

$$\frac{dc}{dt} = \alpha - bc + \gamma c^2 = f(c, \alpha). \quad (5.15) \text{ Тут } \alpha \text{ – швидкість}$$

припливу; γ , b – коефіцієнти розмноження та загибелі клітин відповідно. Для простоти візьмемо $\gamma = 1$.

Розглянемо характеристики стаціонарних станів такої системи залежно від величини швидкості припливу α . Стаціонарні значення концентрацій клітин знаходимо з рівняння $f(c, \alpha) = 0$. Їх два:

$$\begin{aligned} \bar{c}_1 &= \frac{b}{2} + \sqrt{\frac{b^2}{4} - \alpha}, \\ \bar{c}_2 &= \frac{b}{2} - \sqrt{\frac{b^2}{4} - \alpha}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

По суті, стаціонарні концентрації \bar{c}_1, \bar{c}_2 мають бути дійсними числами, звідси бачимо що при $\alpha > \frac{b^2}{4}$ стаціонарний стан не може бути досягнутий у системі.

При $\alpha = \frac{b^2}{4}$ є лише один стаціонарний стан: $\bar{c}_1 = \bar{c}_2 = \frac{b}{2}$, а при $\alpha < \frac{b^2}{4}$ у системі можливі два стаціонарні режими:

$$\bar{c}_{1,2}(\alpha) = \frac{b}{2} \pm \sqrt{\frac{b^2}{4} - \alpha}. \quad (5.17)$$

Це відповідає двом гілкам кривої стаціонарних значень c на графіку, по осі абсцис якого відкладені значення швидкості припливу α (рис. 5.8). Гілки стаціонарних станів $\bar{c}_1(\alpha)$ і $\bar{c}_2(\alpha)$ відрізняються одна від іншої за характером стійкості. Похідна правої частини (5.15) для гілки $\bar{c}_1(\alpha)$ дорівнює

$$f'_c(\bar{c}_1, \alpha) = 2\sqrt{\frac{b^2}{4} - \alpha} > 0,$$

а для гілки $\bar{c}_2(\alpha)$ дорівнює

$$f'_c(\bar{c}_2, \alpha) = -2\sqrt{\frac{b^2}{4} - \alpha} < 0.$$

Звідси випливає, що всі значення $\bar{c}_1(\alpha)$ є нестійкими, а $\bar{c}_2(\alpha)$ – стійкими

стаціонарними концентраціями.

Отже, при $\alpha > \frac{b^2}{4}$ стаціонарних рішень у додатному квадранті немає,

при $\alpha = \frac{b^2}{4}$ в цій області є один стаціонарний стан, $\bar{c}_1 = \frac{b}{2}$ на межі стійкості,

нарешті при $\alpha < \frac{b^2}{4}$ у системі є два стаціонарні стани, причому один із них стійкий, а інший – нестійкий.

Узагалі кажучи, в будь-якій системі вигляду

$$\frac{dx}{dt} = f(t, \alpha), \quad (5.18)$$

де α – параметр, при зміні значення α інтегральні криві так чи інакше змінюватимуться. Проте при безперервній зміні α загальний вигляд кривих зазнає лише кількісних змін. Тільки при деяких особливих, біфуркаційних значеннях параметра α виходять якісні зміни характеру інтегральних кривих, тобто зміна числа особливих точок та характеру їх стійкості. Саме таким

біфуркаційним значенням параметра і є $\alpha = \frac{b^2}{4}$. Інші значення називаються

звичайними. Поняття біфуркаційних і звичайних значень параметра можна сформулювати більш строго. Значення параметра $\alpha = \alpha_0$ є звичайним, якщо існує таке додатне $\varepsilon > 0$, що для всіх α , таких, що $|\alpha - \alpha_0| < \varepsilon$, спостерігається одна і та сама топологічна структура розбиття фазового простору на інтегральні криві. Інші значення, для яких ця умова не дотримується, називають біфуркаційними.

Графік, побудований в координатах (α, \bar{x}) для рівняння

$$\frac{dx}{dt} = f(t, \alpha),$$

називається біфуркаційною діаграмою (див. рис. 5.8). Така діаграма наочно ілюструє залежність положень рівноваги системи від параметра α .



Рисунок 5.8 – Залежність стаціонарної концентрації клітин \bar{c} від параметра α для рівняння (5.15)

Як було показано вище, характер стійкості стаціонарної точки x рівняння (5.18) можна з'ясувати, визначивши в цій точці знак похідної $f'_x(\bar{x}, \alpha)$.

Стаціонарні значення $x = \bar{x}$ знаходяться з рівняння $f(x, \alpha) = 0$. Залежно від вигляду функції $f(x, \alpha)$ це рівняння може мати один або декілька коренів при одному і тому самому значенні параметра α . Так, якщо $f(x, \alpha)$ – поліном x ступеня більше одиниці, крива $\bar{x} = \bar{x}(\alpha)$ матиме такий вигляд, що одному α відповідатимуть декілька стаціонарних станів x . На рис. 5.9 зображена крива стаціонарних станів $\bar{x}(\alpha)$, для якої при $\alpha = \alpha_0$ існують три стаціонарні режими (a, b, c). Знайшовши знак похідної $f'_x(\bar{x}, \alpha)$ для кожної з точок (a, b, c), можна визначити, які з них відповідають стійким стаціонарним станам. На рис. 5.9 наведений випадок, коли

$$f'_x(\bar{x}_a, \alpha) < 0, f'_x(\bar{x}_b, \alpha) > 0, f'_x(\bar{x}_c, \alpha) < 0.$$

Це означає, що a, c – стійкі, а b – нестійкий стан, Дуги кривої AB і DC – гілки стійких, а BC – гілка нестійких стаціонарних станів. Біфуркаційні значення параметра α , при яких змінюється число стаціонарних станів з одночасною зміною типу стійкості, на рисунку позначені α' та α'' .

Наявність декількох можливих стаціонарних станів у системі при одних і тих самих значеннях параметрів, або множинність стаціонарних станів, є одним із найбільш важливих властивостей екологічних систем. Існування в системі двох або декількох стійких стаціонарних станів обумовлює здатність системи до перемикань і до прояву так званих тригерних властивостей.

Розберемо на графіку рис. 5.9, як наявність декількох можливих стаціонарних станів позначається на поведінці системи.

Допустимо, що при значенні параметра $\alpha = \alpha_0$ система знаходиться в особливій точці верхньої стійкої гілки AB. Нехай якимось чином (незалежно від процесів, що описуються диференціальним рівнянням 5.18) відбувається зменшення величини α . При цьому система послідовно проходить через ряд стаціонарних станів, рухаючись уздовж гілки AB. У точці B, що відповідає «стику» стійкої (AB) і нестійкої (BC) гілок, відбудеться стрибкоподібний перехід на нижню стійку гілку BC.

Збільшуючи знов значення параметра α , можна таким самим чином змусити систему перейти вздовж стійкої гілки DC до біфуркаційної точки C, після чого стрибкоподібно повернути її на початкову гілку CB. Таким чином, здійснюється замкнений гістерезисний цикл (ABDCA), в якому в процесі зміни параметра система проходить ряд стаціонарних станів, що відрізняються один від одного при одних і тих самих значеннях α залежно від напрямку руху. Напрямок стрибкоподібних переходів залежить від того, відбувається зменшення або збільшення параметра α при наближенні до біфуркаційної точки.

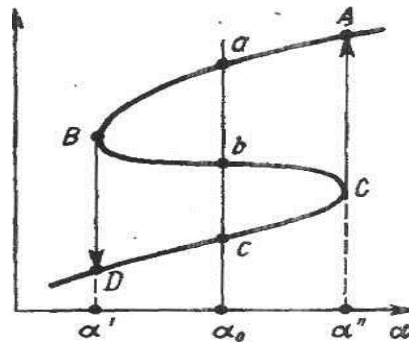


Рисунок 5.9 – Залежність правої частини рівняння (5.15) від параметра α

5.3 Моделі, що описуються системами диференціальних рівнянь другого порядку. Фазова картина системи. Визначення стійкості

Розглянемо основи теорії систем, що описуються двома рівняннями першого порядку.

Такі системи рівнянь можуть описувати набагато ширшими класами екологічних явищ, ніж одне рівняння першого порядку.

Зокрема, в таких системах можливі автоколивання, тобто періодичні зміни змінних зі сталою амплітудою. Розв'язання одного рівняння вигляду

$$\frac{dx}{dt} = f(t)$$

завжди є монотонними, отже, не можуть описувати будь-який реальний періодичний процес. Маючи досить багато властивостей, системи другого порядку в той же час допускають наочне подання поведінки змінних на фазовій площині. Дослідження систем вищого порядку, як правило, настільки складне, що доводиться вирішувати їх чисельно за допомогою ЕОМ; спільність і наочність при цьому, звісно, втрачаються. Проте динамічні системи третього і вищого порядків можуть володіти якісно іншими властивостями, наприклад демонструвати квазістохастичну поведінку.

Під час дослідження властивості моделей, що складаються із двох диференціальних рівнянь, використовуються методи якісної теорії, що істотно базуються на уявленні про фазовий портрет системи. Зупинимося на деяких загальних властивостях систем другого порядку, що описуються в загальному вигляді рівняннями:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= P(x, y), \\ \frac{dy}{dt} &= Q(x, y). \end{aligned} \tag{5.19}$$

Тут $P(x, y)$, $Q(x, y)$ – неперервні функції, визначені в деякій області G евклідової площини (x, y – декартові координати), що мають в цій області й

неперервні похідні порядку не нижче першого.

Область G може бути як необмеженою, так і обмеженою. У разі, коли змінні величини x , y мають конкретний екологічний сенс (концентрації речовин, чисельність виду), на них, як правило, накладаються деякі обмеження, насамперед всі екологічні змінні не можуть бути від'ємними. Так, у моделі Вольтерра, що описує взаємодію двох видів: хижака і жертви, $x \geq 0$ змінна, що характеризує чисельність жертви, а $y \geq 0$ – хижака. Область G є додатним квадрантом правої напівплощини:

$$0 \leq x < \infty; 0 \leq y < \infty.$$

Часто чисельність того або іншого виду буває обмеженою зверху якими-небудь зовнішніми по відношенню до даної системи умовами, наприклад площею ареалу існування.

Іноді буває, що значення змінних (чисельність виду) не можуть упасти нижче певної величини. В цьому разі область зміни змінних обмежена не лише зверху, а й знизу:

$$x_{10} \leq x \leq x_{20}; y_{10} \leq y \leq y_{20}.$$

Те саме спостерігається в хімічній кінетиці. Так, якщо x та y – концентрації реагуючих речовин, то

$$0 \leq x \leq x_0; 0 \leq y \leq y_0,$$

де x_0, y_0 – максимально можливі концентрації реагентів.

Таким чином, у даному випадку область G є обмеженою.

У процесі зміни в часі змінні x , y змінюються згідно із системою рівнянь (5.19) так, що кожному стану системи відповідає певна пара значень невідомих x, y .

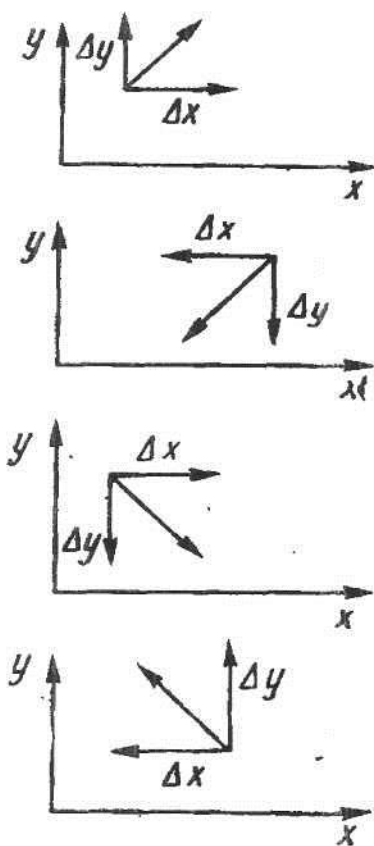
Навпаки, кожна пара значень (x, y) описує певний стан системи. Розглянемо площину з осями координат, на яких відкладені значення змінних x, y . Кожна точка M цієї площини з координатами (x, y) відповідає певному стану системи. Така площина носить назву фазової площини, або площини станів системи і відображає сукупність усіх станів системи. Точка $M(x, y)$ називається відображальною, або відображувальною точкою. Нехай при $t = t_0$ – координати відображальної точки $M_0(x_0, y_0)$. У кожен наступний момент часу t відображальна точка зміщуватиметься і набуватиме положення $M(x, y)$, відповідне значенням $x(t), y(t)$. Сукупність усіх точок $M(x, y)$ на фазовій площині (x, y) , положення яких відповідає станам системи в процесі зміни згідно з рівнянням (5.19), називається фазовою траєкторією.

Припустимо, що нам не відомий характер змін змінних у системі, але відомий характер фазових траєкторій. Фазова площина, розбита на траєкторії, дає легко осяжну картину системи, тобто можливість відразу охопити всю сукупність змін змінних x, y , що можуть виникнути за довільних початкових умов. Часто, не вирішуючи систему рівнянь вигляду (5.19) і керуючись лише видом рівнянь, можна побудувати фазовий портрет системи. Цей шлях дозволяє зробити висновки про характер руху без знання аналітичних виразів початкової системи рівнянь і, отже, застосовується і в тих випадках, коли такі аналітичні вирази не можуть бути знайдені.

Для відображення фазової картини необхідно побудувати векторне поле напрямів траєкторій системи в кожній точці площини x, y . Задаючи приріст $\Delta t > 0$, ми отримаємо для x і y відповідно прирости Δx і Δy , які знайдемо із загальної системи (5.19):

$$\begin{aligned}\Delta x &= P(x, y)\Delta t, \\ \Delta y &= Q(x, y)\Delta t.\end{aligned}\tag{5.20}$$

Очевидно, що при $\Delta t > 0$ залежно від знаків $P(x, y)$ і $Q(x, y)$ прирости Δx і Δy можуть бути як додатними, так і від'ємними. Напрямок вектора $\Delta x/\Delta y$ у точці (x, y) залежить від знаків функцій $P(x, y)$ і $Q(x, y)$ у цій самій точці й може бути заданий такою схемою:



$P(x, y) > 0, Q(x, y) > 0$; $P(x, y) < 0, Q(x, y) < 0$; $P(x, y) > 0, Q(x, y) < 0$;
 $P(x, y) < 0, Q(x, y) > 0$.

Визначивши таким чином напрям траєкторій у кожній точці фазової площини, матимемо повний фазовий портрет системи. Завдання побудови векторного поля дещо спрощується, якщо отримати вираз для фазових траєкторій в аналітичному вигляді.

Пригадаємо, що фазова траєкторія має дотичні до траєкторій, тангенс кута нахилу яких у кожній точці $M(x, y)$ дорівнює значенню похідної у цій самій точці. Отже, щоб провести фазову траєкторію через точку фазової площини $M_1(x_1, y_1)$, достатньо знати напрям дотичної в цій точці площини або

значення похідної. Для цього необхідно отримати рівняння, що містять змінні x та y і які не містять часу t у явному вигляді. Щоб із початкової системи рівнянь (5.19) отримати рівняння, що зв'язує безпосередньо x і y , і таким чином, не інтегруючи рівнянь, перейти до картини на фазовій площині, розділимо друге рівняння системи на перше. Отримаємо диференціальне рівняння

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Q(x, y)}{P(x, y)}, \quad (5.21)$$

яке у багатьох випадках простіше, ніж початкова система другого порядку (5.19). Розв'язок цього рівняння $y = y(x, c)$, або в неявній формі $F(x, y) = c$, де c – стала інтегрування дасть нам сім'ю інтегральних кривих – фазових траєкторій системи (5.21) на площині x, y .

Проте часто побудова повної фазової картини системи є достатньо важким завданням, оскільки в загальному випадку рівняння (5.21) може і не мати аналітичного розв'язку. Тоді побудова інтегральних кривих проводиться якісно.

Для якісної побудови фазової картини системи зазвичай користуються методом ізоклін. Метод полягає в тому, що на фазовій площині наносяться лінії, які перетинають інтегральні криві під одним певним кутом. Розглядаючи ряд ізоклін, можна встановити, яким буде хід самих інтегральних кривих.

Рівняння ізоклін легко отримати з рівняння (5.21). Візьмемо

$$\frac{dy}{dx} = A, \quad (5.22)$$

де A – певна стала величина. Значення A є тангенсом кута нахилу дотичної до фазової траєкторії й, отже, може набувати значень $-\infty$ до $+\infty$. Підставляючи в (5.21) замість dy/dx величину A , отримаємо рівняння ізоклін:

$$A = \frac{Q(x, y)}{P(x, y)}. \quad (5.23)$$

Надаючи A певні числові значення, отримуємо набір кривих. У будь-якій точці кожної із цих кривих кут нахилу дотичної до фазової траєкторії, що проходить через цю точку, дорівнює одній і тій самій величині, а саме величині A , що характеризує ізокліни.

Відзначимо, що у разі лінійних систем, праві частини яких $P(x, y)$, $Q(x, y)$ є лінійні відносно x, y форми, ізокліни є пучком прямих, що проходять через початок координат. Так, якщо система, що вивчається нами, описується лінійними однорідними рівняннями вигляду

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= ax + by, \\ \frac{dy}{dt} &= cx + dy, \end{aligned} \quad (5.24)$$

рівняння ізоклін можна записати в такому вигляді:

$$\frac{cx + dy}{ax + by} = A, \text{ або } y = \frac{(Aa - c)x}{d - Ab} \quad (3.25)$$

Рівняння (5.21) безпосередньо визначає в кожній точці площини єдину дотичну до відповідної інтегральної кривої, за винятком точки, де $P(\bar{x}, \bar{y}) = 0, Q(\bar{x}, \bar{y}) = 0$, у якій напрям дотичної стає невизначеним, оскільки при цьому стає невизначеним значення похідної:

$$\frac{dy}{dx} \Big|_{\substack{x=\bar{x} \\ y=\bar{y}}} = \frac{Q(\bar{x}, \bar{y})}{P(\bar{x}, \bar{y})} = 0. \quad (5.26)$$

Ця точка є точкою перетину всіх ізоклін.

Точки, в яких напрям дотичних до інтегральних кривих не визначений, носять назву особливих точок. Особлива точка має таку важливу властивість, що в ній одночасно перетворюються в нуль похідні за часом змінних x та y :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} \Big|_{\bar{x}, \bar{y}} &= P(\bar{x}, \bar{y}) = 0, \\ \frac{dy}{dt} \Big|_{\bar{x}, \bar{y}} &= Q(\bar{x}, \bar{y}) = 0. \end{aligned} \quad (5.27)$$

Таким чином, в особливій точці швидкості зміни змінних дорівнюють нулю, й, отже, особлива точка диференціального рівняння фазових траєкторій (5.21) відповідає стаціонарному стану системи (5.19), а її координати є стаціонарними значеннями змінних x, y .

Для якісного вивчення часто можна обмежитися побудовою не всіх, а лише деяких ізоклін на фазовій площині. Особливий інтерес становлять так звані «головні» ізокліни: $dy/dx = 0$ – ізокліни горизонтальних дотичних до фазових траєкторій, рівняння якії $Q(x, y) = 0$ та ізокліни вертикальних дотичних

$dy/dx = \infty$, якій відповідає рівняння $P(x, y) = 0$.

Побудувавши головні ізокліни і знайшовши точку їх перетину (x, y) , координати якої задовольняють умови: $P(\bar{x}, \bar{y}) = 0, Q(\bar{x}, \bar{y}) = 0$, ми визначимо тим самим точку перетину всіх ізоклін фазової площини, в якій напрям дотичних до фазових траєкторій не визначений:

$$\frac{dy}{dx} \Big|_{\substack{x=\bar{x} \\ y=\bar{y}}} = \frac{Q(\bar{x}, \bar{y})}{P(\bar{x}, \bar{y})} = 0.$$

Ця особлива точка і відповідає стаціонарному стану системи.

Система рівнянь (3.19) має стільки стаціонарних станів, скільки точок перетину головних ізоклін маємо на фазовій площині.

Кожна фазова траєкторія відповідає сукупності рухів динамічної системи, що проходять через одні й ті самі стани і відрізняються один від одного лише початком відліку часу. Таким чином, розглядаючи фазову картину системи, тобто розв'язуючи графічно рівняння інтегральних кривих (5.21), ми тим самим вивчаємо проекцію інтегральної кривої в просторі всіх трьох вимірювань x, y, t системи (5.19) на площину x, y .

Якщо умови теореми Коші для системи рівнянь (5.19) виконані, то через кожную точку простору x, y, t проходить єдина інтегральна крива цієї системи рівнянь, тобто інтегральні криві в просторі x, y, t перетинатися не можуть. Те саме завдяки автономності рівнянь (5.19) можна сказати і про фазові траєкторії: вони також не можуть перетинатися, оскільки через кожную точку фазової площини проходить єдина фазова траєкторія.

Через зазначену властивість фазових траєкторій відображальна точка, рухаючись за іншими фазовими траєкторіями, не може прийти в стан рівноваги ні при якому кінцевому t . Встановлення станів рівноваги в динамічних системах, що описуються рівняннями (5.19), відбувається лише асимптотично (тільки при $t \rightarrow \infty$).

У випадку системи двох рівнянь, що розглядається тут, зручно дати визначення стійкості стаціонарного стану, використовуючи для цього вже введене нами уявлення про фазову площину.

Нехай дана система знаходиться в стані рівноваги. Тоді відображальна точка на фазовій площині знаходиться в нерухомості в одній з особливих точок системи, оскільки в цих точках за визначенням $dx/dt = 0, dy/dt = 0$.

Якщо тепер ми виведемо систему зі стану рівноваги, то відображальна точка, зміститься з особливої точки і почне рухатися за фазовою площиною відповідно до рівнянь її руху (5.19).

Стійка чи ні особлива точка системи, що розглядається нами, визначиться тим, піде чи ні відображальна точка з деякої даної області, що оточує особливу точку, причому ця область може бути більшого або меншою залежно від умов завдання. Щодо системи двох рівнянь визначення стійкості мовою ϵ, δ виглядає таким чином.

Стан рівноваги стійкий, якщо для будь-якої заданої області допустимих відхилень від стану рівноваги (область ϵ) ми можемо вказати область $\delta(\epsilon)$, що оточує цей стан рівноваги і яка має таку властивість, що жодна з траєкторій відображальної точки, що починається всередині δ , ніколи не досягне межі області ϵ . Навпаки, стан рівноваги нестійкий, якщо може бути вказана така область відхилень від стану рівноваги (область ϵ), для якої не існує області $\delta(\epsilon)$, що оточує стан рівноваги з тією властивістю, що жодна траєкторія, що починається всередині δ , ніколи не досягне межі ϵ .

Можна записати це визначення стійкості мовою математичних нерівностей, припустивши для простоти, що областю допустимих відхилень ϵ є квадрат.

Стан рівноваги $x = \bar{x}, y = \bar{y}$ стійкий, якщо для довільного заданого ϵ ($\epsilon > 0$) можна знайти таке $\delta > 0$, що якщо при $t = 0$ виконуються нерівності $|x(0) - \bar{x}| < \delta, |y(0) - \bar{y}| < \delta$, то для будь-якого подальшого моменту часу $0 < t < +\infty$ будуть справедливі нерівності $|x(t) - \bar{x}| < \epsilon, |y(t) - \bar{y}| < \epsilon$.

Іншими словами, всі подальші відхилення значень змінних від рівноважних також будуть малими.

5.4 Лінійні системи. Типи особливих точок: вузол, сідло, фокус, центр

Розглянемо прості динамічні системи вигляду (5.19), які можуть бути описані системою двох лінійних диференціальних рівнянь першого порядку (5.24), де a, b, c, d – константи, а x та y – декартові координати на фазовій площині.

Загальне розв'язання системи шукатимемо у вигляді

$$x = Ae^{\lambda t}, \quad y = Be^{\lambda t}. \quad (5.28)$$

Підставимо ці вирази в (5.19) і скоротимо на $e^{\lambda t}$:

$$\lambda A = aA + bB, \quad (5.29)$$

$$\lambda B = cA + dD.$$

Система рівнянь (5.29) з невідомими A, B має ненульовий розв'язок лише в тому разі, якщо її визначник, складений з коефіцієнтів при невідомих, дорівнює нулю:

$$\begin{vmatrix} a - \lambda & b \\ c & d - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$

Розкриваючи цей визначник, отримаємо так зване характеристичне рівняння системи (3.19)

$$\lambda^2 - (a + d)\lambda + (ad - bc). \quad (5.30)$$

Розв'язання цього рівняння дає значення показника $\lambda_{1,2}$, при яких можливі ненульові для A і B розв'язки рівняння (5.29). Ці значення такі:

$$\lambda_{1,2} = \frac{a + d}{2} \pm \sqrt{\frac{(a + d)^2}{4} + bc - ad}. \quad (5.31)$$

Відзначимо, що якщо підкорінний вираз від'ємний, то $\lambda_{1,2}$ – комплексно-спряжені числа. Припустимо, що обидва корені рівняння (5.30) мають відмінні від нуля дійсні частини і що немає кратних коренів. Тоді загальний розв'язок системи (5.19), записаний у загальному вигляді (5.28), можна подати у вигляді лінійної комбінації експонент із показниками λ_1 і λ_2 :

$$\begin{cases} x = c_{11}e^{\lambda_1 t} + c_{12}e^{\lambda_2 t} \\ y = c_{21}e^{\lambda_1 t} + c_{22}e^{\lambda_2 t}. \end{cases} \quad (5.32)$$

Для аналізу характеру можливих траєкторій системи (5.19) на фазовій площині використовуємо лінійне однорідне перетворення координат. Таке перетворення дозволить звести систему (5.19) до так званого канонічного вигляду:

$$\frac{d\xi}{dt} = \lambda_1 \xi, \quad \frac{d\eta}{dt} = \lambda_2 \eta, \quad (5.33)$$

що допускає зручніше подання на фазовій площині порівняно з початковою системою (5.19). Введемо нові координати ζ, η за формулами:

$$\xi = \alpha x + \beta y, \eta = \gamma x + \delta y. \quad (5.34)$$

З курсу лінійної алгебри відомо, що у разі нерівності нулю дійсних частин λ_1, λ_2 ($\operatorname{Re} \lambda_{1,2} \neq 0$) початкову систему (5.19) за допомогою перетворень (5.34) завжди можна звести до канонічного вигляду (5.33) і розглядати її поведінку на фазовій площині ζ, η . Тут можливі різні випадки.

Корені λ_1, λ_2 дійсні й одного знака

Тоді коефіцієнти перетворення дійсні й ми маємо перехід від дійсної площини x, y до дійсної площини ζ, η .

Розділивши одне з канонічних рівнянь (5.33) на інше, маємо

$$\frac{d\eta}{d\xi} = \frac{\lambda_2 \eta}{\lambda_1 \xi}. \quad (5.35)$$

Інтегруючи це рівняння, знаходимо

$$\eta = c |\xi|^a. \quad (5.36)$$

Умовимося розуміти під λ_2 корінь характеристичного рівняння з більшим модулем (це не порушує спільності нашого розгляду). Тоді, оскільки в даному випадку λ_1, λ_2 одного знака, $a > 1$ і ми маємо справу з інтегральними кривими параболічного типу.

Усі інтегральні криві (крім осі η , якій відповідає $c = \infty$) дотикаються на початку координат осі ζ , (остання також є інтегральною кривою рівняння (5.35)). Початок координат – особлива точка.

З'ясуємо тепер напрям рухів на фазовій площині. Якщо λ_1, λ_2 від'ємні, то, як бачимо з рівнянь (5.33), $|\xi|, |\eta|$ зменшуються з часом. Відображальна точка з часом наближається на початку координат, ніколи, однак, не досягаючи його в кінцевий час, оскільки це суперечило б теоремі Коші, яка стверджує, що через кожну точку фазової площини проходить лише одна фазова траєкторія системи рівнянь (5.33). Така особлива точка, через яку проходять інтегральні криві подібно до того, як сім'я парабол $y = cx^a$ ($a > 0$) проходить через початок координат, носить назву вузла (рис. 5.10).

Неважко бачити, що стан рівноваги, відповідний вузлу, при $\lambda_1, \lambda_2 < 0$ є стійким за Ляпуновим, оскільки відображальна точка по всіх інтегральних кривих рухається у напрямку до початку координат (стійкий вузол). Якщо ж λ_1, λ_2 додатні, то $|\xi|, |\eta|$ зростають з часом і відображальна точка з часом віддаляється від початку координат. У такому разі ми маємо справу з нестійким вузлом.

Повернемося тепер на фазову площину x, y . Загальний якісний характер поведінки інтегральних кривих навколо стану рівноваги при цьому не змінюється, але дотичні до інтегральних кривих в особливій точці вже не збігатимуться з осями координат. Кут нахилу цих дотичних до осей координат визначається співвідношенням коефіцієнтів $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ у виразах (5.33). Фазові траєкторії навколо стійкого і нестійкого вузлів на фазовій площині x, y , коли λ_1, λ_2 дійсні й однакових знаків, показані на рис. 5.11.

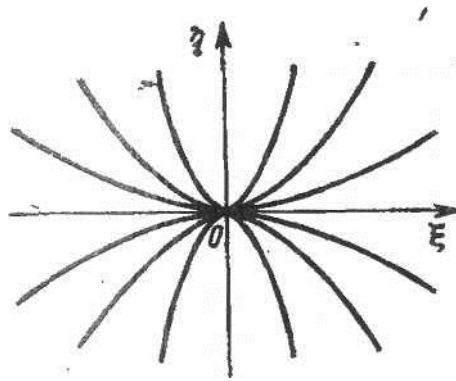


Рисунок 5.10 – Особлива точка типу «вузол» на площині канонічних координат

Необхідно зазначити, що для багатьох екологічних систем характерний безколивальний перехід із довільного початкового стану в стаціонарний. Такі системи описуються диференціальними рівняннями, що мають своїм стаціонарним розв'язком стійку особливу точку типу «вузол».

Корені λ_1, λ_2 дійсні, але різних знаків

Перетворення від координат x, y до координат ζ, η знову дійсне. На площині ζ, η так само спостерігається канонічна система

$$\frac{d\xi}{dt} = \lambda_1 \xi, \quad \frac{d\eta}{dt} = \lambda_2 \eta,$$

тепер λ_1, λ_2 різних знаків. Рівняння кривих на фазовій площині має вигляд

$$\frac{d\eta}{d\xi} = -a \frac{\eta}{\xi}, \quad \text{де } a = \left| \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right|. \quad (5.37)$$

Інтегруючи це рівняння, знаходимо

$$\eta = c |\xi|^{-a}.$$

Цей вираз визначає сім'ю кривих гіперболічного типу, що мають обидві осі координат асимптотами (при $a = 1$ ми мали б сім'ю рівнобічних гіпербол). Осі координат у цьому разі – інтегральні криві; це будуть єдині інтегральні криві, що проходять через початок координат. Кожна з таких інтегральних прямих, що проходять через початок координат, складається з трьох фазових траєкторій системи рівнянь (5.33): із двох рухів до стану рівноваги (або від стану рівноваги) і зі стану рівноваги.

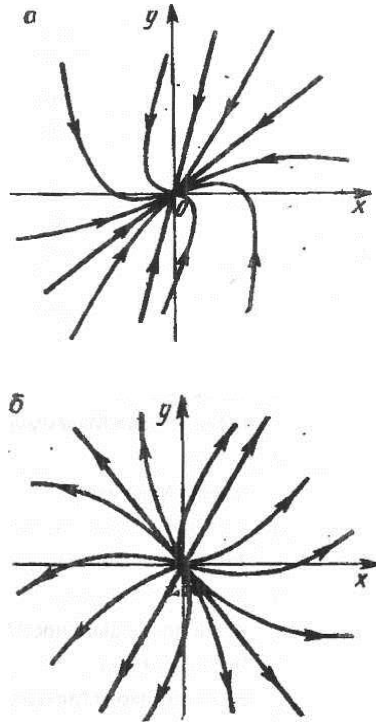


Рисунок 5.11 – Стійкий (а) і нестійкий (б) вузли на фазовій площині x, y

Початок координат буде єдиною особливою точкою даної сім'ї інтегральних кривих. Решта всіх інтегральних кривих – суть гіперболи. Така особлива точка, через яку проходять лише дві інтегральні криві, що є асимптотами (решта всіх інтегральних кривих, що мають вид гіпербол, через особливу точку не проходять), називається особливою точкою типу сідла (рис. 5.12).

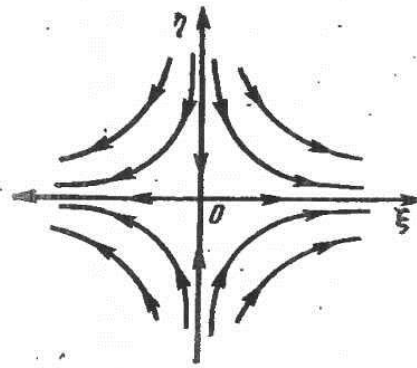


Рисунок 5.12 – Особлива точка типу «сідло» на площині канонічних координат

Розглянемо характер руху відображуючої точки по фазових траєкторіях поблизу стану рівноваги. Нехай, наприклад, $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 < 0$. Тоді відображальна точка, що лежить на осі ζ , віддалятиметься від початку координат, а та, що лежить на осі η , необмежено наблизатиметься до початку координат, не досягаючи його в кінцевий час. Легко перекопатися, розглядаючи рухи уявної точки, що де б вона не знаходилася в початковий момент (за винятком особливої

точки і точок на асимптоті $\eta = 0$), вона врешті-решт віддалятиметься від стану рівноваги. Очевидно, особлива точка типу сідло завжди нестійка.

Лише під час руху по асимптоті $\eta = 0$ система наблизатиметься до стану рівноваги. Проте цей спеціальний випадок руху до стану рівноваги не порушує твердження про те, що стан рівноваги у даному випадку нестійкий. Дійсно, за будь-яких початкових умов, що відрізняються від тих спеціально вибраних, які точно відповідають асимптоті $\eta = 0$, система віддалятиметься від стану рівноваги. Якщо вважати, що всі початкові стани рівноймовірні, ймовірність такого початкового стану, який відповідає руху у напрямку до особливої точки, дорівнює нулю.

Переходячи тепер назад до координат x, y , ми отримаємо ту саму якісну картину характеру траєкторій навколо початку координат (рис. 5.13).

Особливі точки типу «сідло» відіграють важливу роль в так званих «тригерних» екологічних системах, що мають три особливі точки: дві стійкі і одну нестійку – сідло, що лежить між ними. Залежно від того, по яку сторону від сепаратриси сідла знаходиться початковий стан системи, відображальна точка, потрапляє в область тяжіння тієї або іншої стійкої особливої точки.

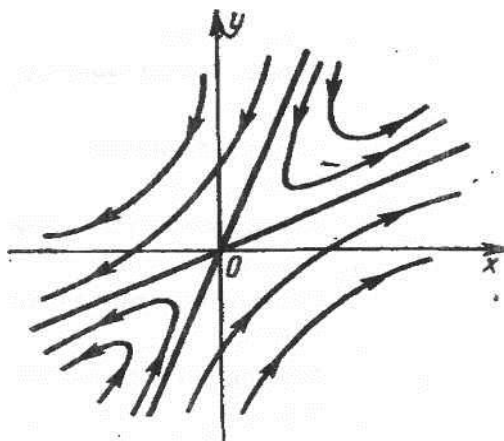


Рисунок 5.13 – Особлива точка типу «сідло» на фазовій площині x, y

Корені λ_1, λ_2 комплексно-спряжені

Неважко бачити, що в цьому випадку при дійсних x та y ми матимемо комплексно-спряжені ζ, η . Проте вводячи ще одне проміжне перетворення, можна і в цьому випадку звести розгляд до дійсного лінійного однорідного перетворення. Візьмемо:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= a_1 + ib_1, \quad \xi = u + iv, \\ \lambda_2 &= a_2 - ib_1, \quad \eta = u - iv, \end{aligned} \tag{5.38}$$

де a_1, b_1, u, v – дійсні величини. Перетворення від x, y до u, v є при наших припущеннях дійсним, лінійним, однорідним із детермінантом, що не дорівнює нулю. Із рівнянь (5.33) і (5.38) маємо:

$$\frac{du}{dt} + i \frac{dv}{dt} = (a_1 + ib_1)(u + iv),$$

$$\frac{du}{dt} - i \frac{dv}{dt} = (a_1 - ib_1)(u - iv),$$

звідки

$$\frac{du}{dt} = a_1 u - b_1 v, \tag{5.39}$$

$$\frac{dv}{dt} = a_1 v + b_1 u.$$

Розділивши друге рівняння (5.39) на перше, отримаємо рівняння

$$\frac{dv}{du} = \frac{a_1 v + b_1 u}{a_1 u - b_1 v}, \tag{5.40}$$

яке легше інтегрується після переходу до полярної системи координат. У полярній системі r, ϕ після підстановки $u = r \cos \phi, v = r \sin \phi$ отримаємо

$$\frac{dr}{d\phi} = \frac{a_1}{b_1} r,$$

звідки

$$r = c e^{\frac{a_1}{b_1} \phi}.$$

Таким чином, на фазовій площині u, v розміщена сім'я логарифмічних спіралей, кожна з яких має асимптотичну точку на початку координат (рис. 5.14).

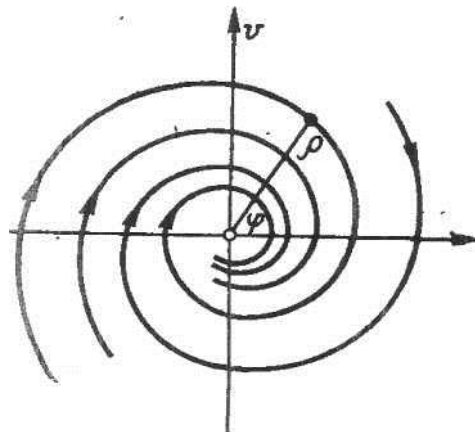


Рисунок 5.14 – Особлива точка типу «фокус» на площині координат u, v

Установимо характер руху відображальної точки по фазових траєкторіях. Помноживши перше з рівнянь (3.39) на u , друге – на v і додавши, отримуємо

$$\frac{1}{2} \frac{d\rho}{dt} = a_1 \rho, \text{ де } \rho = u^2 + v^2.$$

Нехай $a_1 < 0$ ($a_1 = \text{Re} \lambda$). Відображальна точка тоді безперервно

наближається до початку координат, проте не досягаючи його за кінцевий час. Це означає, що всі фазові траєкторії відповідають коливальним, але загасаючим і таким, що наближаються до положення рівноваги рухам (за винятком «руху» по траєкторії $u = 0, v = 0$).

Особлива точка – асимптотична точка всіх інтегральних кривих, що мають вид спіралей, вкладених одна в одну, називається фокусом.

Подивимося, чи буде в даному випадку особлива точка типу фокусу стійкою. Уявна точка по всій інтегральній кривій рухається, наближаючись до особливої точки, звідки випливає, що умова стійкості стану рівноваги виконується. Дійсно, ми завжди можемо вибрати таку область δ (подвійне штрихування), щоб уявна точка не вийшла за межі області ε (просте штрихування) (рис. 5.15).

У разі стійкого фокусу, як і у разі стійкого вузла, буде виконано не тільки умову стійкості за Ляпуновим, але і жорсткішу вимогу. Саме при будь-яких початкових відхиленнях система після достатньо тривалого проміжку часу повернеться як завгодно близько до положення рівноваги. Таку стійкість, при якій початкові відхилення не тільки не наростають, але, і навпаки, загасають, називають абсолютною стійкістю.

Якщо $a_1 > 0$ ($a_1 = \text{Re}\lambda$), то відображальна точка безперервно віддаляється від початку координат, і ми маємо справу із нестійким фокусом.

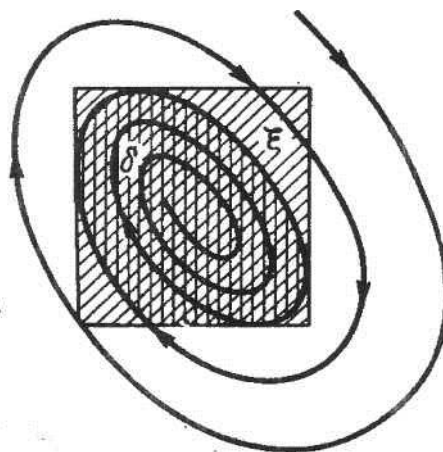


Рисунок 5.15 – Особлива точка типу «стійкий фокус» на фазовій площині x, y ; області ε, δ ілюструють стійкість

При переході від площини u, v до початкової фазової площини x, y спіралі також залишаються спіралями, проте будуть деформовані. Особлива точка типу фокус є стаціонарним розв'язком рівнянь, що описують загасаючі коливання тих або інших характеристик екологічних систем.

При $a_1 = 0$ фазовими траєкторіями на площині u, v будуть кола $u^2 + v^2 = \text{const}$, яким на площині x, y відповідають еліпси

$$by^2 + (a - d)xy - cx^2 = \text{const}.$$

У цьому випадку через особливу точку $x = 0, y = 0$ не проходить жодна інтегральна крива. Така ізольована особлива точка, поблизу якої інтегральні

криві є замкнутими кривими, зокрема еліпси, що «вкладені» один в одного і охоплюють особливу точку, називається центром (рис. 5.16).

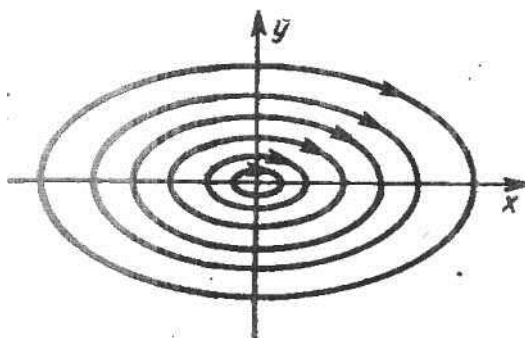
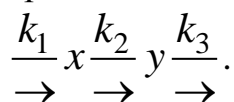


Рисунок 5.16 – Особлива точка типу центр на фазовій площині x, y

Класичним прикладом системи, що має своєю особливою точкою центр, є система Вольтерра. Сформулюємо результати нашого дослідження. У лінійній системі, що розглядається в (5.24) у разі відсутності виродження (тобто при $ad - bc \neq 0$) можливі шість типів станів рівноваги залежно від характеру коренів характеристичного рівняння:

1. Стійкий вузол (λ_1, λ_2 дійсні і від'ємні).
2. Нестійкий вузол (λ_1, λ_2 дійсні і додатні).
3. Сідло (λ_1, λ_2 дійсні і різних знаків).
4. Стійкий фокус (λ_1, λ_2 комплексні і $\text{Re} \lambda < 0$).
5. Нестійкий фокус (λ_1, λ_2 комплексні і $\text{Re} \lambda > 0$).
6. Центр (λ_1, λ_2 уявні).

Для ілюстрації застосування теорії лінійних диференціальних рівнянь розглянемо просту систему хімічних реакцій



Речовина x притікає зовні із постійною швидкістю, перетворюється на речовину y і зі швидкістю, пропорційною концентрації речовини y , виводиться із сфери реакції. Усі реакції мають перший порядок, за винятком процесу припливу речовини зовні, що має нульовий порядок. Запишемо відповідну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = k_1 - k_2x, \\ \frac{dy}{dt} = k_2x - k_3y. \end{cases} \quad (5.41)$$

Координати особливої точки, тобто стаціонарні концентрації речовин x і y , отримаємо, прирівнявши до нуля праві частини рівнянь системи (5.41):

$$\bar{x} = \frac{k_1}{k_2}, \quad \bar{y} = \frac{k_1}{k_3}. \quad (5.42)$$

Характер стійкості особливої точки встановимо, використовуючи метод,

описаний у попередніх параграфах цього розділу.

Запишемо характеристичне рівняння системи (5.41):

$$\begin{vmatrix} a - \lambda & b \\ c & d - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

або розкриваючи визначник

$$\lambda^2 - (k_2 + k_3)\lambda + (k_2k_3) = 0.$$

Корені характеристичного рівняння

$$\lambda_{1,2} = \frac{-(k_2 + k_3)}{2} \pm \sqrt{\frac{(k_2 + k_3)^2}{4} - k_2k_3}$$

завжди обидва дійсні, тому що дискримінант виразу

$$D = (k_2 + k_3)^2 - 4k_2k_3 = (k_2 - k_3)^2$$

додатний при будь-яких значеннях параметрів. Легко бачити, що \sqrt{D} завжди менший, ніж $k_2 + k_3$, тобто корені характеристичного рівняння обидва від'ємні. Отже, стаціонарний стан (3.42) системи рівнянь (3.41) є особливою точкою типу стійкий вузол, тобто при будь-яких початкових значеннях концентрацій після закінчення досить тривалого часу їх значення набудуть величини, скільки завгодно близької до (3.42). При цьому концентрація речовин x наближається до свого стаціонарного стану завжди монотонно, концентрація речовини y може за певних початкових умов проходити через \max або \min . Коливальні режими в такій системі неможливі.

5.5. Дослідження стійкості нелінійних систем за методом Ляпунова

Від окремого випадку лінійної системи повернемося до загального випадку динамічної системи, що описується двома диференціальними рівняннями першого порядку:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= P(x, y), \\ \frac{dy}{dt} &= Q(x, y). \end{aligned} \tag{5.43}$$

Щоб відшукати на фазовій площині стани рівноваги, потрібно знайти ті точки фазової площини, де швидкість зміни змінних дорівнює нулю або, інакше, потрібно знайти точки перетину кривих: $P(x, y) = 0$, $Q(x, y) = 0$.

Як ми вже знаємо, ці точки будуть особливими точками диференціального рівняння першого порядку, що визначає інтегральні криві:

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{\substack{x=\bar{x} \\ y=\bar{y}}} = \frac{Q(\bar{x}, \bar{y})}{P(\bar{x}, \bar{y})} = 0. \tag{5.44}$$

Перейдемо до дослідження стійкості стану рівноваги системи (5.43).

Пуанкаре і Ляпунов дали аналітичний метод дослідження стійкості

стаціонарного стану.

Для дослідження стійкості стану рівноваги $x = \bar{x}$, $y = \bar{y}$ – точки перетину головних ізоклін $P(x,y) = 0$, $Q(x,y) = 0$ – необхідно розглянути характер рухів за наявності деяких відхилень від стану рівноваги. Введемо замість змінних x , y нові незалежні змінні ζ , η , визначивши їх як зсуви щодо положення рівноваги на фазовій площині:

$$x = \bar{x} + \xi, \quad y = \bar{y} + \eta. \quad (5.45)$$

Підставивши цей вираз у (5.43), отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}}{dt} + \frac{d\xi}{dt} &= P(\bar{x} + \xi, \bar{y} + \eta), \\ \frac{d\bar{y}}{dt} + \frac{d\eta}{dt} &= Q(\bar{x} + \xi, \bar{y} + \eta). \end{aligned} \quad (5.46)$$

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{d\bar{y}}{dt} = 0, \quad \text{оскільки } x = \bar{x}, y = \bar{y} \text{ – координати особливої точки.}$$

Припускаючи наявність і безперервність похідних порядку не нижче першого у функції P і Q , ми можемо розкласти праві частини отриманих рівнянь у ряд Тейлора за змінними ζ , η . Остаточно, переходячи від змінних x , y до змінних ζ , η у рівняннях (5.43), отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{dt} &= P(\bar{x}, \bar{y}) + a\xi + b\eta + \left[p_{11}\xi^2 + 2p_{12}\xi\eta + p_{22}\eta^2 + \dots \right] + \dots, \\ \frac{d\eta}{dt} &= Q(\bar{x}, \bar{y}) + c\xi + d\eta + \left[q_{11}\xi^2 + 2q_{12}\xi\eta + q_{22}\eta^2 + \dots \right] + \dots, \end{aligned} \quad (5.47)$$

де $a = P'_x(\bar{x}, \bar{y}), b = P'_y(\bar{x}, \bar{y}), c = Q'_x(\bar{x}, \bar{y}), d = Q'_y(\bar{x}, \bar{y})$.

$P(\bar{x}, \bar{y}) = 0, Q(\bar{x}, \bar{y}) = 0$, за визначенням особливої точки $x = \bar{x}, y = \bar{y}$.

Обґрунтований Ляпуновим метод дослідження стійкості зводиться до такого. Відкинемо в рівняннях (5.47) нелінійні члени. Тоді ми отримаємо систему лінійних рівнянь із постійними коефіцієнтами, тобто так звану систему рівнянь першого наближення:

$$\frac{d\xi}{dt} = \alpha x + \beta y, \quad \frac{d\eta}{dt} = c x + d y. \quad (5.48)$$

Розв'язок цієї системи записується відразу, якщо нам відомі корені характеристичного рівняння

$$\begin{vmatrix} a - \lambda & b \\ c & d - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$

Ляпунов показав, що у випадку, якщо обидва корені цього рівняння мають відмінні від нуля дійсні частини, дослідження рівнянь першого наближення, отриманих шляхом відкидання нелінійних членів, завжди дає правильну відповідь на питання про стійкість стану рівноваги в системі (5.43).

Саме якщо обидва корені мають негативну дійсну частину і, отже, всі розв'язки рівнянь першого наближення (5.48) загасають, то стан рівноваги буде стійким; якщо ж хоча б один корінь має додатну дійсну частину, тобто якщо система (5.48) має наростаючі розв'язки, то стан рівноваги нестійкий. Якщо дійсні частини обох коренів характеристичного рівняння дорівнюють нулю або якщо один корінь дорівнює нулю, а інший від'ємний, то рівняння (5.48) не дають відповіді на питання про стійкість стану рівноваги.

У тому випадку, якщо обидва корені характеристичного рівняння мають відмінні від нуля дійсні частини, рівняння першого наближення визначають не лише, стійкість стану рівноваги, але й характер фазових траєкторій у досить малому його околі. Стани рівноваги (особливі точки), для яких дійсні частини обох коренів характеристичного рівняння відмінні від нуля, є «грубими».

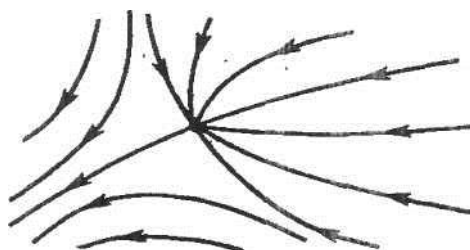


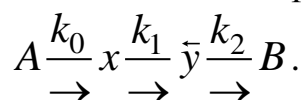
Рисунок 5.17 – Особлива точка типу «сідло-вузол»

Характер фазових траєкторій у їх досить малому околі зберігається при будь-яких досить малих змінах різних частин рівнянь (5.43) – функцій $P(x, y)$ і $Q(x, y)$, якщо достатньо малими є також і зміни їх похідних першого порядку. Таким чином, абсолютно так само, як і у разі лінійних рівнянь, ми маємо тут п'ять типів грубих станів рівноваги: стійкий вузол, нестійкий вузол, стійкий фокус, нестійкий фокус і сідло.

Розглянемо декілька прикладів застосування якісної теорії диференціальних рівнянь, зокрема метод дослідження стійкості стаціонарних станів за Ляпуновим при вивченні моделей деяких екологічних процесів.

5.5.1 Кінетичні рівняння Лотки та модель Вольтерра

Лоткою була досліджена гіпотетична хімічна реакція:



Зважаючи на свою простоту, ця модель є гарною ілюстрацією застосування викладених вище методів.

Нехай у деякому об'ємі знаходиться в надлишку речовина A . Молекули A з деякою постійною швидкістю k_0 перетворюються на молекули речовини x (реакція нульового порядку). Речовина x може перетворюватися на речовину y , причому швидкість цієї реакції тим більша, чим більша концентрація речовини y – реакція другого порядку. У схемі це відбито наявністю зворотної

стрілки над символом y . Молекули y , усвою чергу, необоротно розпадаються, в результаті утворюється речовина B (реакція першого порядку).

Запишемо систему рівнянь, що описують реакції:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = k_0 - k_1xy \\ \frac{dy}{dt} = k_1xy - k_2y \\ \frac{dB}{dt} = k_2y \end{cases} \quad (5.49)$$

Тут x , y , B – концентрації хімічних компонентів. Перші два рівняння цієї системи не залежать від B , тому їх можна розглядати окремо. Розглянемо стаціонарний розв'язок системи:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{d\bar{y}}{dt} = 0.$$

У цих умовах ми маємо систему алгебраїчних рівнянь, що зв'язують рівноважні концентрації x і y :

$$\begin{cases} k_0 - k_1\bar{x}\bar{y} = 0, \\ k_1\bar{x}\bar{y} - k_2\bar{y} = 0 \end{cases} \quad (5.50)$$

Координати особливої точки

$$\bar{x} = \frac{k_2}{k_1}, \bar{y} = \frac{k_0}{k_2}. \quad (5.51)$$

Досліджуємо стійкість цього стаціонарного стану методом Ляпунова. Введемо нові змінні ζ , η , що характеризують відхилення змінних від рівноважних концентрацій $x = \bar{x}$, $y = \bar{y}$:

$$x(t) = \bar{x} + \zeta(t), y(t) = \bar{y} + \eta(t).$$

Лінеаризована система в нових змінних має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{d\zeta}{dt} &= -k_2\eta - \frac{k_1k_0}{k_2}\zeta, \\ \frac{d\eta}{dt} &= \frac{k_0k_1}{k_2}\zeta \end{aligned} \quad (5.52)$$

Відзначимо, що в системі (5.52) на відміну від системи (5.49) величини ζ і η можуть змінювати знак, тоді як початкові змінні x і y , що є концентраціями, можуть бути тільки додатними.

Запишемо характеристичне рівняння системи (5.52):

$$\begin{vmatrix} -\frac{k_1 k_0}{k_2} - \lambda & -k_2 \\ \frac{k_1 k_0}{k_2} & \lambda \end{vmatrix} = 0,$$

$$\lambda^2 - \left(\frac{k_1 k_0}{k_2}\right) \lambda + (k_0 k_1) = 0.$$

Корені характеристичного рівняння

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left(-\frac{k_1 k_0}{k_2} \pm \sqrt{\left(\frac{k_1 k_0}{k_2}\right)^2 + -4k_0 k_1} \right).$$

При $4k_2^2 > k_0 k_1$ підкорінний вираз від'ємний, і особлива точка – фокус, при зворотному співвідношенні – вузол. І в тому, і в іншому випадках особлива точка стійка, оскільки дійсна частина обох коренів характеристичного рівняння від'ємна.

Таким чином, в описаній вище хімічній реакції можливі різні режими зміни змінних залежно від співвідношення величин констант швидкостей: якщо $4k_2^2 > k_0 k_1$, мають місце загасаючі коливання концентрацій компонентів, при $4k_2^2 < k_0 k_1$ – безколивальне наближення концентрацій до стаціонарних.

Співвідношення параметрів $4k_2^2 = k_0 k_1$ відповідає біфуркації, тобто зміні типу особливої точки системи рівнянь (5.49).

Розглянемо площину параметрів, де по осі абсцис відкладені значення константи k_2 , а по осі ординат – добуток $k_0 k_1$ (рис. 5.18).

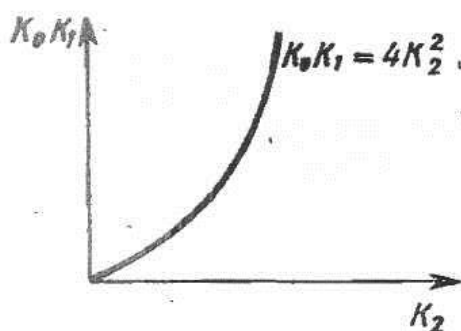


Рисунок 5.18 – Площина параметрів для системи рівнянь (5.49)

Лінією біфуркації тут є парабола $4k_2^2 = k_0 k_1$, яка ділить площину параметрів на дві області – стійких вузлів і стійких фокусів. Задаючи ті або інші значення параметрів, ми можемо задати коливальний або безколивальний режим зміни концентрації речовин x і y , і фазовий портрет системи відповідно буде фокусом (а) або вузлом (б) (рис. 5.19).

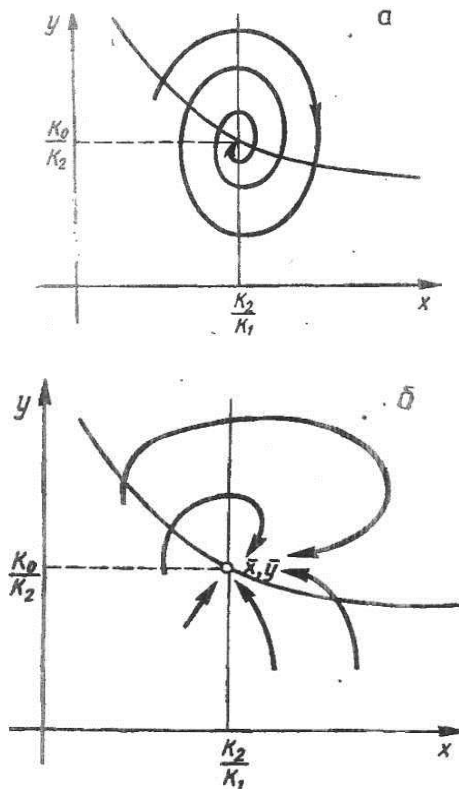


Рис.5.19 – Фазові портрети системи (5.49) для різних співвідношень параметрів k_0, k_1, k_2 : а – стійкий фокус, б – стійкий вузол

Відзначимо, що якщо встановляться стаціонарні концентрації речовин x і y у даній системі хімічних реакцій Лотки, це приведе до встановлення постійної швидкості приросту концентрації речовини B (у третьому рівнянні системи

$$(5.49) \quad \frac{dB}{dt} = k_2 y.$$

Очевидно, що насправді така система реалізуватися не може,

оскільки в ній при $t \rightarrow \infty$ концентрація речовини B прагне до нескінченності. Проте система, подібна до системи реакції Лотки, може бути фрагментом складнішої хімічної системи, і досліджені нами рівняння правильно описують поведінку компонентів x і y , наприклад, у тому випадку, коли приплив речовини x (швидкість його стала і дорівнює k_0) здійснюється з великого «резервуара», а вплив речовини y – у великий «резервуар» (максимально можливе значення B дуже велике). При цих припущеннях на малих проміжках часу (порівняно з часом істотної зміни в заповненій ємності) наш розгляд є цілком правомірним.

Як другий приклад ми розглянемо класичну екологічну модель, яка вперше була запропонована Вольтерра для пояснення періодичної зміни числа особин антагоністичних видів тварин, так звану вольтеррівську модель хижак – жертва, і її деякі узагальнення:

Нехай у деякому замкнутому районі живуть, наприклад, зайці і вовки. Зайці харчуються рослинною їжею, наявною завжди в достатній кількості. Вовки (хижаки) можуть харчуватися лише зайцями (жертвами). Позначимо число зайців N_1 , а число вовків – N_2 , Оскільки кількість їжі для зайців

необмежена, ми можемо припустити, що зайці розмножуються із швидкістю, пропорційною їх числу:

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_{\text{розм}} = \varepsilon_1 N_1, \quad \varepsilon > 0. \quad (5.53)$$

Рівняння (5.53) відповідає рівнянню автокаталітичної хімічної реакції першого порядку.

Якщо зайці не вмирають своєю смертю, то їх зменшення пропорційне імовірності зустрічі зайця з вовком, тобто вона пропорційна добутку чисельності $N_1 N_2$. Можна припустити за аналогією із бімолекулярними реакціями, де імовірність появи нової молекули пропорційна імовірності зустрічі двох молекул, що і кількість вовків збільшується тим швидше, чим частіше відбуваються їх зустрічі із зайцями, тобто пропорційно $N_1 N_2$. Крім того, має місце процес природної смертності вовків, причому швидкість смертності пропорційна їх кількості.

Ці міркування приводять нас до системи рівнянь для змін чисельності зайців N_1 і вовків N_2 :

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= N_1(\varepsilon_1 - \gamma_2 N_2), \\ \frac{dN_2}{dt} &= -N_2(\varepsilon_2 - \gamma_1 N_1). \end{aligned} \quad (5.54)$$

Покажемо, що система рівнянь (5.54) має на фазовій площині змінних N_1 , N_2 ненульову особливу точку типу центр. Координати цієї особливої точки \bar{N}_1, \bar{N}_2 легко знайти, прирівнявши праві частини рівнянь системи (5.54) до нуля. Це дає стаціонарні ненульові значення:

$$\bar{N}_1 = \frac{\varepsilon_2}{\gamma_1}, \quad \bar{N}_2 = \frac{\varepsilon_1}{\gamma_2}.$$

Оскільки всі параметри $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_1, \gamma_2$ додатні, точка \bar{N}_1, \bar{N}_2 розміщена в додатному квадранті фазової площини. Лінеаризація системи поблизу цієї точки дає

$$\begin{aligned} \frac{dn_1}{dt} &= -\gamma_2 \bar{N}_1 n_2 = -\frac{\gamma_2 \varepsilon_2}{\gamma_1} n_2, \\ \frac{dn_2}{dt} &= \gamma_1 \bar{N}_1 n_1 = \frac{\gamma_1 \varepsilon_1}{\gamma_2} n_1. \end{aligned} \quad (5.55)$$

Тут $n_1(t)$ і $n_2(t)$ – відхилення від особливої точки на фазовій площині N_1, N_2 :

$$n_1(t) = N_1(t) - \bar{N}_1, \quad n_2(t) = N_2(t) - \bar{N}_2. \quad (5.56)$$

Характеристичне рівняння системи (5.55)

$$-\begin{vmatrix} -\lambda & -\frac{\gamma_2 \varepsilon_2}{\gamma_1} \\ \gamma_1 \varepsilon_1 & \gamma_1 \\ \gamma_2 & -\lambda \end{vmatrix} = 0, \quad \lambda^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 = 0.$$

Корені цього рівняння чисто уявні: $\lambda_{1,2} = \pm i\sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2}$.

Таким чином, дослідження системи показує, що траєкторії поблизу особливої точки є концентричними еліпсами, а сама особлива точка – центром. Модель Вольтерра і далеко від особливої точки має замкнуті траєкторії, хоча форма цих траєкторій вже відрізняється від еліпсоїдної (рис. 5.20). Поведінка змінних у часі наведена на рис. 5.21.

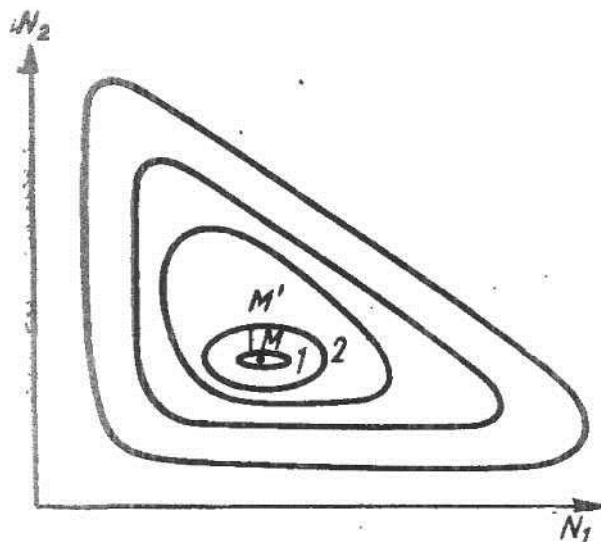


Рисунок 5.20 – Фазова картина системи хижак – жертва (особлива точка типу «центр»)

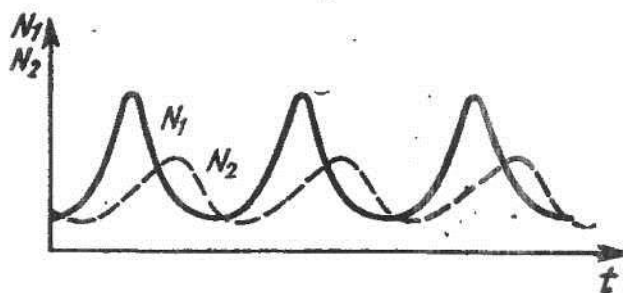


Рисунок 5.21 – Залежність чисельності хижака N_2 і жертви N_1 від часу

Як ми вже відзначали, особлива точка типу «центр» стійка, але не асимптотична. Покажемо на прикладі, у чому це полягає. Нехай коливання $N_1(t)$ і $N_2(t)$ відбуваються таким чином, що відображальна точка рухається фазовою площиною по траєкторії 1 (рис. 5.20). У мить, коли точка знаходиться в положенні M , у систему ззовні додається деяка кількість особин $N_2(t)$, така, що відображальна точка переходить стрибком із точки M у точку M' . Після цього, якщо система знову належить сама собі, коливання N_1 , N_2 вже відбуватимуться із великими амплітудами, ніж раніше, і відображальна точка рухатиметься по

траєкторії 2. Це і означає, що коливання в системі нестійкі: вони назавжди змінюють свої характеристики при зовнішній дії.

На рис. 5.22 зображені експериментальні криві – коливання чисельності північноамериканського зайця і рисі в Канаді (Віллі, 1964). Ці криві побудовані на підставі даних про кількість заготовлених шкурок. Періоди коливань чисельності зайців (жертв) і рисей (хижаків) приблизно однакові і становлять близько 9–10 років. При цьому максимум чисельності зайців випереджає, як правило, максимум чисельності рисі на один рік.

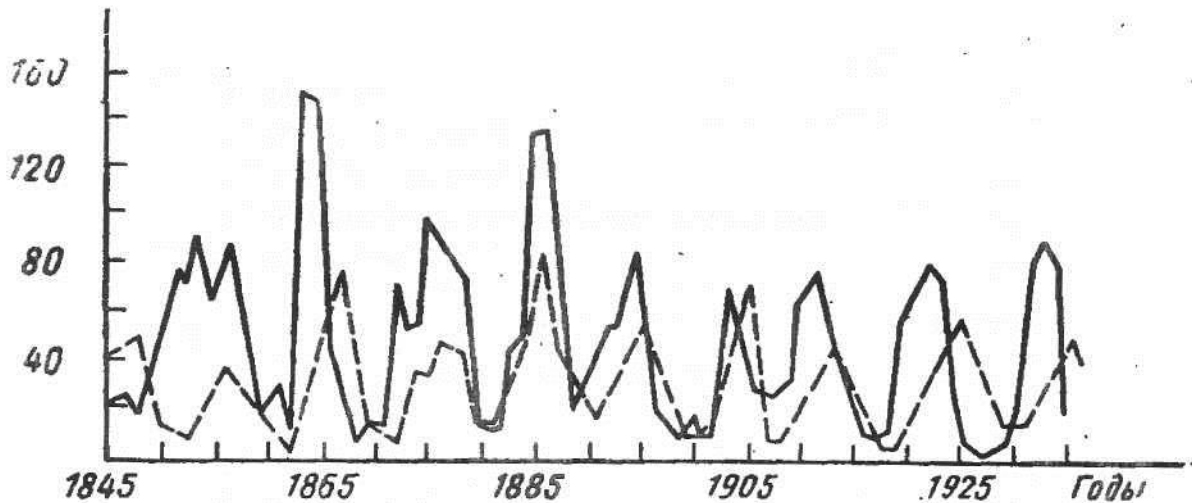


Рисунок 5.22 – Криві чисельності зайців і рисі в Канаді

Ми бачимо, що форма цих експериментальних кривих менш правильна, ніж теоретичних. Проте у даному випадку досить того, що модель забезпечує збіг найбільш істотних характеристик теоретичних і експериментальних кривих, тобто величин амплітуди і зсуву фаз між коливаннями чисельностей хижаків і жертв. Набагато серйозніший недолік моделі Вольтерра – це нестійкість розв’язків системи рівнянь. Дійсно, як вже йшлося раніше, будь-яка випадкова зміна чисельності того або іншого виду повинна привести, наслідуючи модель, до зміни амплітуди коливань обох видів. Природно, що в природних умовах тварини піддаються незліченній кількості таких випадкових сприйнять. Проте, як видно з експериментальних кривих, амплітуда коливань чисельності видів мало змінюється з роками.

Крім того, через «негрубість» системи Вольтерра довільна мала зміна виду правих частин рівнянь системи (5.54) приводить до зміни типу особливої точки і, отже, характеру фазових траєкторій системи. Негрубі системи взагалі не можуть бути адекватним описом природних явищ.

З метою усунення цього недоліку були запропоновані різними авторами різні модифікації системи Вольтерра. Зупинимося на моделі, що враховує самообмеження у зростанні обох популяцій. На прикладі цієї моделі наочно видно, як може змінюватися характер розв’язків при зміні параметрів системи.

Отже, розглядається система:

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= N_1(\varepsilon_1 - \gamma_{12}N_2 - \gamma_{11}N_1), \\ \frac{dN_2}{dt} &= -N_2(\varepsilon_2 - \gamma_{21}N_1 + \gamma_{22}N_2).\end{aligned}\tag{5.57}$$

Система (5.57) відрізняється від раніше розглянутої системи наявністю в правих частинах рівнянь членів виду $\gamma_{ii}N_i^2$.

Ці члени відображають той факт, що чисельність популяції жертв не може зростати до нескінченності навіть за відсутності хижаків через обмеженість харчових ресурсів, обмеженість ареалу існування. У свою чергу, такі самі «самообмеження» накладаються і на популяцію хижаків.

Для знаходження стаціонарної чисельності видів N_1 і N_2 прирівняємо до нуля праві частини рівнянь системи (5.57). Розв'язки з нульовими значеннями чисельностей хижаків або жертв на даний момент не розглядатимуться. Тому розглянемо систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \gamma_{11}\bar{N}_1 + \gamma_{12}\bar{N}_2 = \varepsilon_1, \\ \gamma_{21}\bar{N}_1 + \gamma_{22}\bar{N}_2 = \varepsilon_2. \end{cases}$$

Її розв'язок

$$\bar{N}_1 = \frac{\varepsilon_1\gamma_{11} - \varepsilon_2\gamma_{12}}{-\gamma_{11}\gamma_{22} + \gamma_{12}^2}, \bar{N}_2 = \frac{\varepsilon_1\gamma_{11} - \varepsilon_2\gamma_{12}}{\gamma_{12}^2 - \gamma_{22}\gamma_{11}}\tag{5.58}$$

дає нам координати особливої точки. На параметри системи тут необхідно накласти умову додатності стаціонарних чисельностей: $\bar{N}_1 > 0, \bar{N}_2 > 0$.

З виразу для характеристичних чисел видно, що якщо виконана умова

$$[\varepsilon_1\gamma_{22}(\gamma_{11} - \gamma_{22}) + \varepsilon_2\gamma_{11}(\gamma_{12} + \gamma_{22})]^2 \leq 4\gamma_{12}\gamma_{21}(\varepsilon_1\gamma_{21} - \varepsilon_2\gamma_{11})(\varepsilon_1\gamma_{22} + \varepsilon_2\gamma_{12}),\tag{5.59}$$

то чисельності хижаків і жертв здійснюють в часі загасаючі коливання, система має ненульову особливу точку – стійкий фокус. Фазовий портрет такої системи зображений на рис. 5.23 а.

Припустимо, що параметри в нерівності (5.59) так змінюють свої значення, що умова (5.59) дає рівність. Тоді характеристичні числа системи (5.57) будуть однакові, а її особлива точка лежатиме на межі між областями I і II стійких фокусів і вузлів. При зміні знака нерівності (5.59) на зворотний особлива точка стає стійким вузлом. Фазовий портрет системи для цього випадку наведений на рис. 5.23 б.

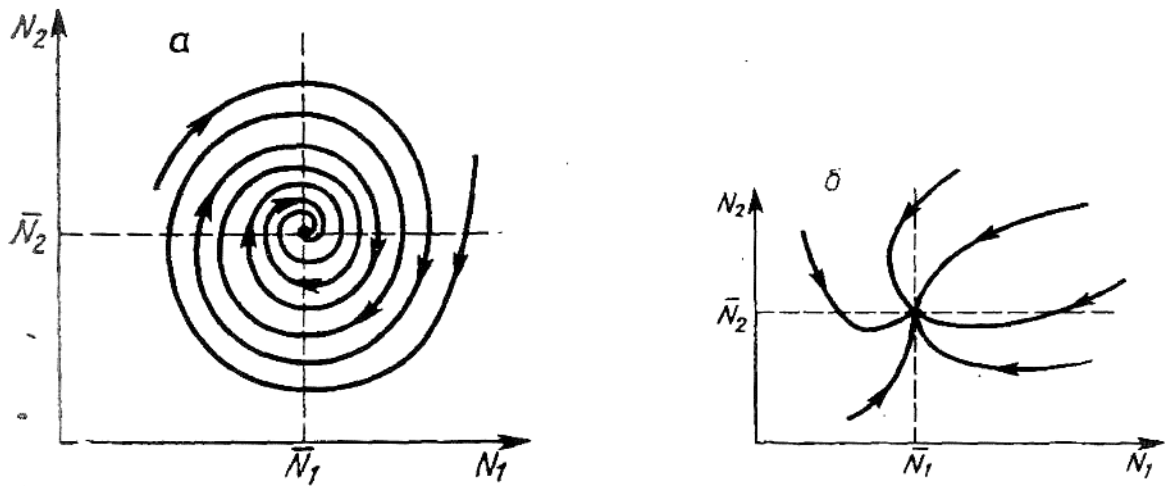


Рисунок 5.23 – Фазовий портрет системи (5.57):
 а – при виконанні співвідношення (3.59) між параметрами,
 б – при зворотному співвідношенні параметрів

Контрольні запитання і завдання для самостійної роботи до розділу

1. Поясніть поняття вимог відповідності (адекватності) математичної моделі експериментальним даним?
2. Які властивості екологічних систем дозволяють проводити спрощення їх математичних моделей?
3. Поясніть поняття стаціонарних станів системи та їх стійкість за Ляпуновим?
4. Охарактеризуйте поведінку системи, що описується логістичним рівнянням за методом Ляпунова.
5. Поясніть модель проточного культиватора.
6. Якими рівняннями описують взаємодію двох популяцій в екології?
7. Яким чином знаходять стаціонарні стани у двовидових екологічних системах?
8. Поясніть поняття стаціонарного стану у двовидових екологічних системах за методом Ляпунова?
9. Назвіть види стаціонарних станів у двовидових екологічних системах за методом Ляпунова?
10. Охарактеризуйте модель простої хімічної реакції за методом Ляпунова.
11. Поясніть модель типу «хижак – жертва» за класичною моделлю Вольтерра.

6 ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ В ЕКОЛОГІЇ

6.1 Основні принципи використання загальносистемного підходу до моделювання екологічних систем

Кінцева мета вивчення штучних і природних екосистем – це найбільш раціональне їх використання для потреб людини, яке передбачає оптимальне управління екосистемами. Вирішення завдання оптимального управління неможливе без побудови математичної моделі об'єкта управління, оскільки метод «проб і помилок» стосовно природних екосистем не придатний через їх унікальність і неприпустимість викликати в них необоротні зміни. Якщо модель досить точно імітує дійсність, вона являє собою необмежені можливості для експериментування, в неї можна вводити нові чинники і збурення, для того, щоб з'ясувати їх вплив на систему.

До необхідності побудови математичних моделей популяцій, співтовариств і екосистем можна підійти не лише з позицій оптимального управління, але й виходячи з вимог кількісного опису зв'язків і функціонування цих складних систем далеко не у всіх деталях, доступних безпосередньому спостереженню.

Процеси енерго- і масообміну в біогеоценозах відбуваються за участі різних рослинних і тваринних організмів під впливом чинників навколишнього середовища, елементи якого безпосередньо залучаються до перетворень біомаси ланок екологічних систем. Кожна популяція, оскільки вона існує на обмеженій території і використовує для свого існування обмежену кількість речовини, входить у деяке співтовариство популяцій тварин і рослин, створюючи певну структуру харчових (трофічних) зв'язків і метаболізму, що оточують її. Разом з використовуваною неживою речовиною таке співтовариство і становить біогеоценоз. При дослідженні складних біогеоценозів (екологічних систем) плідними виявилися методи загальносистемного підходу. Один з них – виділення з екологічної системи взаємодіючих складових структурних елементів, таких, як види, що належать до різних трофічних рівнів або вікових і статевих внутрішньовидових груп. Інший важливий елемент системного підходу – встановлення характеру процесів, в яких бере участь кожен елемент (процеси розмноження і росту, взаємодії між елементами типу конкуренції, хижацтва і т. д.). До екологічних систем також може застосовуватися принцип ізоморфізму, що дозволяє описувати схожими математичними рівняннями системи, різні за своєю природою, але однакові за структурою і типом взаємодії між їх складовими елементами. У даному випадку є велика схожість систем рівнянь хімічної кінетики і міжпопуляційної динаміки.

Необхідність описувати екологічні взаємодії стала поштовхом для розвитку системних досліджень. За словами одного із засновників загальної

теорії систем Людвіга фон Берталанфі, «Праці Вольтерра, Лотки, Гаузе й інших з теорії популяцій належать до класичних праць загальної теорії систем. У них уперше була продемонстрована можливість розвитку концептуальних моделей для таких явищ, як боротьба за існування, які можуть бути піддані емпіричній перевірці».

Побудова математичної моделі вимагає знання деякого набору параметрів системи, які можуть бути визначені тільки із спостереження або експерименту. Під час роботи з моделлю необхідна систематизація, а часто і застосування нових методик спостережень і експериментів з метою встановлення факторів і взаємозв'язків, значення яких може виявити слабкі місця гіпотез і припущень, покладених в основу моделі. Весь процес моделювання, від побудови моделі до перевірки передбачених із її допомогою явищ і впровадження отриманих результатів у практику, повинен бути пов'язаний із ретельно відпрацьованою стратегією дослідження і чіткою перевіркою даних, що використовуються під час аналізу. Це положення, справедливе для математичного моделювання в цілому, особливо важливе для такої складної науки, як екологія, що має справу із різними взаємодіями між величезною безліччю організмів. Майже всі ці взаємодії динамічні в тому сенсі, що вони залежать від часу і постійно змінюються, причому, як правило, включають позитивні і негативні зворотні зв'язки. Складність екосистем посилюється мінливістю самих живих організмів, яка може виявлятися і при взаємодії організмів один з одним, і в реакції організмів на умови навколишнього середовища. Ця реакція може виражатися у зміні швидкості росту, відтворення і в різній здатності до виживання в умовах, що сильно відрізняються. До цього додаються зміни, що відбуваються незалежно від таких факторів середовища, як клімат і характер місцепроживання. Тому дослідження і регулювання екологічних процесів і екологічних систем є винятково важливим завданням. Важливим чинником, що ускладнює дослідження, є тривалість екологічних процесів. Наприклад, дослідження у галузі землеробства і садівництва пов'язані з визначенням врожайності, а урожай збирають раз на рік, через це один цикл експерименту займає 1 рік і більше. Щоб знайти оптимальну кількість добрив і провести інші можливі заходи щодо окультурення, може знадобитися декілька років, особливо коли необхідно розглядати взаємозв'язок між експериментальними результатами і погодою. У лісоводстві залежно від тривалості колообігу урожаїв деревини найтриваліший експеримент займає 25 років, а довготривалі експерименти можуть тривати від 40 до 120 років. Аналогічні масштаби часу необхідні і для проведення досліджень за керуванням природними ресурсами. Для опису динаміки чисельності видів у складних екосистемах і вирішення питань оптимального керування природними і штучними співтовариствами потрібно застосування комп'ютерів, особливо коли мова йде про кількісну відповідність моделі і реальності. Проте в основі суворого математичного опису екосистем лежать якісь елементарні моделі, що описують «елементарні» взаємодії в екосистемі і піддаються якісному аналізу. Методи якісного дослідження дозволяють визначити такі важливі характеристики моделей екосистем, як їх стійкість і наявність коливань чисельності видів.

Із проблемою стійкості екосистем доводиться все частіше стикатися при вирішенні питань експлуатації природних популяцій і угруповань, оцінці меж забруднення середовища, урахування наслідків, здійснення тих або інших природогосподарських заходів. При цьому кількісні оцінки стійкості або «стабільності» екосистем можуть бути отримані лише шляхом побудови математичних моделей і формалізації самого терміна «стійкість». Дійсно, інтуїтивно зрозуміло, що біогеоценоз, екосистема, біологічне суспільство, що існують у більш-менш незмінному вигляді достатній час, мають деяку внутрішню здатність протистояти збурювальним чинникам, що впливають на неї з боку зовнішнього середовища (серед них і антропогенний чинник). При цьому стійкою, як правило, вважається система, незмінна на різних рівнях. Передбачається незмінним у часі географічний регіон або ландшафт, що включає систему, що вивчається і що визначає умови проживання рослин і тварин. Основними процесами, що визначають динаміку регіону, будуть не зміни чисельності окремих видів, що населяють його, а глобальні біогеохімічні цикли. У стійкій системі передбачається збереження числа видів у даному біологічному співтоваристві. Вважають також, що співтовариство стабільно стійке, якщо чисельності складових її популяцій не піддаються різким відхиленням від деяких середніх значень. Це визначення близьке до термодинамічного поняття стійкості такої системи, в якій мала ймовірність великих флуктуації, здатних відвести систему від рівноважного стану або навіть зруйнувати її.

Як правило, при математичному моделюванні біогеоценозу завдання полягає в тому, щоб отримати обґрунтований прогноз кінетики ценозу, знаючи його склад і співвідношення його компонентів. При цьому будуть зроблені різні початкові припущення і переслідуються відповідні цілі при вивченні моделей, які один з піонерів математичної екології А. А. Ляпунов (1972) сформував так:

А. Біологічні характеристики компонентів вважаються незмінними, так само, як і взаємодії між ними. Ценоз вважається однорідним у просторі. Вивчаються зміни в часі кількості (біомаси) компонентів ценозу.

Б. Прі збереженні гіпотези однорідності ценозу вводиться припущення про закономірну зміну системи відносин між компонентами. Це може відповідати або закономірній зміні зовнішніх умов (наприклад, сезонній), або заданому характеру еволюції форм, що створюють цей ценоз. При цьому, як і раніше, вивчається кінетика кількості компонентів.

Апаратом для вивчення цих двох класів завдань служать системи звичайних диференціальних і диференціально-різнісних рівнянь з постійними (А) і змінними (Б) коефіцієнтами.

В. Об'єкти, що становлять ценоз, вважаються за різнорідні за своїми властивостями і здатні до дії відбору. Передбачається, що еволюція форм визначається умовами існування ценозу. У цих умовах вивчається, з одного боку, кінетика кількості компонентів, з іншого – дрейф характеристик популяцій, що створюють цей ценоз. При вирішенні таких завдань істотно використовується апарат теорії ймовірності. До цієї групи належать багато завдань генетики популяції.

Г. Нарешті, можлива відмова від територіальної однорідності ценозу та урахування залежності усереднених концентрацій від координат. Тут виникають питання, пов'язані із просторовим перерозподілом складових ценозу, як живих, так і неживих. Наприклад, чисельність (біомаса) видів може змінюватися зі зміною глибини водоймища. Для опису таких систем необхідно залучення апарату диференціальних рівнянь у часткових похідних.

На початку ХХ ст. з'явилися перші моделі взаємодії видів, наприклад, модель А. Лотки (1925), наведена ним у книзі «Елементи фізичної біології». Проте засновником сучасної математичної екології насправді вважається італійський математик Віте Вольтерра, який розробив математичну теорію біологічних угруповань, апаратом якої були системи диференціальних і інтегродиференціальних рівнянь.

Системи, які вивчалися Вольтерра, складаються із декількох видів. В окремих випадках розглядається також запас їжі, який використовують деякі з видів. Про компоненти системи формулюються такі припущення.

1. Їжа або є в необмеженій кількості, або її кількість у часі жорстко регламентована.

2. Особини кожного виду вимирають так, що за одиницю часу гине стала частина існуючих особин.

3. Хижі види поїдають жертв, причому за одиницю часу кількість жертв, яких з'їдають, завжди пропорційна імовірності зустрічі особин цих двох видів, тобто добутку кількості хижаків на кількість жертв.

4. Якщо є їжа в обмеженій кількості і декілька видів, які здатні її споживати, частка їжі, споживана кожним видом за одиницю часу, пропорційна кількості особин цього виду, взятого з деяким коефіцієнтом, що залежить від виду (моделі міжвидової конкуренції).

5. Якщо вид харчується їжею, наявною в необмеженій кількості, приріст чисельності виду за одиницю часу пропорційний чисельності виду.

6. Якщо вид харчується їжею, наявною в обмеженій кількості, його розмноження регулюється швидкістю споживання їжі, тобто за одиницю часу приріст пропорційний кількості з'їденої їжі.

Перелічені гіпотези дозволяють описувати складні біоценози за допомогою систем звичайних диференціальних рівнянь, у правих частинах яких є суми лінійних і білінійних членів. Такими рівняннями описуються і системи хімічних реакцій.

Дійсно, згідно з гіпотезами Вольтерра швидкість процесу природного відмирання кожного виду пропорційна чисельності виду. У хімічній кінетиці це відповідає мономолекулярній реакції розпаду деякої речовини, а в математичній моделі – негативним лінійним членам у правих частинах рівнянь. Згідно з уявленнями хімічної кінетики швидкість бімолекулярної реакції взаємодії двох речовин пропорційна імовірності зіткнення молекул цих речовин, тобто добутку їх концентрації. Так само згідно з гіпотезами Вольтерра швидкість розмноження хижака (загибелі жертв) пропорційна ймовірності зустрічей особин хижака й жертви, тобто добутку їх численностей. І в тому, і в іншому випадку в модельній системі з'являються білінійні члени в правих

частинах відповідних рівнянь. Нарешті, лінійні додатні члени в правих частинах рівнянь Вольтерра, що відповідають зростанню популяції у необмежених умовах, відповідають автокаталітичним членам хімічних реакцій. Така схожість рівнянь у хімічних і екологічних моделях дозволяє застосувати для математичного моделювання кінетики популяції ті самі методи досліджень, що і для систем хімічних реакцій. Рівняння Вольтерра стали відправною точкою для створення більшості динамічних моделей в екології аж до сьогоднішнього дня. Вольтерра вивчав співіснування видів і при ширших гіпотезах, зокрема при зміні зовнішніх умов і з урахуванням наслідків, урахування яких приводить до інтегродиференціальним рівнянням.

Сама просторова структурованість екологічних систем може бути обумовлена не початково існуючою просторовою неоднорідністю, а специфікою локальних взаємодій, складових екосистем популяцій між собою і з неживими компонентами середовища. Просторові структури, що виникають і активно підтримуються таким чином, називають екологічними дисипативними структурами.

Екологічні системи є енергетично проточними, тобто далекими від рівноваги системами. Крім того, коливальні режими в екологічних системах давно відомі як у лабораторних дослідженнях, так і з польових спостережень і непогано досліджені теоретично.

6.2 Детерміністські моделі

Детерміністські моделі – моделі, в яких значення, що передбачаються, можуть бути точно обчислені.

Однією із простих моделей зростання популяції організмів є модель, задана диференціальним рівнянням

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon x, \quad (6.1)$$

де x – густина популяції у момент t ; ε – константа. Один із прикладів екологічного процесу, який може бути представлений подібною моделлю, – це зростання бактеріальної культури до того, як почне виснажуватися середовище. Тут швидкість зростання у будь-який момент часу дорівнює постійній частці від щільності популяції у цей момент. Виражаючи цей зв'язок у такій формі, ми можемо, розв'язуючи рівняння (6.1), одержати вираз для щільності популяції у будь-який момент часу:

$$x(t) = x(t_0) \cdot e^{\varepsilon(t-t_0)}, \quad (6.2)$$

Ця проста експоненціальна модель має досить обмежене застосування, оскільки щільність популяції організмів буде у міру вичерпання поживних речовин досягати деякого стаціонарного значення. Альтернативною моделлю, що має таку властивість, є диференціальне рівняння

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon x - \delta x^2, \quad (6.3)$$

де x – щільність популяції у момент часу t , ε і δ – константи. Аналогічно, розв'язуючи диференціальне рівняння, одержимо

$$x = \frac{\varepsilon / \delta}{1 + e^{-\varepsilon \cdot (t-t_0)}}. \quad (6.4)$$

Ця логістична модель досить добре описує ріст бактерійних популяцій в умовах, коли запаси поживних речовин обмежені. Спочатку зростання популяції має експоненціальний характер, а потім, у міру вичерпання ресурсів, поступово сповільнюється, поки щільність популяції не досягне постійного рівня або асимптоти. Більше того, передбачити, що цей постійний рівень ε/δ , ми можемо за допомогою простих маніпуляцій алгебри з початковою моделлю, тобто за допомогою логічної дедукції у рамках символічної логіки математичного виразу нашої моделі. Іншими словами, виражаючи модель в абстрактних математичних термінах, ми відразу ж набуваємо можливості отримання з моделі подальшої інформації. Обидві моделі є детерміністськими в тому сенсі, що при заданих значеннях констант щільність популяції у даний момент часу t завжди одна і та сама: величина x однозначно визначається значенням t .

Член $-\delta x^2$ пропорційний кількості зустрічей між особинами, враховує «самоотруєння» популяції, що пояснюється багатьма причинами (конкуренція усередині популяції, нестача місця і їжі, передача інфекції тощо). Коефіцієнт δ називається коефіцієнтом внутрішньовидової конкуренції. Система має два стаціонарних стани, один з яких $\bar{x} = \frac{\varepsilon}{\delta} = K$ відповідає стійкому стаціонарному стану з максимально можливою в даних умовах чисельністю популяції. Величину K іноді називають «ємністю середовища». Для багатьох популяцій формула (5.3) добре описує експериментальні дані.

У розглянутих моделях збільшення чисельності (біомаси) популяції представлений членом εx . Строго кажучи, це відповідає лише тим популяціям, розмноження яких відбувається шляхом самозапліднення (мікроорганізми). Якщо ж в основі розмноження лежить схрещування, що припускає зустрічі між особинами різної статі одного й того самого виду, то приріст буде тим вищий, чим більша кількість зустрічей між особинами, а остання пропорційна другому ступеню x . Таким чином, для різностатевої популяції в умовах необмежених ресурсів можна записати

$$\frac{dx}{dt} = rx^2. \quad (6.5)$$

Рівняння (6.5) добре описує той факт, що при низькій щільності популяцій швидкість розмноження різко спадає, оскільки імовірність зустрічі двох особин різної статі зменшується при зниженні щільності популяції пропорційно квадрату щільності. Проте при великій щільності популяцій швидкість розмноження лімітує вже не число зустрічей особин протилежної статі, а число самок у популяції. Формула, що враховує ці обидва ефекти, має вигляд

$$\frac{dx}{dt} = a \frac{\beta x^2}{\beta + \tau x}. \quad (6.6)$$

Графіки чисельності залежно від часу і швидкості розмноження залежно від чисельності для рівняння (6.6) наведені на рис. 6.1 а, б.

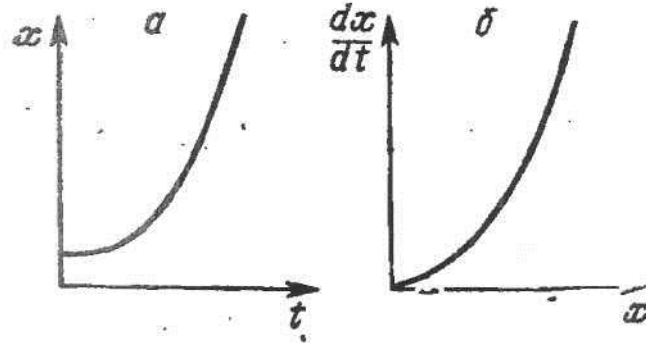


Рисунок 6.1 – Залежність чисельності популяції від часу (а) та швидкості зростання від чисельності (б) відповідно до формули (5.6)

Насправді щільність популяції не повинна зменшуватися нижче за деяку критичну величину. При падінні густини популяції нижче критичної середній час, упродовж якого може відбутися запліднення, стає більшим за час життя окремої особини, точніше за час, упродовж якого особина здатна до розмноження. У цьому випадку популяція вимирає.

Цей ефект враховують введенням у формулу (6.6) члена, що описує смертність і пропорційний чисельності. Залежність швидкості зростання популяції від її чисельності при цьому набере вигляду

$$\frac{dx}{dt} = a \frac{\beta x^2}{\beta + \tau x} - dx. \quad (6.7)$$

Це рівняння має два стаціонарні розв'язки: $\bar{x} = 0$ та $\bar{x} = \frac{d\beta}{a\beta - d\tau} = l$.

Відповідні графіки $x(t)$ і $dx/dt(x)$ подані на рис. 6.2 а, б. Із графіка рис. 6.2 б видно, що розв'язок $\bar{x} = 0$ – стійкий, а $\bar{x} = l$ – нестійкий. При початкових значеннях $x_{\text{поч}} < l$ популяція вироджується – $x \rightarrow 0$, причому тим швидше, чим менше $x_{\text{поч}}$. Криві $x(t)$ при різних $x_{\text{поч}}$ подані на рис. 6.2 а. При $x_{\text{поч}} > l$ відповідно до рівняння (6.7) популяція необмежено розмножується.

Величина нижньої критичної щільності може бути різною для різних видів. Спостереження біологів показали, що це лише одна пара особин на тисячу квадратних кілометрів у випадку ондатр і сотні тисяч особин – для американського мандруючого голуба. Заздалегідь важко було передбачити, що такий численний вид уже перейшов через критичну межу своєї чисельності і приречений на виродження.

Для блакитних китів критична межа загальної чисельності виявилася такою, що дорівнює десяткам–сотням. Хижацьке винищування цих гігантських тварин привело до того, що їх залишилося досить мало у Світовому

океані. І хоча окремі особини ще зустрічаються, а полювання на них заборонено, надій на відновлення популяції блакитних китів практично немає, оскільки їх щільність знизилася нижче від граничної.

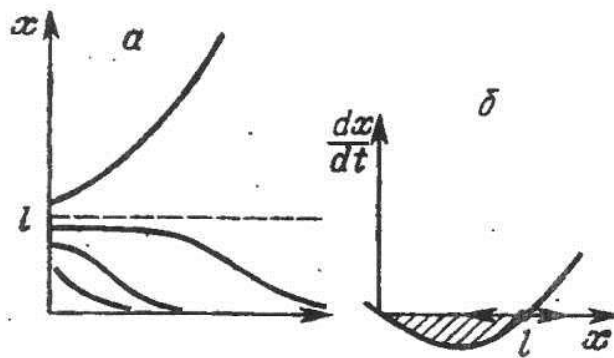


Рисунок 6.2 – Залежність чисельності популяції від часу (а) та швидкості зростання від чисельності (б) відповідно до формули (6.7). Штрихуванням позначена область виродження популяції.

Найбільш загальна формула, що враховує як нижню межу чисельності, так і внутрішньовидову конкуренцію, має вигляд

$$\frac{dx}{dt} = a \frac{\beta x^2}{\beta + \tau x} - dx - \delta x^2. \quad (6.8)$$

Залежності чисельності від часу і швидкості приросту від чисельності наведені на рис. 6.3 а, б. $\bar{x} = 0$, $\bar{x} = k$ – стійкі стаціонарні стани, $\bar{x} = l$ – нестійкий, що розділяє області тяжіння стійких станів рівноваги. Величини l та k різні для різних популяцій і можуть бути визначені лише із спостережень і експериментів. Зрозуміло, що їх визначення становить величезні труднощі.

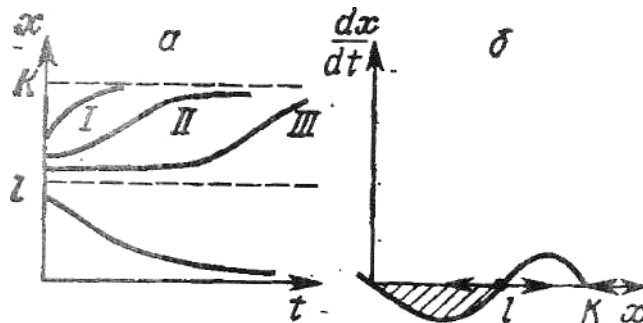


Рисунок 6.3 – Залежність чисельності популяції від часу (а) і швидкості зростання від чисельності (б) відповідно до формули (6.8). Штрихуванням позначена область виродження популяції

При будь-яких промислах особливий інтерес становить величина нижньої критичної межі, під час переходу через яку популяція вже не зможе відновитися. Модель дозволяє дати якийсь методичний рецепт визначення не найкритичнішої межі, але ступені близькості до неї чисельності виду. Звернемося до рис. 6.3 а. Нехай чисельність виду у початковий момент часу була близька до максимально можливої. При $t = 0$ відбувається одноразове

вибивання популяції. Якщо чисельність залишилася значно більшою за критичну, відновлення відбувається спочатку швидко, а потім із монотонним уповільненням (крива I). Якщо ж популяція, що залишилася, близька до критичної точки, відновлення відбувається спочатку дуже поволі, чисельність популяції надовго «зупиняється» поблизу критичної точки, а потім вже, «набравши сили», швидше наближається до стаціонарного рівня (крива III). Крива II являє собою проміжний випадок. Таким чином, спостереження реакції системи на збурення може бути способом прогнозу наближення її до небезпечних меж.

Вплив запізнювання

До цього часу ми вважали, що процеси розмноження і загибелі відбуваються одночасно, і популяція миттєво реагує на будь-яку зміну зовнішніх умов. Проте в реальних екосистемах це не так. Насправді завжди є деяке запізнювання в регуляції чисельності, яке може бути викликане деякими причинами.

По-перше, розвиток будь-якої дорослої особини із заплідненого яйця вимагає певного часу T . Тому якщо яка-небудь зміна в навколишньому середовищі, наприклад, збільшення ресурсів, викликатиме раптове підвищення продуктивності дорослих особин, то відповідна зміна чисельності дорослих особин відбудеться лише після часу T . Це означає, що рівняння

$$\frac{dx}{dt} = f(x),$$

де x – чисельність дорослих особин, його необхідно замінити на рівняння

$$\frac{dx}{dt} = f(x_{t-T}), \quad (6.9)$$

де x_{t-T} – чисельність статевозрілих особин у момент часу $t-T$.

По-друге, багато видів розмножуються лише в певну пору року. Навіть у таких популяціях, особини яких здатні розмножуватися декілька років поспіль, що є звичайним для ссавців і птахів, а також багаторічних рослин, наявність сезонів розмноження вносить деяке запізнювання в процеси регуляції чисельності. Проте якщо життєвий цикл даного виду продовжується декілька років, і його особини щорічно народжують відносно невелике число дітей, то запізнювання на один рік, обумовлене дискретністю сезонів розмноження, не можна вважати за довгий порівняно з характерним часом динаміки цього виду, і ефекти, викликані запізнюванням, будуть незначними. Якщо ж дорослі особини, що розмножуються в даному році, рідко або ніколи не доживають до того, щоб розмножуватися наступного року, як, наприклад, у однорічних рослин, дрібних гризунів, багатьох комах, це робить істотний вплив на

динаміку їх чисельності. У цьому випадку рівняння $\frac{dx}{dt} = f(x)$ необхідно

замінити на рівняння $x_{n+1} = F(x_n)$, де x_n – чисельність популяції в n -му році.

Нарешті, в реальних популяціях інтенсивність розмноження і загибелі різна в різних вікових групах. Наприклад, у комах відкладають яйця дорослі

особини, а конкуренція найбільш виражена на личинковій стадії. Такі процеси, як отруєння середовища продуктами метаболізму, канібалізм тощо, найбільше впливають на ранні вікові стадії, а їх інтенсивність залежить від чисельності дорослих особин, тобто негативний вплив на коефіцієнт природного приросту роблять особини попереднього покоління. З урахуванням цих явищ логістичне рівняння (6.3) переписується у вигляді

$$\frac{dx}{dt} = x(\varepsilon - \delta x_{t-T}). \quad (6.10)$$

Запізнювання в регуляції системи може привести до виникнення коливань змінних. Це явище добре відоме в техніці: якщо система регулюється петлею зворотного зв'язку, в якому відбувається істотна затримка, то мажуть виникати коливання. В економіці буми і спади в числі інших причин виникають у результаті затримки між тим моментом, коли попит на який-небудь товар перевищує пропозицію, і моментом, коли виробник цього товару може забезпечити виробничі потужності для задоволення цього попиту. Приклади можна продовжити. У цілому, якщо тривалість затримки в петлі зворотного зв'язку перевищує власний характерний час системи, то виникають коливання з великою амплітудою. У деяких системах, наприклад в системі, що описується рівнянням (6.10), при значному перевищенні часу запізнювання T над власним часом системи $1/\varepsilon$ можуть виникнути наростаючі коливання, хоча рівняння без запізнювання (6.3) дає стійкий неколивальний стан рівноваги.

Дискретні моделі популяцій

Ми розглядали розвиток популяції в неперервному часі, при цьому чисельність популяції була неперервною функцією – розв'язком диференціального рівняння.

Це правомірно лише тоді, коли чисельність популяції можна апроксимувати безперервною кривою, а це можливо лише у випадках, коли популяція досить численна. Крім того, форма звичайних диференціальних рівнянь припускає, що зміна чисельності у кожен момент часу t залежить лише від миттєвих її значень у даний момент. Це припущення може бути виправдане лише при невеликій кількості спеціальних випадків, у більшості реальних популяцій дія регуляції чисельності відбувається із запізнюванням. Коли чисельність моделюється безперервною функцією $f(x)$, ефект запізнювання можна описати в рамках диференціальних рівнянь з аргументом, що запізнюється, як ми це робили раніше.

Реально чисельність є дискретною величиною, яка набуває деяких значень у фіксовані моменти часу. Формалізм, що враховує дискретність чисельності популяції, більше відповідає експериментальним даним за переписом реальних популяцій (лабораторних або природних), який здійснюється в дискретні моменти часу. Якщо при цьому припустити, що чисельність N залежить від чисельності в деякі попередні моменти часу, то для опису динаміки чисельності популяцій можна застосовувати апарат різницевих рівнянь.

Якщо зовнішні і внутрішні чинники, що визначають розвиток популяції, залишаються з часом незмінними, то чисельність популяції у момент часу t може бути описана за допомогою різницевого рівняння у вигляді

$$N_t = F(N_{t-1}, N_{t-2}, \dots, N_{t-k}).$$

Тут функція F залежить від чисельності популяції k у попередні моменти часу.

Особливо простий вигляд має різницеве рівняння у разі, коли чисельність кожного наступного покоління в популяції N_{t+1} залежить лише від попереднього покоління N_t . Це справедливо для багатьох видів комах. Їх дорослі особини живуть нетривалий час, достатній для відкладання яєць, і до моменту появи на світ нового покоління (на стадії дорослої особини) попереднє покоління припиняє своє існування. Для таких популяцій справедливе положення про неперекривання поколінь, і рівняння (6.6) може бути записане у вигляді

$$N_{t+1} = F(N_t). \quad (6.11)$$

Якщо покоління популяції значною мірою перекриваються, припущення про залежність N_{t+1} лише від N_t уже несправедливе. В цьому випадку популяцію можна розділити на дискретні вікові класи (або стадії розвитку), чисельності яких залежать від чисельностей попередніх (а в окремих випадках й інших) вікових класів. Завдання опису динаміки вікових класів таких популяцій приводить до матричних (також дискретних) моделей. Розглянемо приклад моделі популяції із поколіннями, що не перекриваються, – різницевий аналог логістичного рівняння.

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(1 - \frac{N}{k}\right). \quad (6.12)$$

Замінивши dN/dt на $\Delta N/\Delta t$, де $\Delta N = N_{t+1} - N_t$, а $\Delta t = 1$, отримаємо

$$N_{t+1} = N_t[1+r(1-N_t/k)]. \quad (6.13)$$

Параметри r , k мають той самий зміст, що і в логістичному рівнянні. Проте якщо безперервне рівняння (6.12) не дає від'ємних розв'язків, у рівнянні (6.13) N_{t+1} може стати від'ємним. Від такої «екологічної некоректності» позбавлене рівняння

$$N_{t+1} = N_t \exp[r(1-N_t/k)]$$

яке також можна вважати різницеvim аналогом логістичного рівняння зростання. Поведінка популяції, що описується таким рівнянням при різних значеннях параметрів, може бути досить різноманітною. Спектр поведінки траєкторій містить стійку рівновагу, стійкі цикли, а також хаотичний режим з вирішальним значенням початкових умов. Мабуть, успішне застосування різницевих рівнянь до моделювання реальних популяцій і пояснюється цим різноманіттям динамічної поведінки модельних траєкторій.

6.3 Стохастичні моделі

Стохастичні моделі – моделі, в яких значення, що передбачаються, залежать від розподілу імовірності.

Моделі, що задаються диференціальними рівняннями, були розроблені спочатку в додатках математики до фізики і, природно, що у пошуках моделей для екології нам перш за все варто подивитися, чи не можна використовувати те, що було розвинене в інших областях.

Ми можемо, проте, будувати наші моделі абсолютно іншим способом, поклавши в їх основу мінливість живих організмів, тоді це будуть імовірнісні або стохастичні моделі. У подібних моделях використовується зовсім інша область математики, що розвинулася пізніше, ніж диференціальне числення і диференціальні рівняння. Один простий приклад такої моделі, що відповідає детерміністській моделі експоненціального зростання, задається рівнянням

$$\frac{dY}{dt} = [a + b(t)] \cdot y, \quad (6.14)$$

де y – щільність популяції у момент часу t ;

a – константа;

$b(t)$ – випадкова змінна із нульовим середнім.

Це означає, що величина $b(t)$ змінюється, набираючи значення з деякого випадкового розподілу так, що між флуктуаціями в послідовні моменти немає ніякої кореляції. Легко бачити, що якщо основою для імітації є стохастична модель, то результати імітації розрізнятимуться, навіть якщо константи і початкові умови однакові. Цю варіабельність забезпечують імовірнісні елементи моделі; призначення таких моделей саме в тому і полягає, щоб відобразити мінливість, характерну для живих організмів і екологічних систем. Що ж до постановки реального експерименту, то, як правило, буває необхідно провести цілу серію імітацій, для того, щоб визначити, як система реагує на різні дії.

За допомогою розподілу імовірності здійснюється підгонка моделей, тобто вибір таких значень параметрів, при яких передбачені величини досить близькі до результатів спостережень. Оцінка таких параметрів вимагає застосування статистичних методів, які спираються на теорію імовірності. І тут необхідно розрізняти *популяцію* і *вибірку*. Під популяцією розуміється така безліч індивідів, властивості яких ми хочемо досліджувати. Ці індивіди можуть бути організмами, екосистемами або навіть будь-якою характеристикою організмів або екосистем.

Вибірка – це будь-яка кінцева безліч індивідів, взята з популяції. При цьому вважається, що вибірка робиться таким чином, що обчислені за нею величини є показовими (репрезентативними) для всієї популяції і тому можуть розглядатися як оцінки відповідних величин для цієї популяції. Методи, якими проводяться вибірки, ми розглядати не будемо.

Величини, що характеризують популяцію в цілому, визначимо як параметри або як константи, або коефіцієнти в рівняннях моделі. Необхідно

весь час пам'ятати про різницю між параметрами і вибірковими оцінками.

Рівняння, що задають модель, міститимуть два типи змінних. Принаймні, одна із змінних буде залежною в тому сенсі, що вона змінюється при зміні інших змінних. У розглянутих вище прикладах такою величиною є щільність популяції u . Інші змінні вважаються незалежними, наприклад t .

Визначимо підгонку моделей як вибір таких значень параметрів, при яких передбачені значення величин, достатньо близькі до спостережуваних. Насправді, імовірність того, що параметри відповідають даним спостережень, ми розглядатимемо як математичну функцію цих параметрів і визначимо її як *функцію правдоподібності*. Ця функція є мірою відповідності між моделлю і даними, а ті значення параметрів, для яких правдоподібність максимальна, називаються *оцінками максимальної правдоподібності*.

Крім того, наші моделі поділяються ще на дві категорії, а саме: аналітичні й імітаційні.

Аналітичні моделі – це ті, в яких для визначення значень величин, що передбачаються, утворюються вирази в явному вигляді, сюди належать регресійні і багатовимірні моделі, моделі планування експерименту і стандартні теоретичні статистичні розподіли.

Імітаційні моделі – це ті, які можуть бути описані за допомогою набору певних математичних операцій, таких, як розв'язання диференціальних рівнянь, повторне застосування перехідної матриці або використання випадкових чисел, різні регресії. Перевага імітаційних моделей полягає в тому, що їх легше побудувати не математику, але підігнати їх під дані спостережень звичайно важче, ніж аналітичні моделі.

Існують два аспекти, за якими детерміністська модель не може бути точним віддзеркаленням реальних екологічних систем. По-перше, вона не враховує імовірнісного характеру процесів розмноження і загибелі; по-друге, вона не враховує випадкових коливань, що відбуваються у середовищі в часі і які приводять до випадкових флуктуацій параметрів моделей. Урахування цих чинників приводить до істотного ускладнення математичного апарату. Якщо детерміністська модель свідчить про стійку рівновагу, стохастична модель – про тривале виживання. Якщо детерміністська модель передбачає періодичне зниження чисельності одного або декількох видів, стохастична модель передбачає деяку позитивну імовірність вимирання цих видів. Нарешті, якщо детерміністська модель не виявляє рівноваги або рівновага нестійка, стохастична модель передбачить високу імовірність вимирання.

Як простий приклад розглянемо імовірнісний опис процесу зростання популяції з урахуванням лише розмноження. При детерміністському підході ми вважали, що існує певна швидкість розмноження, тобто така, що чисельність популяції n за час dt збільшується на $dn = \epsilon ndt$. Це приводить до експоненціального закону:

$$n = \exp(\epsilon t),$$

де a – чисельність популяції у початковий момент часу. Підійдемо до процесу розмноження з імовірнісної точки зору. Нехай імовірність появи одного

нащадка у даної особини в інтервалі часу dt дорівнює εdt . Тоді імовірність появи однієї нової особини у цілій популяції за час dt дорівнює εndt . Позначимо через $p_n(t)$ імовірність того, що у момент t у популяції є рівно n особин. Припустимо, що в кожен момент часу може відбутися лише одна подія, а саме за час dt чисельність популяції може або збільшитися на 1, або залишитися незмінною. Розмір популяції у момент t можна пов'язати із розміром популяції у момент $t+dt$ за допомогою таких міркувань. Якщо число особин у момент $t+dt$ дорівнює n , це означає, що або у момент t їх було $n-1$ і за час dt з'явилася ще одна, або в момент t було n особин і за час dt це число не змінилося. Складаючи цю ймовірність, отримаємо співвідношення

$$p_n(t+dt) = p_{n-1}(t)\varepsilon(n-1)dt + p_n(t)(1-\varepsilon ndt), \quad (6.15)$$

звідси шляхом перестановки членів і ділення на dt отримаємо

$$\frac{p_n(t+dt) - p_n(t)}{dt} = p_{n-1}(t)\varepsilon(n-1) - p_n(t)\varepsilon n,$$

або

$$\frac{dp_n(t)}{dt} = p_{n-1}(t)\varepsilon(n-1) - p_n(t)\varepsilon n. \quad (6.16)$$

Це рівняння справедливе при $n > a$ (a – початкова чисельність популяції). Відповідне рівняння для $n = a$ має вигляд

$$\frac{dp_a(t)}{dt} = -p_a(t)\varepsilon a, \quad (6.17)$$

оскільки у випадку, коли процес починається при значенні $n = a$, відсутній член, що містить p_{n-1} .

Системи диференціально-різницевих рівнянь, аналогічних рівнянням (6.16), які можна розглядати як динамічні рівняння для випадкового процесу, як правило, буває важко розв'язати в загальному вигляді. Проте в нашому прикладі це задоволено просто. Проінтегруємо рівняння (6.17) з урахуванням тієї обставини, що $p_a(0) = 1$. Це дає

$$p_a(t) = e^{-a\varepsilon t}.$$

Потім підставляємо $e^{-a\varepsilon t}$ в рівняння для $n = a+1$, інтегруємо, використовуючи початкову умову $p_{a+1}(0) = 0$, і знаходимо

$$p_{a+1}(t) = a\varepsilon e^{-(a+1)\varepsilon t} (e^{\varepsilon t} - 1). \quad (6.18)$$

У свою чергу, цей результат підставляємо в наступне рівняння, і весь процес повторюється. Після обчислення декількох послідовних членів можна записати результат у загальному вигляді

$$p_n(t) = c_{n-1}^{a-1} e^{-n\varepsilon t} (e^{\varepsilon t} - 1)^{n-a}. \quad (6.19)$$

Вираз (5.19) визначає розподіл імовірності для будь-якого моменту часу,

замінююче при імовірнісному описі те єдине значення

$$n = ae^{\varepsilon t},$$

яке розглядалося в детерміністичній моделі.

Вираз (6.19) є окремим випадком біноміального розподілу. Його математичне сподівання та дисперсія записуються так:

$$m(t) = ae^{\varepsilon t}, \quad (6.20)$$

$$\sigma^2(t) = ae^{2\varepsilon t} (1 - e^{-\varepsilon t}). \quad (6.21)$$

Легко відмітити, що математичне сподівання (5.20) збігається з детерміністичним середнім (6.1). Таким чином, при великому числі особин детерміністичний опис задовільно замінюватиме будь-яку стохастичну модель, в якій основна увага приділяється знаходженню середніх значень. Коли число особин мале, наприклад, початковий розмір популяції становить лише декілька одиниць, дисперсія, тобто середнє квадратичне відхилення чисельності окремо узятій популяції від математичного сподівання (6.21), може бути доволі значною. При цьому при $t \rightarrow \infty$ коефіцієнт варіації величини n , що дорівнює σ/m , прагне до $(\sqrt{a})^{-1}$.

При розгляді якої-небудь певної популяції ми спостерігатимемо тільки одне числове значення. Графік зростання виявлятиме значні коливання. Виникає питання: яким чином ці коливання пов'язані з розподілом імовірності. Зміст виразу (6.19) полягає в тому, що якщо є деяке велике число популяцій і в початковий момент часу $t = 0$ чисельність кожної із них дорівнює a , частка цих популяцій, що мають у момент t чисельність a , теоретично дорівнює $p_n(t)$ з математичним сподіванням $m(t)$ і дисперсією $\sigma^2(t)$. Крива зростання будь-якої окремо взятої популяції може значно відхилитися від відповідної кривої математичного сподівання, тому остання разом із дисперсією служить показником випадкової флуктуаційної мінливості, характерної для даного процесу.

Розглянемо тепер складніший процес – розмноження і загибель особин у популяції. Як і раніше, вважаємо, що імовірність появи одного нащадка у однієї особини в інтервалі часу Δt дорівнює $\varepsilon \Delta t$, тому для всієї популяції імовірність збільшення її чисельності на одиницю дорівнює $\varepsilon n \Delta t$. Припустимо також, що імовірність загибелі однієї особини становить $\mu \Delta t$. Імовірність того, що розмір популяції у момент $t + \Delta t$ становить n особин, буде в такому випадку являти собою суму імовірності трьох подій:

- 1) у момент часу t було n особин, за час dt це число не змінилося;
- 2) у момент t було $n-1$ особина, за час dt їх кількість збільшилася на одиницю;
- 3) у момент часу t було $n+1$ особина, за час dt їх кількість зменшилася на одиницю. Вираз для $p_n(t+dt)$ набирає вигляду

$$p_n(t+dt) = p_{n-1}(t)\varepsilon(n-1)dt + p_n(t)(1-\varepsilon n dt - \mu ndt) + p_{n+1}(t)\varepsilon(n+1)dt, \quad n=1,2. \quad (6.22)$$

Ця система вже не розв'язується простим інтегруванням, проте

застосування методу виробничої функції (Бейлі, 1970) дозволяє знайти загальний розв'язок:

$$p_n(t) = \sum_{j=0}^{\min(a,n)} C_a^j C_{a+n-j-1}^{a-1} g^{a-j} h^{n-j} (1-g-h)^j, \quad n \geq 1, \quad (6.23)$$

де

$$g = \frac{\mu(e^{(\varepsilon-\mu)t} - 1)}{\varepsilon e^{(\varepsilon-\mu)t} - \mu}, \quad h = \frac{\varepsilon g}{\mu}.$$

Таким чином, навіть у разі простого стохастичного процесу розмноження й загибелі загальний вираз для $p_n(t)$ виявляється досить складним і виразити його в явному вигляді, як правило, не вдається.

Математичне сподівання і дисперсія розподілу (5.23) мають такий вигляд:

$$m(t) = a e^{(\varepsilon-\mu)t}, \quad (6.24)$$

$$\sigma^2(t) = \frac{a(\varepsilon+\mu)}{\varepsilon-\mu} e^{(\varepsilon-\mu)t} (e^{(\varepsilon-\mu)t} - 1).$$

Відмітимо, що, як і у разі простого процесу розмноження, математичне сподівання збігається із значенням чисельності в детерміністичній моделі, а вираз для дисперсії свідчить про те, що має місце значна флуктуаційна мінливість.

Розглянемо випадок, коли розмноження й загибель врівноважують одне одного, тобто коли $\varepsilon = \mu$. Математичне сподівання і дисперсію знаходимо з формул (6.24), вважаючи, що $\mu \rightarrow \varepsilon$, і використовуємо в другому виразі правило Лопіталя для розкриття невизначеності вигляду $0/0$, отримуємо:

$$m(t) = a,$$

$$\sigma^2(t) = 2at.$$

Перший вираз – це очевидний результат, а саме середній розмір популяції зберігає своє початкове значення. Другий вираз показує, що дисперсія розміру популяції зростає пропорційно тривалості інтервалу часу, упродовж якого відбувається процес.

Як бачимо з формули (6.1), детерміністська модель у тих випадках, коли швидкість розмноження перевищує швидкість загибелі, передбачає стійке експоненціальне збільшення розміру популяції. Проте в імовірнісній моделі враховується, що завжди існує певна імовірність такого великого числа випадків загибелі, при якому популяція повністю вимирає. Таким чином, імовірність вимирання є важливою характеристикою імовірнісної моделі. Позначимо через $p_0(t)$ імовірність того, що у момент часу t не залишиться жодної живої особини. Прирівнявши n до нуля, з рівнянь (5.23) можна знайти вираз для цієї імовірності в явному вигляді

$$p_0(t) = \left\{ \frac{\varepsilon [e^{(\varepsilon-\mu)t} - 1]}{\varepsilon e^{(\varepsilon-\mu)t} - \mu} \right\}^a, \quad \varepsilon \neq \mu. \quad (6.25)$$

В окремому випадку, коли $\varepsilon = \mu$, цей вираз набере вигляду

$$p_0(t) = \left\{ \frac{\varepsilon t}{\varepsilon t + 1} \right\}^a. \quad (6.26)$$

Імовірність того, що рано чи пізно відбудеться вимирання популяції, можна знайти, вважаючи, що $t \rightarrow \infty$. У межах при $t \rightarrow \infty$ вирази (6.25) та (6.26) для випадків $\varepsilon < \mu$, $\varepsilon = \mu$, $\varepsilon > \mu$ можна записати у такому вигляді:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_0(t) = 1, \quad \varepsilon \leq \mu,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_0(t) = \left(\frac{\mu}{\varepsilon} \right)^a, \quad \varepsilon > \mu$$

Отже, якщо швидкість розмноження не перевищує швидкості загибелі, вимирання рано чи пізно обов'язково відбудеться. Якщо ж швидкість розмноження вища від швидкості загибелі, то імовірність вимирання становить $(\mu/\varepsilon)^a$.

Цікаво, що у тому випадку, коли $\varepsilon = \mu$, математичне сподівання чисельності має постійну величину, імовірність повного вимирання все ж таки дорівнює одиниці. Насправді в природі відбувається таке. Декілька популяцій збільшуються до дуже великих розмірів, тоді як більшість популяцій вимирають, і в результаті зберігається деяке постійне середнє. Вивчаючи ці найбільш численні в ценозі популяції, ми часто можемо обмежитися їх детерміністською моделлю.

Урахування випадкових змін середовища

Флуктуації умов середовища можуть приводити і до зміни характеру взаємодій між окремими особинами, тобто до випадкової зміни параметрів моделі. У разі моделі експоненціального зростання – це випадкові зміни коефіцієнта природного приросту, урахування яких приводить до рівняння

$$\frac{dx}{dt} = (\varepsilon + y(t))x, \quad (6.27)$$

де $y(t)$ – випадкова величина із середнім значенням, що дорівнює нулю. Вважатимемо, що $y(t)$ – це «білий шум», тобто при кожному t випадкові величини $y(t)$ мають одні й ті самі розподіли і між флуктуаціями в послідовні моменти часу немає кореляції. Припущення про відсутність серійної кореляції означає, що флуктуації корелюють між собою лише впродовж періодів, які є невеликими порівняно із характерним часом системи (y нашої моделі $1/\varepsilon$). Імовірнісний розподіл величини має середнє значення

$$m(t) = ae^{\varepsilon t},$$

що дорівнює відповідному значенню y за відсутності флуктуації факторів середовища. Дисперсія Σ задається виразом

$$\Sigma(x) = a^2 e^{2\epsilon t} (e^{\sigma^2 t} - 1),$$

де σ^2 – дисперсія у (t). Звідси

$$\frac{\sigma}{m} = (e^{\sigma^2 t} - 1)^{0,5}.$$

Таким чином, із часом коливання чисельності популяції стають різкішими; це відображає той факт, що детерміністична система (6.1) не має стаціонарного стану. Можна показати, що при $\epsilon < \sigma^2$ імовірність виродження з часом збільшується, наближаючись до одиниці, – популяція імовірно нестійка, тобто достатньо тривала дія збурень із великою імовірністю може призвести до її загибелі. При $\epsilon > \sigma^2$ імовірність виродження зменшується і при $t \rightarrow \infty$ наближається до нуля – популяція в цьому сенсі стійка.

З отриманого результату випливають жорсткіші обмеження на коефіцієнт природного приросту, ніж із детерміністської моделі. Насправді в останній для невинродження популяції досить, щоб середнє значення коефіцієнта ϵ було додатним, тоді як у стохастичній моделі цього недостатньо, потрібно, щоб $\epsilon > \sigma^2 > 0$.

Урахування впливу випадкових збурень на логістичне зростання популяції, а також розгляд більш загальних випадків показують, що наслідком урахування випадкових чинників у математичних моделях теорії популяцій (і в теорії екологічних співтовариствах теж) є жорсткіші вимоги до параметрів системи, які забезпечують її стійкість. Область стійкості, отримана за яким-небудь критерієм на підставі стохастичної моделі, як правило, буває вужчою від аналогічної області для детерміністської моделі.

У цілому видно, що детерміністська модель набагато простіша і наочніша, але не дає відомостей про те, наскільки крива зростання тієї або іншої популяції під дією випадкових величин може насправді відхилитися від теоретичної кривої, що задається цією моделлю. Детерміністська модель також не дозволяє оцінити імовірність випадкового виродження популяції. Проте оскільки при зростанні чисельності випадкові величини, що характеризують чисельності популяцій, збігаються за імовірністю із своїми середніми значеннями, та поведінка популяцій із досить великою чисельністю задовільно описується динамікою середніх величин. Тому для угруповань, чисельність яких велика, застосовується детерміністичний опис.

6.4 Екологічні тригери, автоколивання, граничні цикли

Важливою особливістю екологічних систем є їх здатність переключатися з одного режиму функціонування в іншій, що відповідає декільком стійким стаціонарним станам системи. На фазовій площині така система має дві і більше стійкі особливі точки. Області впливу стійких особливих точок розділяються сепаратрисою, яка повинна проходити через нестійку особливу точку типу сідло.

На рис. 6.4 наведений фазовий портрет такої системи із двома стійкими особливими точками. Нагадаємо, що кількість стаціонарних станів у

системі визначається числом точок перетину головних ізоклін вертикальних і горизонтальних дотичних, зображених на рис.6.4 жирними лініями. Точка перетину головних ізоклін b є сідлом, а точки перетину головних ізоклін a і c , що лежать по обидва боки від сепаратриси сідла (пунктирна лінія) суть стійкі вузли. Система, що характеризується подібним фазовим портретом, тобто що має два (декілька) стійкі стаціонарні стани, між якими можливі переходи, називається тригерною.

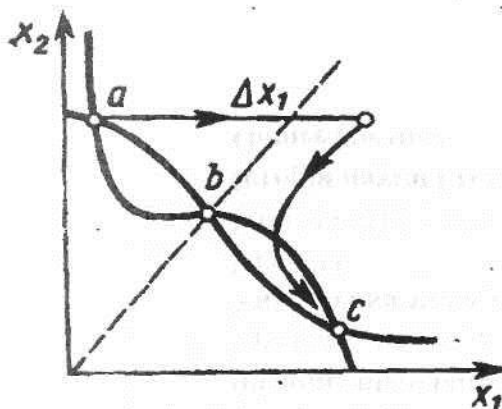


Рисунок 6.4 – Фазовий портрет тригерної системи

На рис. 6.4 бачимо, що якщо початкове положення відображальної точки розміщене лівіше за сепаратрису сідла (пунктирна лінія), система знаходиться в області впливу особливої точки a і прагне до цього стійкого стаціонарного стану. З точок, що лежать правіше сепаратриси, система рухатиметься до стійкої особливої точки c .

Припустимо, що наша система функціонує у стійкому режимі a і необхідно перевести її в інший стійкий режим c . Можна зробити це двома способами. Ми можемо так змінити за рахунок зовнішньої дії значення змінних x і y , наприклад, різко збільшивши x , тому це переведе систему в якусь точку c' , що знаходиться праворуч від сепаратриси сідла в області тяжіння стійкого вузла c . Після цього система вже сама по фазовій траєкторії перейде в точку c і опиниться в необхідному режимі. Це так званий силовий спосіб переключення тригера, який називається також специфічним. Дійсно, для такого переключення в систему необхідно додати деяку кількість певної речовини (у даному випадку речовини x).

Іншим, тоншим, буде спосіб параметричного неспецифічного переключення. При цьому безпосередній дії піддаються не змінні, а параметри системи, що може бути досягнуте різними способами: наприклад, зміною температури, швидкості надходження субстрату.

Процес параметричного переключення показаний на рис. 6.5 (а, б, в, г). Суть його полягає у використанні характерної залежності фазового портрета від деякого керуючого параметра.

Припустимо, що для нашої системи із двома змінними і фазовим портретом (рис. 6.5 а) також є керуючий параметр a , зміна якого може викликати відповідну деформацію фазового портрета. Тоді перехід $a \rightarrow c$ має

такий вигляд (рис.6.5, а, б, в, г). При зміні керуючого параметра **a** фазовий портрет почне змінюватися так, що точки перетину головних ізоклін **a** і **b** зближатимуться одна з одною (рис. 6.5 б) злившись у кінці в одну складну особливу точку сідло–вузол (рис. 6.5 в). Потім відбудеться така зміна розташування ізоклін, коли на фазовій площині залишиться тільки одна точка їх перетину **c** – стійкий вузол, до якого і сходяться всі траєкторії фазової площини. Очевидно, що наша система, що знаходиться на початку процесу переключення в точці **a** із відповідними координатами x_0, y_0 на фазовій площині, виявиться тепер через зміну фазового портрета (рис. 6.5 г) в області тяжіння стійкого вузла **c**, куди вона тепер мимоволі і перейде. Відмітимо, що при зміні фазового портрета самі координати особливої точки повинні також дещо змінитися, оскільки вони залежать від значень параметрів системи. Повертаючись потім до колишніх значень керуючого параметра, ми відновимо початковий фазовий портрет системи, але вона вже працюватиме в необхідному режимі **c**.

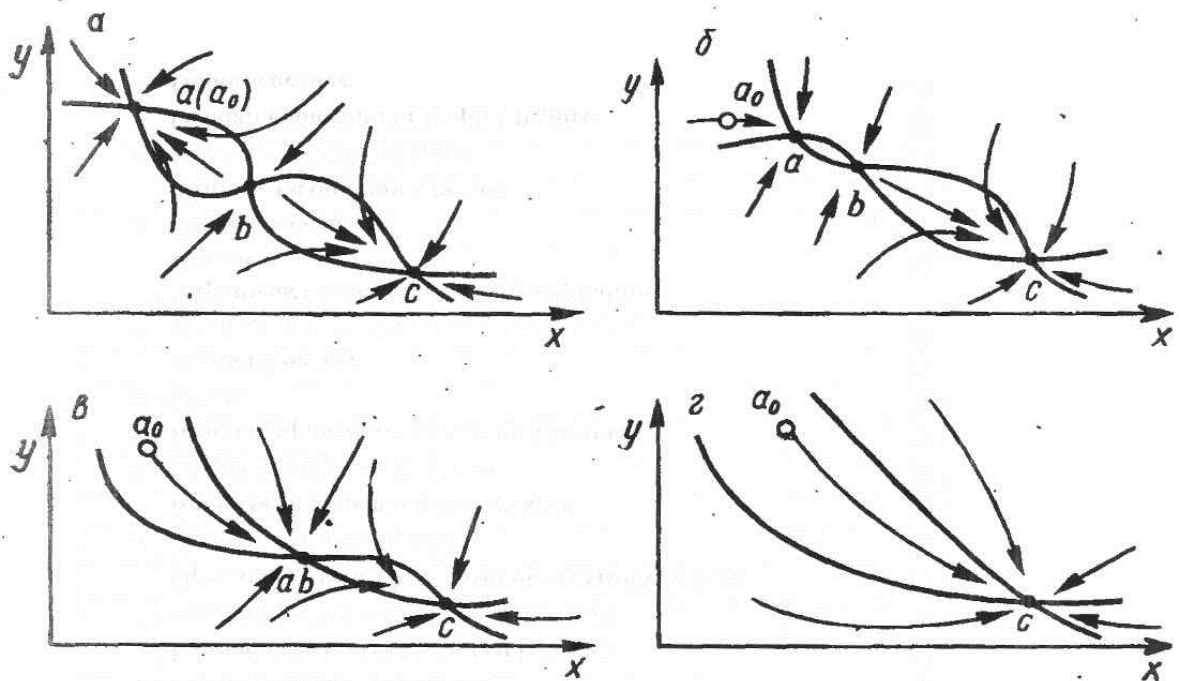


Рисунок 6.5 – Процес параметричного переключення тригерної системи на фазовій площині (а, б, в, г)

У попередніх розділах ми розглядали загальні методи дослідження систем диференціальних рівнянь, що описують моделі реальних процесів. Було показано, що у великій кількості випадків можна звести завдання дослідження стаціонарних станів системи довільного вигляду

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= P(x, y), \\ \frac{dy}{dt} &= Q(x, y), \end{aligned} \tag{6.28}$$

до дослідження особливих точок лінеаризованої системи вигляду

$$\frac{dx}{dt} = ax + by, \frac{dy}{dt} = cx + dy,$$

де $a = P'_x(x, y)$, $b = P'_y(x, y)$, $c = Q'_x(x, y)$, $d = Q'_y(x, y)$.

Метод лінеаризації (метод Ляпунова) дозволяє установити характер стійкості особливої точки, тобто досліджувати поведінку системи поблизу особливої точки, проте не дає відповіді на питання, яка поведінка системи далека від особливих точок. Дійсно, лише в достатній близькості від особливої точки (x, y) ми маємо право обмежитися лінійними членами в розкладанні функцій $P(x, y)$ і $Q(x, y)$ у ряд Тейлора. Вдалині ж від особливої точки величини $\xi = x - \bar{x}$, $\eta = y - \bar{y}$, що є відхиленнями змінних від координат особливої точки, перестають бути малими, а лінійні наближення – правомірними.

Як ми переконалися, у разі нестійкого вузла, нестійкого фокусу і сідла відображуюча точка відходить при $t \rightarrow \infty$ настільки далеко від особливої точки, що в цій області використання лінеаризованої системи вже стає неправомірним.

У реальній системі жодна реальна величина не може набувати нескінченних значень. Рано чи пізно в самій системі виникнуть умови, що обмежують зростання цих величин. Якщо ми сконструювали якусь модель процесу і описали її системою диференціальних рівнянь, стійким стаціонарним розв'язком якого є нескінченність, це відразу ж свідчить про недолік моделі. Проте і в «правильній» моделі можлива наявність на фазовій площині x, y нестійких особливих точок. У цьому випадку можливі два варіанти:

1) окрім нестійкого положення рівноваги на фазовій площині існує стійке, до якого і сходяться всі траєкторії. Саме таке явище має місце, наприклад, в моделях тригерного типу, описаних вище. У тригерній моделі система алгебраїчних рівнянь для стаціонарних станів

$$P(\bar{x}, \bar{y}) = 0, Q(\bar{x}, \bar{y}) = 0$$

має три розв'язки, причому дослідження характеру стійкості для кожної з трьох особливих точок можна проводити звичайними методами лінеаризації рівнянь в околі особливої точки;

2) траєкторії з нестійкої особливої точки можуть не відходити в нескінченність, не зважаючи на те, що стійких точок на фазовій площині немає. У цьому випадку існує принаймні одна замкнута траєкторія, до якої в граничному випадку наближаються фазові траєкторії. Очевидно, якщо ця траєкторія замкнена, то під час руху по ній координати відображуючої точки періодично набуватимуть одних і тих самих значень.

Ми вже вивчали періодичні рухи при розгляді особливої точки типу центр і загасаючі або наростаючі коливання у разі стійкого і нестійкого фокусів. Тепер нам необхідно ознайомитися з важливим поняттям автоколивань.

Автоколивальними системами називаються такі системи, в яких мають місце два явища. По-перше, які б не були початкові умови, в автоколивальних системах встановлюються незгасаючі коливання, і, по-друге, ці незгасаючі коливання стійкі, оскільки відхилення (в обидва боки) від стаціонарного режиму загасають. Таким чином, в автоколивальній системі встановлюються і

підтримуються незгасаючі коливання за рахунок сил, залежних від стану самої системи, причому амплітуда цих коливань визначається властивостями системи, а не початковими умовами. Фаза коливань при цьому може бути будь-якою. Легко бачити, що величезне число коливальних систем в екології, включаючи періодичні біохімічні реакції, періодичні процеси фотосинтезу, коливання чисельності тварин тощо, належить до класу автоколивальних систем.

На фазовій площині стаціонарний розв'язок автоколивальної системи представляється так званим граничним циклом

Граничний цикл є ізольованою замкненою кривою на фазовій площині, до якої в граничному випадку при $t \rightarrow \infty$ наближаються всі інтегральні криві. Граничний цикл представляє стаціонарний режим з певною амплітудою, що не залежить від початкових умов, а визначається лише структурою системи. Прості приклади дозволяють перекоонатися, що системи вигляду (5.28), взагалі кажучи, допускають як траєкторії граничні цикли.

Наприклад, для системи

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= y + x[1 - (x^2 + y^2)], \\ \frac{dy}{dt} &= -x + y[1 - (x^2 + y^2)]\end{aligned}$$

траєкторія $x^2 + y^2 = 1$ є граничним циклом. Його параметричні рівняння будуть такими $x = \cos(t-t_0)$, $y = \sin(t-t_0)$, а рівняння всіх інших фазових траєкторій запишуться у вигляді

$$x = \frac{\cos(t-t_0)}{\sqrt{1 + Ce^{-2(t-t_0)}}}, y = \frac{\sin(t-t_0)}{\sqrt{1 + Ce^{-2(t-t_0)}}}.$$

Значенням постійної інтеграції $C > 0$ відповідають фазові траєкторії, що накручуються на граничний цикл внутрішньо (при $t \rightarrow \infty$), а значенням $-1 < c < 0$ – траєкторії, що накручуються зовні.

Граничний цикл називається стійким, якщо існує така область на фазовій площині, що містить цей граничний цикл, – область ε , що всі фазові траєкторії, що починаються всередині ε , асимптотично при $t \rightarrow \infty$ наближаються до граничного циклу. Якщо ж, навпаки, в будь-якій скільки завгодно малій області ε граничного циклу існує принаймні одна фазова траєкторія, що не наближається до граничного циклу при $t \rightarrow \infty$, тому такий граничний цикл називається нестійким. Для ілюстрації на рис. 6.6 зображені стійкий граничний цикл *a* і нестійкий граничний цикл *b*.

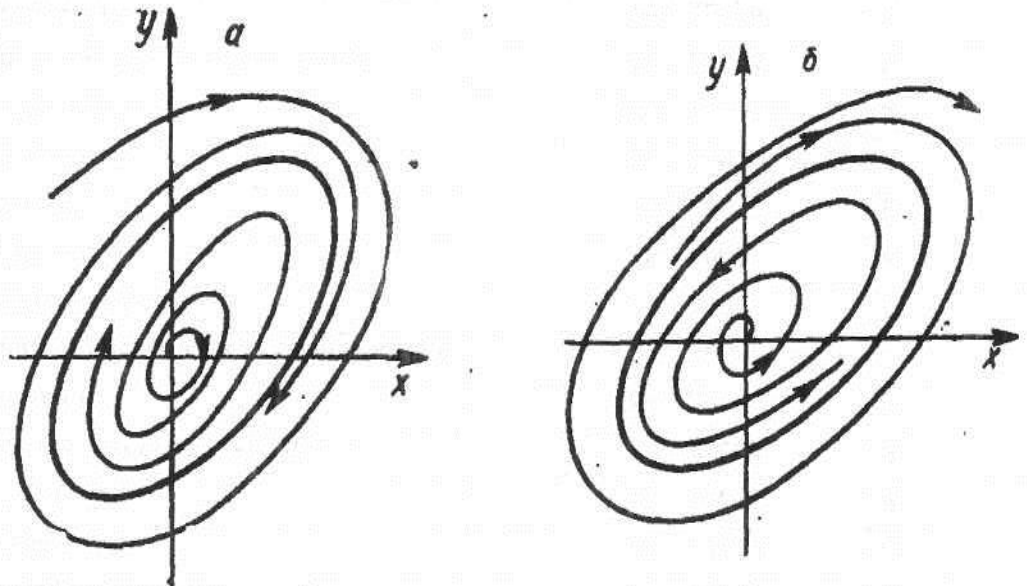


Рисунок 6.6 – Стійкий (а) та нестійкий (б) граничні цикли

Відмітимо, що нестійкі цикли, подібні до зображених на рис. 6.6, такі, що всі траєкторії, з одного боку (наприклад, ззовні), наближаються до них, а з іншого (наприклад, зсередини) – віддаляються від них при $t \rightarrow \infty$, тому іноді їх називають «напівстійкими», або подвійними (остання назва обумовлена тим, що, як правило, такі цикли при відповідній зміні параметра системи розщеплюються на два, один з яких стійкий, а інший – нестійкий).

Для знаходження граничних циклів не існує таких простих шляхів, як для знаходження стаціонарних точок і дослідження їх стійкості. Проте дослідження фазової площини системи часто допомагає дати відповідь на питання: є в даній системі граничний цикл чи ні.

Нехай на фазовій площині існує область, з якої фазові траєкторії не виходять і в якій немає положень рівноваги (особливих точок). Тоді в цій області обов'язково існує граничний цикл, причому решта всіх траєкторій обов'язково намотується на нього.

Таким чином, якщо знайти на фазовій площині таку двозв'язану область, що напрями фазових траєкторій на всій межі обернені всередину цієї області, то можна стверджувати, що усередині цієї області є граничний цикл.

Якщо на фазовій площині існує деяка замкнута область, така, що всі фазові траєкторії, що перетинають межу цієї області, входять у неї і всередині цієї області є нестійка особлива точка, то в останній обов'язково є хоча б один граничний цикл.

Наведемо деякі критерії відсутності замкнених фазових траєкторій:

1) якщо в системі не існує особливих точок, то у неї не може бути і замкнених траєкторій;

2) якщо в системі існує лише одна особлива точка, відмінна від вузла, фокусу і центра (наприклад, сідло), то така система не допускає замкнених траєкторій;

3) якщо в системі є лише прості особливі точки, причому через усі точки типу вузол і фокус проходять інтегральні криві, що йдуть у

нескінченність, то в такій системі немає замкнених фазових траєкторій.

У випадку, якщо критерії 1–3 виконані, ми можемо з упевненістю стверджувати, що в системі немає граничних циклів. Проте невиконання цих критеріїв ще не дозволяє зробити висновок про наявність у системі граничних циклів і, отже, автоколивань.

Нестійкий граничний цикл, зрозуміло, також може міститися у фазовому портреті грубих систем. Однак такий граничний цикл не відповідає реальному періодичному процесу; він відіграє роль лише «вододілу», по обидва боки якого траєкторії мають різну поведінку. Для якісного дослідження динамічної системи, що описується системою двох диференціальних рівнянь із двома невідомими, тобто для з'ясування можливих типів її поведінки, немає потреби знаходити всі фазові траєкторії. Для цієї мети досить знайти лише деякі, основні фазові траєкторії, що визначають якісний характер фазового портрета. Потрібно знати кількість, характер і взаємне розташування станів рівноваги (особливих точок), граничних циклів, а також хід сепаратрис. Знання цих основних траєкторій досить для доведення до кінця якісного дослідження динамічної системи.

6.5 Динамічні моделі в екології

Це моделі, що зображають динаміку системи. Розрізняють такі різновиди динаміки: функціонування, зростання, розвиток.

Моделі функціонування відображають процеси, що відбуваються в системі і спрямовані на виконання системою своїх функцій і досягнення цілей.

Моделі зростання і розвитку системи дозволяють простежити розвиток системи упродовж деякого більш тривалого проміжку часу. Необхідно зауважити, що процеси зростання і розвитку не є тотожними. *Зростання* систем, як правило, пов'язане із збільшенням їх розмірів, включенням у систему деяких об'єктів із зовнішнього середовища, матеріальних та інших ресурсів. Наприклад, зростання підприємства при збільшенні обсягу випуску продукції полягає в побудові нових виробничих корпусів, закупівлі додаткового обладнання, залученні до роботи більшої кількості робітників. На противагу цьому *розвиток* може здійснюватися без збільшення розмірів системи, а інколи навіть при її зменшенні. Наприклад, розвиток сучасних підприємств часто відбувається без збільшення їх розмірів. *Розвиток* – це така зміна системи, при якій змінюються зв'язки між елементами, спрощуються відношення, удосконалюється виконання окремих функцій. Наприклад, розвиток сучасної автомобілебудівної промисловості, металургії та ін. супроводжується удосконаленням технологічних процесів, випуском більш надійних якісних товарів без помітного розширення підприємств. Як правило, розвиток супроводжується глибокою зміною внутрішньої організації системи, зміною її структури. В біологічних системах розвиток і трансформація, еволюція та деградація помітні ще більш явно.

Динаміку систем вивчають із використанням математико-множинних методів, що базуються на положеннях теорії множин. Динаміка системи

описується як перехід з одного стану в інший. Сукупність можливих станів системи називають *множиною станів*. Системи можуть мати дискретні стани (система може перебувати лише в певних, дозволених станах) або неперервні стани (система переходить послідовно з одного стану в інший через нескінченну кількість проміжних станів). Зображення можливих станів системи здійснюється у просторі станів. Це, як правило, абстрактний математичний простір. Описати динаміку системи в просторі станів можна матрицями суміжності або за допомогою графів. Для вивчення динаміки систем використовують множини вхідних і вихідних процесів. Динаміку системи розглядають як послідовний перехід системи з одного стану в інший. Теоретико–множинні методи вивчення динаміки систем спрямовані на вивчення керованості системи, стійкості, надійності функціонування, вивчення роботи в даний момент часу і прогнозу розвитку системи в майбутньому. На основі теоретичних розрахунків встановлено, що системи можуть бути безсмертними чи смертними. Для того щоб система існувала вічно, була безсмертною, необхідно, щоб вона розширювалась. Встановлено теорему, згідно з якою щоб система була вічною, потрібно, щоб зростання елементів у системі не відставало від логарифмічного закону.

Деякі питання динаміки систем можна спрощено продемонструвати, якщо представити модель системи у вигляді оператора, який перетворює вхідні величини у вихідні.

Наприклад,

$$y(t) = R[x(t)]. \quad (6.29)$$

Тут R – оператор системи, який діє на вхідну величину $x(t)$. Величина $x(t)$ може розглядатись, як одна одновимірна величина або як вектор, тобто сукупність величин $X_1(t), X_2(t), X_3(t)...$

Це саме стосується і вихідної величини $y(t)$.

Наведене рівняння описує найбільш просту систему, вихідна величина залежить лише від значення вхідної величини у кожний момент часу.

Більш складною є залежність

$$y(t) = R[x(t), z], \quad (6.30)$$

яка описує дещо складнішу стаціонарну систему. Вихідна величина залежить від вхідної і параметра системи z . Наступне рівняння таке:

$$y(t) = R[x(t), z(t)], \quad (6.31)$$

воно описує нестаціонарну систему: вихідна величина залежить від вхідної і параметра системи $z(t)$, який змінюється упродовж часу.

Рівняння ще більш складної динамічної системи можна записати так:

$$y(t) = R[x(t - \Delta t), z(t)]. \quad (6.32)$$

Це вже нестаціонарна інерційна система, або система з пам'яттю, в ній вихідна величина залежить від значень вхідної величини не лише в даний час, але й від попередніх значень.

Два види можуть взаємодіяти між собою безліччю різних способів, і наслідки цього для двох популяцій також можуть бути дуже різними. В екологічній літературі існує тенденція класифікувати взаємодії за біологічними процесами, що беруть участь у них. Різноманітність можливих взаємодій величезна: хімічні взаємодії, що існують між бактеріями і між планктонними водоростями, різні взаємодії грибів з іншими організмами, симбіоз грибів і водоростей у лишайниках; сукцесії рослинних співтовариств, зв'язані, зокрема, із конкуренцією за сонячне світло і з еволюцією ґрунтів; вражаюча різноманітність способу життя тварин, способів добування їжі і тому подібне. В такій ситуації всеосяжна класифікація стала б зовсім незорою.

Простий і найбільш природний в аналізі популяції вихід полягає в тому, щоб класифікувати взаємодії не за механізмами, а за результатами. Уперше це спробував зробити Одум (1975). Він запропонував класифікацію, в якій взаємини між двома видами оцінювалися як позитивні, негативні або нейтральні залежно від того, зростає, зменшується або залишається незмінною чисельність популяції одного вигляду за наявності іншого. Такий підхід дозволяє виділити такі основні типи взаємодій: міжвидова конкуренція (за їжу, житло та ін.), що веде до зменшення чисельності обох видів; стосунки типу хижак – жертва (або паразит – господар), при яких збільшення чисельності одного виду (хижака) веде до зменшення іншого виду (жертви); симбіоз, що веде до збільшення чисельності обох видів. І нарешті, види можуть займати абсолютно незалежні екологічні ніші. У такому разі кожен вид можна розглядати окремо.

Згідно з гіпотезами Вольтерра при взаємодії хижак – жертва збільшення біомаси виду хижака так само, як і зменшення біомаси виду жертви, пропорційно імовірності зустрічі особин цих двох видів, тобто добутку їх чисельностей (біомас). При розгляді конкуренції (взаємний негативний вплив) і симбіозу (взаємний позитивний вплив) також природно припустити, що цей вплив пропорційний чисельності кожного із взаємодіючих видів. Враховуючи це, всі наведені вище типи взаємодій можна описати в рамках гіпотез Вольтерра.

Одні з найбільш вдалих математичних моделей в екології – це моделі, які описують спряжені коливання чисельності популяцій хижака й жертви. Лотка (Lotka, 1925) і Вольтерра (Volterra, 1926, 1931) запропонували математичну модель

$$dN_1/dt = r_1 N_1 - p_1 N_1 N_2, \quad (6.33)$$

де r_1 – питома миттєва швидкість популяційного росту жертви;
 p_1 – константа, що пов'язує смертність жертв із щільністю хижака;
 N_1 і N_2 – щільності відповідно жертви й хижака.

Миттєва швидкість росту популяції хижака dN_2/dt в цій моделі дорівнює різниці народжуваності (яка, у свою чергу, залежить від інтенсивності споживання хижаком жертв) і постійній смертності:

$$dN_2/dt = p_2 N_1 N_2 - d_2 N_2, \quad (6.34)$$

де p_2 – константа, що пов’язує народжуваність у популяції хижака із щільністю жертви;

d_2 – питома смертність хижака (що вважається постійною).

Згідно з наведеними рівняннями кожна з популяцій, що взаємодіють у своєму збільшенні, обмежена лише іншою популяцією, тобто зростання числа жертв лімітується пресом хижаків, у свою чергу, зростання чисельності хижаків – недостатньою кількістю жертв. Необхідно наголосити, що в цій моделі ніякого самообмеження популяцій не передбачається. Вважається, наприклад, що їжі для жертви завжди вдосталь. Також не передбачається і вихід з-під контролю хижака популяції жертв, хоча насправді таке трапляється в реальних умовах на кожному кроці.

Модель Лотки–Вольтерра для конкуренції представлена парою диференціальних рівнянь:

$$dN_1/dt = r_1N_1(K_1 - N_1 - \alpha_{12}N_2)/K_1; \quad (6.35)$$

$$dN_2/dt = r_2N_2(K_2 - N_2 - \alpha_{21}N_1)/K_2. \quad (6.36)$$

Необхідно звернути увагу, що кожне з цих рівнянь відрізняється від рівняння логістичного зростання лише тим, що в чисельнику є додатковий елемент – чисельність популяції виду-конкурента, помножена на коефіцієнт конкуренції (α), причому α_{12} означає, що це конкуруючий ефект однієї особини популяції другого виду на популяцію першого і навпаки. Кількісне значення коефіцієнта конкуренції показує, у скільки разів одна особина конкуруючого виду сильніше чи слабше за одну особину свого виду гальмує зростання чисельності.

Так, якщо $\alpha_{12} = 1$, то це означає, що вплив однієї особини популяції 2-го на популяцію 1-го виду такий самий, як і особини свого виду на зростання щільності. Якщо $\alpha > 1$, то вплив сильніший, якщо $\alpha < 1$, то слабший, ніж вплив особин свого виду. А перемноживши коефіцієнт конкуренції на сумарну кількість особин, ми одержимо загальний вплив популяції виду-конкурента на зростання популяції.

До динамічних моделей можна віднести всі моделі, де розглядаються різні параметри екосистем у динаміці від часу або іншої незалежної величини.

Різне практичне використання динамічних моделей залежить від здатності сучасних ЕОМ вирішувати велике число (сотні) рівнянь за короткі проміжки часу. Ці рівняння є більш-менш складними математичними описами того, як функціонує імітована система, і подаються вони у формі виразів для рівнів різних типів, темп зміни яких регулюється керуючими функціями. Рівняння для рівнів описують накопичення в системі таких величин, як маса, чисельність організмів або кількість енергії, а рівняння для темпів керують зміною цих рівнів у часі. Керуючі функції відображають правила, явні або неявні, які регулюють функціонування системи. Математичні моделі системи можуть відображати її лише з тим ступенем точності, з якою рівняння, що описують властивості компонентів моделі, відображають властивості компонентів реальної системи. Популярність динамічних моделей зобов’язана великій гнучкості методів, застосовуваних для опису динаміки систем, яка

включає нелінійні реакції компонентів на регульовальні змінні, а також позитивні або негативні зворотні зв'язки. Така гнучкість має і свої недоліки. Наприклад, неможливо врахувати рівняння для всіх компонентів системи, оскільки навіть за наявності сучасних ЕОМ імітація швидко стає дуже складною. Тому необхідно мати деяку абстракцію, що базується на здоровому глузді і припущеннях про функціонування екосистеми.

При використанні системної динаміки в моделюванні виділяють три головні етапи. По-перше, потрібно встановити, яка саме динамічна властивість системи становить інтерес і сформулювати гіпотези про взаємодії, що породжують цю властивість. По-друге, комп'ютерна імітаційна модель повинна бути побудована так, щоб вона дублювала елементи поведінки і взаємодій, визначені як істотні для системи. По-третє, коли ми переконаємося в тому, що поведінка моделі досить близько до поведінки реальної системи, ми використовуємо модель, щоб зрозуміти послідовність змін, спостережуваних у реальній системі, і запропонувати експерименти, які потрібно поставити на стадії оцінки потенційних стратегій, тобто на наступному етапі системного аналізу.

Багатьох екологів привертає до динамічних моделей наявність спеціально орієнтованих мов і програмувальних систем для їх машинної реалізації, щоб досліднику не навчатися сучасних методів програмування. Ці програмувальні системи покликані полегшити спілкування не лише між дослідниками і ЕОМ, але й між самими дослідниками. Важливою межею таких імітаційних програмувальних систем є те, що всі процеси і їх деталі можуть бути представлені в концептуальній, а не обчислювальній формі. Сама програмувальна система включає якусь процедуру сортування, яка упорядковує всі розрахунки і процеси інтеграції в ефективний алгоритм. У результаті цього програма імітації може бути представлена у зрозумілішій формі, а ряд концептуальних помилок і помилок програмування виявляється самою системою. Проте багато хто вважає за краще записувати свої програми імітації на мовах високого рівня. Працюючи з мовами, ми позбавляємося від обмежень і правил, властивих будь-якій спеціально орієнтованій мові.

Основні характеристики динамічних моделей полягають у тому, що екологічна система розглядається в динаміці у часі, тобто відбувається зміна кількісних характеристик (чисельності, біомаси) в динаміці, що описується безперервними функціями.

Труднощі динамічних моделей полягають у тому, що не завжди легко передбачити поведінку навіть найпростіших моделей. Досить лише однієї нелінійності і двох петель зворотного зв'язку, щоб поведінка моделі стала «контрінтуїтивною», тобто суперечила нашим інтуїтивним уявленням про систему. З іншого боку, можна легко побудувати модель, що не збігається з дійсністю або нестійка. Ще одна трудність пов'язана з тим, що для з'ясування механізму функціонування модельної системи, як правило, необхідно провести багато спеціальних експериментів із моделлю. Наприклад, завжди доводиться перевіряти поведінку моделі у відповідь на одночасну зміну двох або більш вхідних змінних і в окремих випадках досить перевірити реакцію на зміну лише

однієї змінної.

Труднощі, пов'язані з прогнозом поведінки динамічних моделей, помітно знижують їх роль у подальшому розвитку теорії. Природно, що найбільші труднощі в побудові математичних моделей пов'язані з перевіркою основних припущень, необхідних для застосування моделі, але часто ця перевірка буває легшою і математично строгішою, ніж пошук складних типів поведінки в динамічних моделях. Ще один недолік полягає у тому, що вони не завжди дають оцінку значень основних параметрів, особливо коли їх число досить велике, а використання методу ітерацій досить трудомістке навіть для потужних ЕОМ (багато часу, погано сходяться оцінки).

Динамічні моделі за своєю природою і математичною структурою націлені в основному на отримання детерміністських рішень. Щоправда в них можуть включатися стохастичні елементи, але іноді це пов'язано з труднощами.

Отже, динамічні моделі можуть бути особливо корисні на ранніх стадіях системного аналізу складних екологічних систем, оскільки вони спрямовані на виявлення основних зв'язків у системі і тих змінних і підсистем, які є ключовими. На пізніших етапах доцільніше зосередити зусилля на використанні якої-небудь іншої сім'ї моделей, саме тому в системному аналізі виділена стадія отримання альтернативних рішень проблеми.

Розглянемо тут деякі прості моделі, на яких проілюструємо підхід до даного питання.

Нехай деяка популяція має у момент часу t_0 біомасу x_0 . Припустимо, що в кожен момент часу швидкість збільшення біомаси пропорційна вже наявній біомасі, а виникаючі явища конкуренції за джерелами живлення і самоотруєння знижують біомасу пропорційно квадрату наявної біомаси. Якщо позначити біомасу у момент часу t через $x(t)$, а зміну її як час t через Δx , то можна записати таку наближену рівність:

Розглянемо тут деякі прості моделі, на яких проілюструємо підхід до цього питання.

Нехай деяка популяція має у момент часу t_0 біомасу x_0 . Припустимо, що в кожен момент години швидкість збільшення біомаси пропорційна вже наявній біомасі, а виникаючі явища конкуренції за джерелами живлення і самоотруєння знижують біомасу пропорційно квадрату наявної біомаси. Якщо позначити біомасу у момент часу t через $x(t)$, а зміну її за годину Δt через Δx , то можна записати таку наближену рівність:

$$\Delta x \approx (kx - \alpha x^2) \cdot \Delta t, \quad (6.37)$$

де α і k – додатні сталі (параметри).

У диференціальній формі це співвідношення має вигляд

$$\frac{dx}{dt} = kx - \alpha x^2. \quad (6.38)$$

Воно і є математичною моделлю процесу зміни біомаси популяцій. У екологічній літературі це рівняння часто називають *логістичним*.

Якщо тепер поставити питання про те, яка ж буде біомаса у момент часу T , то на нього можна відповісти експериментально – дочекатися цього моменту

і визначити біомасу безпосереднім вимірюванням (взагалі кажучи, таке вимірювання може бути фізично нездійсненним).

Інший шлях – скористатися математичною моделлю, розв’язуючи задачу Коші для рівняння (6.38) з початковою умовою $x(t_0) = x_0$.

Розділяючи в рівнянні (5.15) змінні, одержимо рівняння в диференціалах

$$\frac{dx}{x(k - \alpha x)} = dt. \quad (6.39)$$

У подальшому зручно ввести нову змінну $z = \alpha x$, тоді (6.39) можна переписати у вигляді

$$\frac{dz}{z} + \frac{dz}{k - z} = k dt. \quad (6.40)$$

Повертаючись до початкового рівняння (5.15), відмітимо, що якщо $x_0 = \frac{k}{\alpha}$ (тобто $z_0 = k$), то задача Коші має розв’язок $x(t) \equiv x_0$. Якщо $x_0 < k/\alpha$ ($z_0 < k$), тоді рівняння (6.40) інтегрується так:

$$\ln z - \ln(k - z) = \ln z_0 - \ln(k - z_0) + k(t - t_0), \quad (6.41)$$

звідки

$$\frac{z}{k - z} = \frac{z_0}{k - z_0} e^{k(t - t_0)}, \quad (6.42)$$

отже,

$$x(t) = \frac{kx_0 e^{k(t - t_0)}}{(k + \alpha x_0 (e^{k(t - t_0)} - 1))^2}, \quad (6.43)$$

Якщо $x_0 > \frac{k}{\alpha}$, то аналогічно до попереднього випадку знову одержуємо формулу (5.20). Диференціюючи її за t , маємо

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\alpha k (\frac{k}{\alpha} - x_0) e^{k(t - t_0)}}{(k + \alpha x_0 (e^{k(t - t_0)} - 1))^2}, \quad (6.44)$$

звідки випливає, що при $x_0 < \frac{k}{\alpha}$ графік функції $x(t)$ монотонно зростає, а при

$x_0 > \frac{k}{\alpha}$ монотонно зменшується, причому обидва графіки мають горизонтальну

вісь асимптоти $x = \frac{k}{\alpha}$ (рис. 6.7).

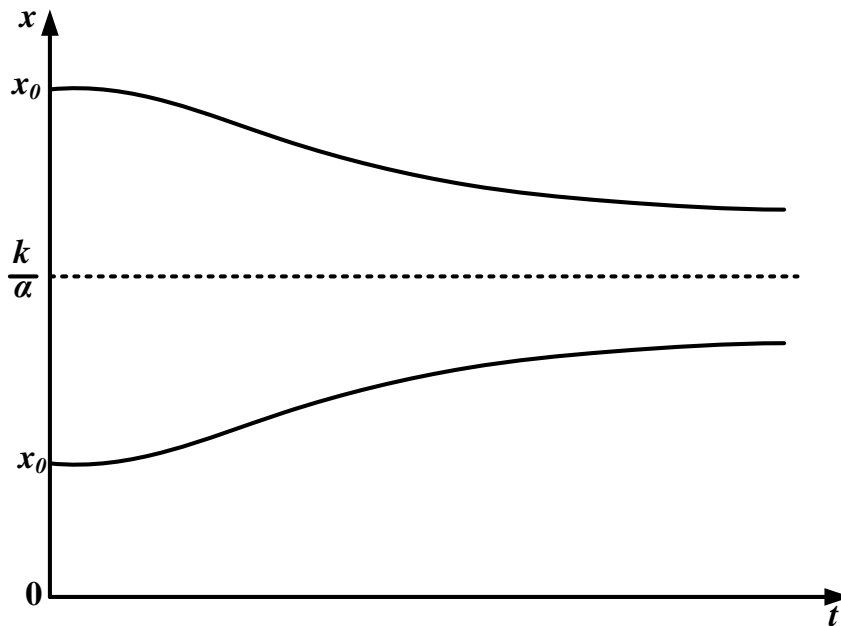


Рисунок 6.7 – Залежність біомаси від часу для різних значень параметрів k , α і x_0

Ми розглянули дуже спрощену ситуацію, оскільки припускали, що популяція не взаємодіє ні з якими іншими популяціями, урахування ж цієї обставини, як правило, значно ускладнює модель.

Розглянемо одну з таких моделей. Позначатимемо біомаси двох популяцій через x і y відповідно. Припустимо, що обидві популяції споживають один і той самий корм, кількість якого обмежена, і через це знаходяться в конкурентній боротьбі одна з одною.

Французький математик В. Вольтерра у 1926 р. показав, що при такому припущенні динаміка популяцій досить добре описується такою системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= k_1 x - \varepsilon_1 x (\lambda_1 x + \lambda_2 y) \\ \frac{dy}{dt} &= k_2 y - \varepsilon_2 x (\lambda_2 x + \lambda_2 y) \end{aligned} \quad (6.45)$$

де $k_1, k_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \lambda_1, \lambda_2$ – певні позитивні числа.

Перші члени правих частин системи (6.45) характеризують швидкість зростання популяцій за відсутності обмежувальних чинників. Другі члени враховують ті зміни у швидкостях, які викликаються обмеженістю їжі.

Задаючи різні значення параметрів, за допомогою системи (6.45) можна описати взаємодію двох популяцій, одна з яких – хижак, а інша – жертва. У літературі більш детально описані математичні аспекти дослідження системи (6.45).

Перш ніж досліджувати, як поводитиметься система (6.45), зазначимо, що

у будь-який момент часу t її стан повністю описується значеннями x і y : кожному стану системи відповідає деяка точка (x, y) на площині xOy , що називається «фазовою площиною». Кожній точці фазової площини можна поставити у відповідність вектор (стрілку на рис. 6.8) із координатами, які є правими частинами системи, що вказує напрям руху в цій точці. Провівши з початкової точки лінії дотичні до цих векторів, одержимо траєкторії, за якими відбуватиметься рух системи, тобто розв'язок задачі Коші для системи (6.45) із початковими умовами

$$x(t_0)=x_0, \quad y(t_0)=y_0, \quad (x_0, y_0) \in xOy. \quad (6.46)$$

Щоб скласти уявлення про траєкторії руху системи, побудуємо лінії, на яких $x = 0$ (тут вектори паралельні осі Oy) і $y = 0$ (тут вектори паралельні осі Ox). Скорочено позначимо похідну $\frac{dx}{dt}$ – через x , а $\frac{dy}{dt}$ – через y . Тоді маємо

$$x = 0, \text{ коли } k_1x - \varepsilon_1(\lambda_1x + \lambda_2y)x = 0,$$

$$y = 0, \text{ коли } k_2x - \varepsilon_2(\lambda_2x + \lambda_2y)y = 0,$$

тобто $x = 0$ на двох прямих у фазовій площині:

$$x = 0 \text{ та } \frac{k_1}{\varepsilon_1} \lambda_1x + \lambda_2y = \frac{k_1}{\varepsilon_1},$$

а $y = 0$ також на двох прямих:

$$y = 0 \text{ і } \lambda_1x + \lambda_2y = \frac{k_2}{\varepsilon_2} \text{ (рис. 6.2, 6.3).}$$

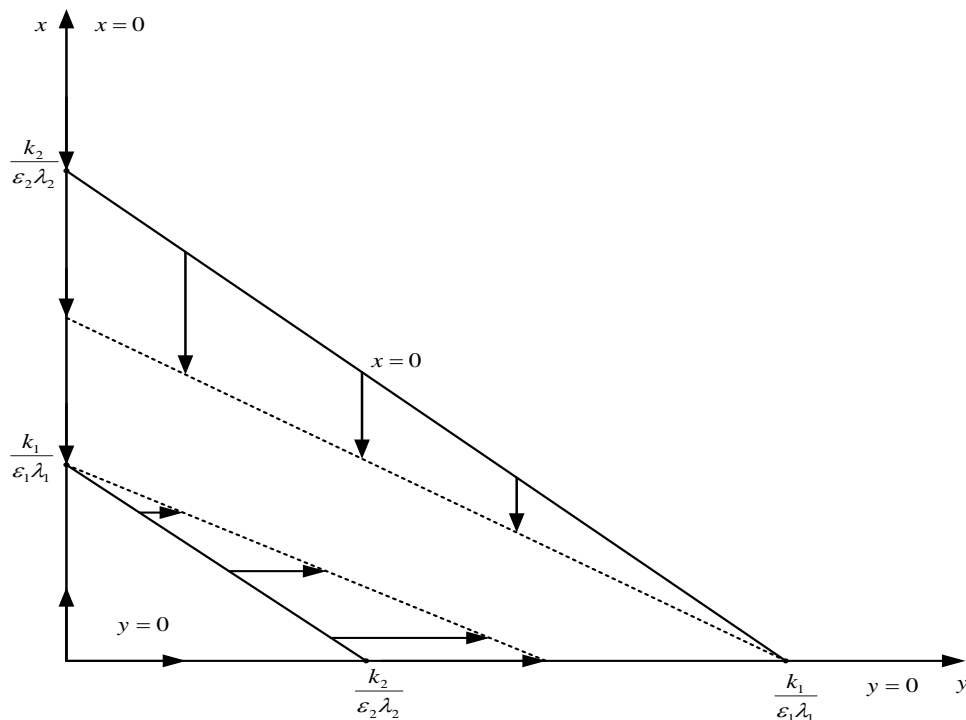


Рисунок 6.8 – Фазовий портрет динамічної системи (6.45) за умови $\frac{k_1}{\varepsilon_1} < \frac{k_2}{\varepsilon_2}$

За цими рисунками можна зробити такі висновки. В обох випадках маємо три стаціонарні точки, в яких одночасно $x = 0$ і $y = 0$, а саме: $(0,0)$, $(0, \frac{k_1}{\varepsilon_1 \lambda_1})$ і $(0, \frac{k_2}{\varepsilon_2 \lambda_2})$, які за відомою класифікацією є вузлами. При цьому якщо $\frac{k_1}{\varepsilon_1} > \frac{k_2}{\varepsilon_2}$ (рис. 6.2), то стійким є тільки вузол $(\frac{k_1}{\varepsilon_1 \lambda_1}, 0)$, а якщо $\frac{k_1}{\varepsilon_1} < \frac{k_2}{\varepsilon_2}$ (рис. 6.3), то вузол $(0, \frac{k_2}{\varepsilon_2 \lambda_2})$. Таким чином, якщо $\frac{k_1}{\varepsilon_1} > \frac{k_2}{\varepsilon_2}$, то друга популяція вимирає, $y(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$, а перша стабілізується, $x(t) \rightarrow \frac{k_1}{\varepsilon_1 \lambda_1}, t \rightarrow \infty$. Якщо $\frac{k_1}{\varepsilon_1} < \frac{k_2}{\varepsilon_2}$, то маємо зворотну картину: перша популяція вимирає, $x(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$, а друга стабілізується, $x(t) \rightarrow \frac{k_2}{\varepsilon_2 \lambda_2}, t \rightarrow \infty$. Якщо $\frac{k_1}{\varepsilon_1} = \frac{k_2}{\varepsilon_2} = \frac{k}{\varepsilon}$, тоді, крім нестійкого вузла $(0, 0)$, маємо лінію стаціонарних точок – відрізок прямої $\lambda_1 x + \lambda_2 y = \frac{k}{\varepsilon}$ (рис. 6.9).

У подальшому будемо для спрощення вважати, що $k_1 = k_2 = k$ і $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$.

Тоді, ділячи друге рівняння системи на перше, одержимо $\frac{dy}{dx} = \frac{y}{x}$, звідки

$$y(t) = \frac{y_0}{x_0} x(t), \quad (6.47)$$

тобто траєкторіями є відрізки прямих, координат, що виходять з початку (рис. 6.4). Обидві популяції не вимирають, чисельність їх стабілізується до

значень, які можна знайти як координати перетину прямих $\lambda_1 x + \lambda_2 y = \frac{k}{\varepsilon}$ і

$y = \frac{y_0}{x_0} x$, звідки

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \frac{kx_0}{\varepsilon(\lambda_1 x_0 + \lambda_2 y_0)}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \frac{ky_0}{\varepsilon(\lambda_1 x_0 + \lambda_2 y_0)}. \quad (6.48)$$

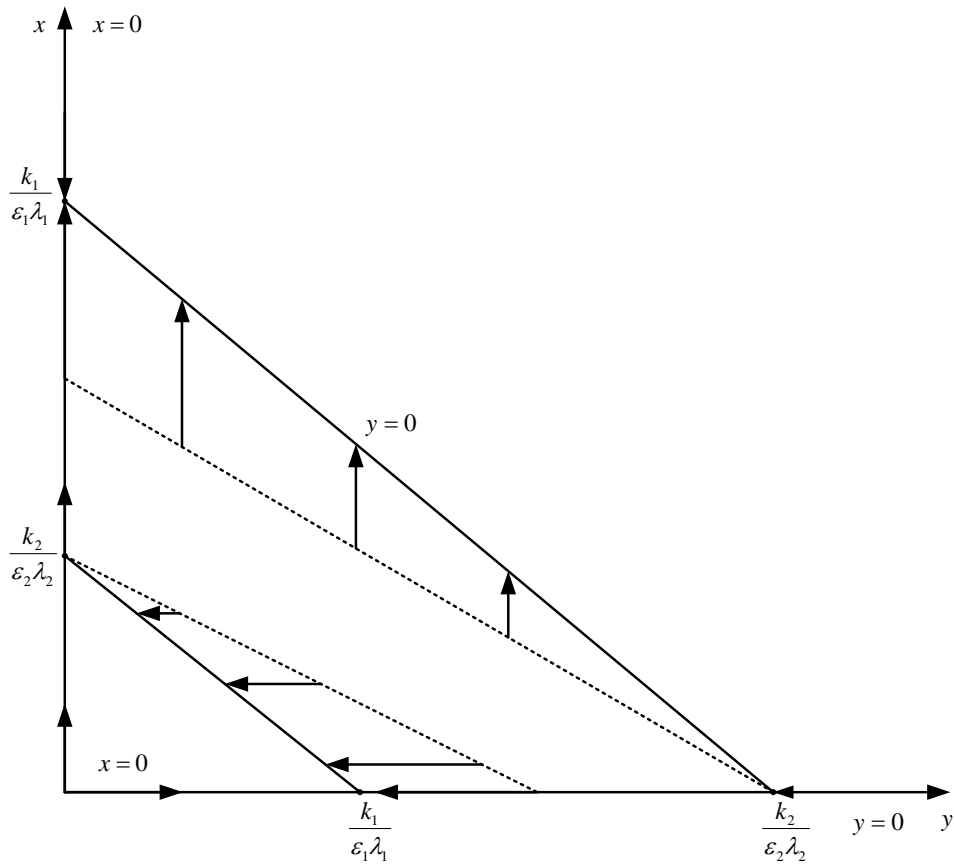


Рисунок 6.9 – Фазовий портрет динамічної системи (6.45) за умови $\frac{k_1}{\varepsilon_1} > \frac{k_2}{\varepsilon_2}$

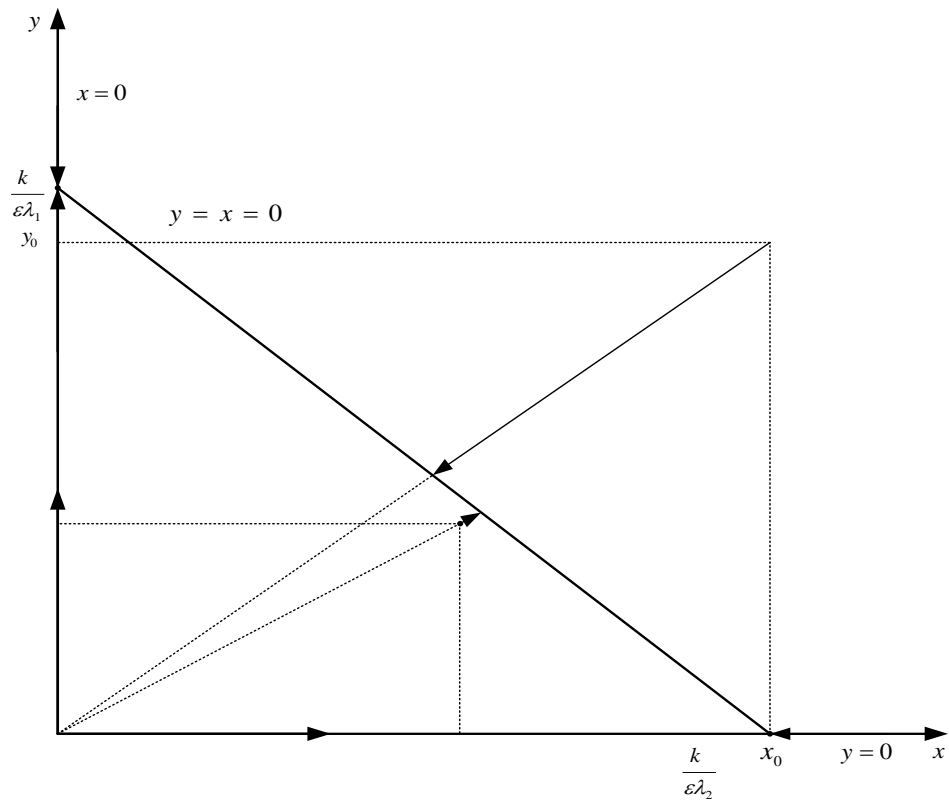


Рисунок 6.10 – Фазовий портрет динамічної системи (5.22) за умови $k_1 = k_2 = k$ та $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$

6.6 Узагальнені моделі взаємодії двох видів

Описуючи неоднакові природні ситуації, різні автори пропонували велику кількість моделей, правими частинами рівнянь яких були деякі функції чисельності популяцій, що вивчаються. Вид цих функцій визначався виходячи з конкретної експериментальної ситуації. Виникло питання про вироблення деяких загальних критеріїв, що дозволяють установити, якого виду функції можуть описати ті або інші особливості поведінки чисельності взаємодіючих популяцій, зокрема стійкі коливання.

Однією з перших спроб у цьому напрямі була праця Колмогорова, написана в 1935 р. (Колмогоров, 1972). У ній при деяких найзагальніших припущеннях досліджена така система диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= k_1(x)x - L(x)y, \\ \frac{dy}{dt} &= k_2(x)y.\end{aligned}\tag{6.49}$$

Така система служить моделлю взаємин типу хижак – жертва між видами при таких припущеннях:

1) хижаки не взаємодіють один з одним, тобто коефіцієнт розмноження хижаків k_2 і кількість жертв L , що винищуються за одиницю часу одним хижаком, не залежать від y ;

2) приріст за малі проміжки часу кількості жертв за наявності хижаків дорівнює приросту за відсутності хижаків мінус кількість жертв, що винищуються хижаками. Щодо функцій $k_1(x)$, $k_2(x)$, $L(x)$, що входять в рівняння, робляться лише вельми загальні природні припущення, що стосуються якісного характеру їх залежності від x . Передбачається, що ці функції безперервні і визначені на позитивній півосі x ;

3) $dk_1/dx < 0$. Це означає, що коефіцієнт розмноження жертв за відсутності хижаків монотонно спадає із зростанням кількості жертв, що відображає обмеженість харчових та інших ресурсів;

4) $dk_2/dx > 0$, $k_2(0) < 0 < \infty$. Таке обмеження означає, що із зростанням чисельності жертв коефіцієнт розмноження хижаків зростає, переходячи від від'ємних значень (в обстановці, коли нічим харчуватися) до додатних;

5) кількість жертв, що винищуються одним хижаком за одиницю часу $L(x) > 0$ при $N > 0$; $L(0) = 0$.

Розглянемо характер фазових траєкторій, можливих у системі (5.26), і стаціонарні стани цієї системи. Для цього знайдемо особливі точки системи у додатному квадраті фазової площини. Можна показати, що їх дві або три: перша точка $(0,0)$, друга точка $(A, 0)$, де A визначається із рівняння $k_1(A) = 0$. Третя точка (B, C) , де B, C визначаються із рівнянь $k_2(B) = 0$, $k_1(B)B - L(B)C = 0$.

Остання точка поміщається у додатному квадранті і відмінна від іншої лише у разі $k_1(B) > 0$, тобто $A > B$.

Дослідження характеру особливих точок методом лінеаризації Ляпунова показує, що особлива точка на початку координат $(0, 0)$ завжди є сідлом.

Точка $(A, 0)$ є сідлом, якщо $B < L$, і стійким вузлом, якщо $B > A$. При такому співвідношенні параметрів усі фазові траєкторії сходяться в цій особливій точці.

У околі точки (B, C) при $B < A$ отримуємо лінеаризовані рівняння:

$$\frac{d\xi}{dt} = -\sigma\xi - L(B)\eta,$$

$$\frac{d\eta}{dt} = Ck'(B)\xi.$$

Тут $\xi = x - B, \eta = y - C, \sigma^2 = -k_1(B) - k_1(B)B + L(B)C$.

Особлива точка є фокусом або вузлом, стійкість яких залежить від знака σ : якщо $\sigma > 0$, точка стійка, якщо $\sigma < 0$, особлива точка нестійка і навколо неї можуть існувати граничні цикли – стійкі періодичні коливальні рішення. Можливі види фазових портретів системи рівнянь, наведені на рис. 6.11 а, б, в, г. Як ми бачимо, залежно від значень параметрів поведінка змінних може мати істотно різний характер. Зокрема, у випадку б має місце граничний цикл, що відображає стійкі коливання чисельності популяцій.

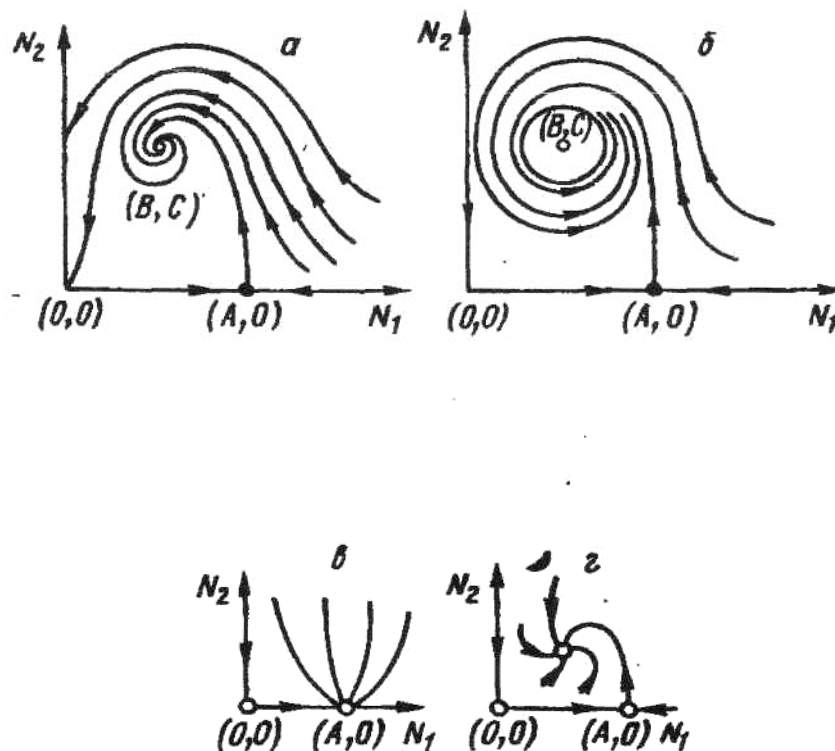


Рисунок 6.11 – Фазова картина системи, що описує взаємодію двох видів при різних співвідношеннях параметрів (Колмогоров, 1972)

Ще одна узагальнена модель взаємин хижак – жертва, що широко обговорювалася в літературі, належить Розенцвейга і Мак-Артура (Rosenzweig, Mac Arthur, 1963). У ній розглядається система рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= f(x) - \Phi(x, y), \\ \frac{dy}{dt} &= -ey + k\Phi(x, y).\end{aligned}\tag{6.50}$$

де $f(x)$ – швидкість зміни чисельності жертв x за відсутності хижаків y ; $\Phi(x, y)$ – інтенсивність хижацтва; k – ефективність перетворення жертви у хижака; e – смертність хижака. Модель (6.50) зводиться до моделі, що є однією з окремих випадків моделі Колмогорова при таких припущеннях:

- 1) чисельність хижака обмежується лише чисельністю жертви;
- 2) швидкість, з якою дана особина хижака поїдає жертву, залежить лише від щільності популяції жертв і не залежить від густини хижаків.

Тоді рівняння (6.50) набувають вигляду:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= f(x) - y\Phi(x), \\ \frac{dy}{dt} &= -ey + ky\Phi(x).\end{aligned}\tag{6.51}$$

Аналіз якісної поведінки розв'язків цієї системи (Сміт, 1976) дозволив зробити такі висновки:

1. Взаємодія хижак – жертва, при якій чисельність хижака обмежується наявністю жертви, може приводити до регулярних коливань чисельності.
2. Якщо чисельність жертви обмежується кількістю необхідних їй ресурсів, а не дією хижака, то це призводить до загасання коливань.
3. Якщо чисельність хижака обмежується не кількістю жертви, а деяким чинником, то це призводить до загасання коливань.
4. Якщо є притулки, завдяки яким деяке постійне число особин жертви виявляється недосяжним для хижаків, то це призводить до загасання коливань.
5. Амплітуда коливань зростатиме, і ці коливання можуть призвести до вимирання одного або обох видів, якщо хижак може прогодуватися при такій щільності популяції жертв, яка набагато нижча від ємності середовища, що допускається (максимально можливою в логістичній моделі).

Мак–Артур (MacArthur, 1971) описав конкретний екологічний приклад такої системи, що має своїм розв'язком граничний цикл:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= x(-k_1 + k_2x - x^2 + k_3y - y^2 - k_4xy), \\ \frac{dy}{dt} &= y(k_5 - k_6y - k_7x + k_8xy).\end{aligned}\tag{6.52}$$

Тут x, y – біомаси двох видів комах. Щоб уточнити значення членів, що стоять у дужках у правих частинах рівнянь, розглянемо рівняння для x . Комахи виду x поїдають личинок вигляду y (член $+k_3y$), але дорослі особини виду y поїдають личинок виду x за умови високої чисельності видів x або y або обох видів (члени $-k_4xy, -y^2$). При малих x смертність виду x вища, ніж його

природний приріст ($1 - k_1 + k_2x - x^2 < 0$ при малих x). У другому рівнянні член k_5 відображає природний приріст виду y ; $-k_6y$ – самообмеження цього виду; $-k_7x$ – поїдання личинок виду y комахами виду x ; k_3xy – приріст біомаси виду y за рахунок поїдання дорослими комахами виду y личинок виду x : На рис. 6.6 поданий граничний цикл, що є траєкторією стійкого періодичного розв'язку системи (6.52).

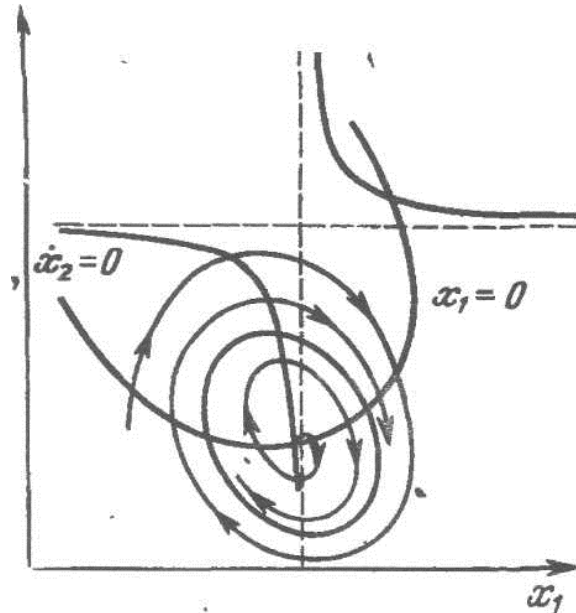


Рисунок 6.12 – Фазовий портрет моделі (6.52) (MacArthur, 1971)

Вирішення питання про те, яким чином забезпечити співіснування популяції з її біологічним оточенням, зрозуміло, не може бути отримане без урахування специфіки конкретної екологічної системи і аналізу всіх її взаємозв'язків. Разом із тим вивчення формальних математичних моделей дозволяє відповісти на деякі загальні питання.

Так, для моделей типу (6.50) факт сумісності або несумісності популяцій не залежить від їх початкової чисельності, а визначається лише властивостями функцій $k_1(x, y)$, $k_2(x, y)$, тобто в кінцевому підсумку характером взаємодії видів.

Модель допомагає відповісти на питання: як необхідно впливати на біоценоз, керувати ним, щоб по можливості швидко знищити шкідливий вид. Нехай популяція шкідливого виду сумісна із навколишнім біоценозом. Введення управління в систему рівнянь (6.50) можливе в двох формах. По-перше, можна ввести керуючі параметри, що визначають вид функцій k_1 і k_2 . Це відповідає використанню принципово біологічних методів боротьби, що змінюють характер взаємодії між популяціями. По-друге, управління може зводитися до короткочасної, стрибкоподібної зміни величин чисельності x і y . Такий спосіб відповідає методам боротьби типу одноразового знищення однієї або обох популяцій хімічними засобами. Із сформульованого вище твердження видно, що для сумісних популяцій другий метод боротьби буде малоефективним, тоді як зміна виду функцій k_1 , k_2 може привести до бажаного результату – знищення популяції шкідливого виду. Цікаво відзначити, що іноді дію доцільно застосувати не до самого шкідника, а до його партнера. Який із

способів ефективніший у загальному випадку сказати не можна. Це залежить від того, що є у розпорядженні засобів управління, та від явного виду функцій k_1, k_2 , що описують взаємодію популяцій, що становлять досліджуваний ценоз.

Були зроблені спроби конкретизувати тип функцій, що відображають взаємодію екологічних видів у співтоваристві так, щоб ці функції, будучи конкретними, могли описувати в той самий час досить широкий спектр експериментальних ситуацій.

Одна із найдетальніше вивчених моделей запропонована і досліджена у працях А. Д. Базикіна (1985).

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= A - \frac{Bxy}{1+px} - Ex^2, \\ \frac{dy}{dt} &= -C + \frac{Dxy}{1+px} - My^2.\end{aligned}\tag{6.53}$$

Ця модель описує динаміку двох видів, що взаємодіють за типом хижак–жертва та є узагальненням класичної моделі Вольтерра:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= Ax - Bxy, \\ \frac{dy}{dt} &= Cy + Dxy\end{aligned}\tag{6.54}$$

Система (6.54) виникає у рамках вольтеррівської схеми при додатковому урахуванні таких важливих екологічних ефектів:

1. Насичення хижаків. У моделі (6.54) передбачається, що інтенсивність виїдання жертв хижаками лінійно зростає із збільшенням щільності популяції жертв. Це положення не відповідає даним експериментів. Для опису залежності раціону хижака від щільності популяції жертв можуть бути вибрані різні функції. Найістотніше, щоб вибрана функція із зростанням x асимптотично наближалася до постійного значення. У працях Базикіна такою функцією обрана гіпербола $x/(1+px)$.

2. Конкуренція жертв. Обмеженість зовнішніх ресурсів, а отже і неможливість необмеженого розмноження популяції жертв враховується шляхом заміни члена Ax (розмноження жертв за відсутності хижаків у системі (6.54) логістичним членом $Ax/(1+px)$. Це еквівалентно введенню в перше рівняння системи від'ємного члена $-Ex^2$.

3. Конкуренція хижаків. Навіть при необмеженому харчуванні щільність популяції хижаків не може зростати необмежено: вона стабілізується на деякому рівні за рахунок нестачі деяких інших ресурсів, наприклад, просто території. Конкуренцію за ці ресурси природно за аналогією із внутрішньовидовою конкуренцією жертв описати за допомогою від'ємного квадратичного члена в другому рівнянні $-My^2$.

Система (6.53) залежить від семи параметрів. За допомогою заміни змінних: $x \rightarrow (A/D)x$; $y \rightarrow (A/D)y$; $t \rightarrow (1/A)t$; $\gamma = c/A$; $\alpha = PD/A$; $\varepsilon = E/D$; $\mu = M/B$ –

можна позбавитися від трьох параметрів і перейти до системи:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= x - \frac{xy}{1 + \alpha x} - \varepsilon x^2, \\ \frac{dy}{dt} &= -\gamma y + \frac{xy}{1 + \alpha x} - \mu y^2,\end{aligned}\tag{6.55}$$

що залежить від чотирьох параметрів.

Для повного якісного дослідження системи (6.55) необхідно розбити чотиривимірний простір параметрів на області з різним типом динамічної поведінки, тобто побудувати параметричний або структурний портрет системи. Потім треба побудувати фазові портрети для кожної з областей параметричного портрета і описати біфуркації, що відбуваються з фазовими портретами на межах різних областей параметричного портрета. Сформульоване завдання досить складне. Побудова повного параметричного портрета відбувається у вигляді набору «зрізів» параметричних портретів меншої розмірності при фіксованих значеннях деяких із параметрів. Відповідно до цих фазових портретів поведінка системи при різних співвідношеннях параметрів може бути досить різною. У системі можливі: 1) одна стійка рівновага; 2) один стійкий граничний цикл; 3) дві стійких рівноваги; 4) стійкий граничний цикл і стійка рівновага поза ним; 5) стійкий граничний цикл і стійка рівновага всередині нього.

На параметричному портреті є 22 різні біфуркаційні межі, які утворюють 7 різних типів біфуркацій. Їх вивчення дозволяє виявити можливі типи поведінки системи при зміні її параметрів.

Особливий інтерес для практики становлять, як правило, напрацювання критеріїв близькості системи до біфуркаційних меж. Дійсно, екологам добре відома властивість «буферності» або «гнучкості» природних екологічних систем. Цими термінами, як правило, позначають здатність системи неначе поглинати зовнішні дії. Поки інтенсивність зовнішньої дії не перевищує деякої критичної величини, поведінка систем не зазнає якісних змін. На фазовій площині це відповідає поверненню системи у стійкий стан рівноваги або на стійкий граничний цикл, параметри якого не дуже відрізняються від первинного. Коли ж інтенсивність дії перевищує допустиму, система «ламається», переходить у якісно інший режим динамічної поведінки, наприклад, просто вимирає. Це явище відповідає біфуркаційному переходу.

Кожен тип біфуркаційних переходів має свої відмінні особливості, що дозволяють судити про небезпеку такого переходу для екосистеми. Наведемо деякі загальні критерії, що свідчать про близькість небезпечної межі. Якщо при зменшенні чисельності одного з видів відбувається «застрявання» системи поблизу нестійкої сідлової точки, що виражається в дуже повільній відбудові чисельності до початкового значення, отже, система знаходиться поблизу критичної межі. Індикатором небезпеки буде також зміна форми коливань чисельностей хижака й жертви. Якщо з близьких до гармонійних коливань стають релаксаційними, причому амплітуда коливань збільшується, це може призвести до втрати стійкості системи і вимирання одного з видів.

6.7 Матричні моделі

Використання матричного числення для опису зростання складних популяцій почалося в основному після праць Леслі (Уільямсон, 1975). Матричні моделі є сім'єю таких моделей, реалістичність яких певною мірою принесена в жертву тим перевагам, які дає специфіка математичного опису моделі. Вони є однією із зручних форм опису систем, популяцій для практичних обчислень.

Матриця є прямокутною таблицею, розміром $i \times j$, де i – число рядків; j – число стовпців (наприклад, 3×4). Кожне з $i \times j$ чисел називається елементом. Якщо в цілому матриця позначається A , то a_{ij} – це елемент i -го рядка, j -го стовпця A .

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{vmatrix} \quad (6.56)$$

Матриці бувають декількох типів: квадратні, одиничні, нульові, симетричні. Крім того, існують матриці вектор–стовпець і вектор–рядок, а також що складаються з одного елемента – скаляра, наприклад, $A=3$.

Записувати масиви чисел у вигляді матриць зручно, оскільки це дозволяє оперувати з ними так само, як і зі звичайними числами, тобто скалярами. Наприклад, складання і віднімання двох матриць полягає у складанні або відніманні всіх відповідних елементів цих матриць. Множення і ділення матриць не такі прості, але теж являють собою цілком певні математичні операції. Матрична алгебра є однією із найважливіших областей сучасної математики і екологам, що використовують системний аналіз, необхідно її знати.

Квадратні матриці мають одну важливу властивість: для будь-якої такої матриці існують власні числа (λ) і власні вектори (v), які задовольняють рівняння $A \cdot v = \lambda \cdot v$, де A – квадратна матриця; v – вектор стовпець; λ – скаляр, головне власне число. У загальному випадку, якщо матриця має розмір $n \times n$, існує n власних чисел і векторів. Вони виконують важливу роль при з'ясуванні специфічних властивостей початкової матриці. Існує багато методів їх визначення і, як правило, без ЕОМ це неможливо.

Один із ранніх варіантів матричної моделі був розроблений Люїсом і Леслі на початку сорокових років ХХ ст. Як детерміністська модель вона передбачає майбутню вікову структуру популяції самок за відомою зараз структурою, часу і гіпотетичними коефіцієнтами виживання і плодючості. Популяцію розбивають на $n+1$ вікових груп (тобто $0, 1, 2, \dots, n$), причому кожна група складається з особин одного віку так, що найстарша група або група в якій усі тварини доживають до даного віку має вік n . Модель подана матричним рівнянням

$$\begin{pmatrix} f_0 & f_1 & f_2 & \dots & f_{n-1} & f_n \\ P_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & & & & & \\ \dots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{n-1} & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} n_{i,0} \\ n_{i,1} \\ n_{i,2} \\ n_{i,3} \\ \dots \\ \dots \\ n_{i,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{i+1,0} \\ n_{i+1,1} \\ n_{i+1,2} \\ n_{i+1,3} \\ \dots \\ \dots \\ n_{i+1,n} \end{pmatrix} \quad (6.57)$$

Згідно з цим рівнянням чисельності тваринних вікових класів у момент часу $t+1$ можна одержати, помноживши чисельності вікових класів у момент часу t на матрицю, елементами якої є коефіцієнти плодючості і виживання для кожного вікового класу. Величини $f_i (i=0,1,2, \dots, n)$ становлять число самок, народжуваних однією самкою i -го вікового класу, а $p_i (i=0,1,2, \dots, n-1)$ – імовірність того, що самка i -го класу доживе до віку $i+1$. Менш очевидно те, що поведінку цієї моделі можна передбачити, аналізуючи деякі формальні властивості матриці в рівнянні

$$A \cdot a_t = a_{t+1}, \quad (6.58)$$

де a_t – вектор-стовпець, що відображає вікову структуру популяції у момент t , а a_{t+1} – вектор-стовпець, що відображає вікову структуру у момент $t+1$.

Розглянемо просту матричну модель Леслі. Нехай ресурси харчування і місця життєдіяльності популяції необмежені. Проте розмноження в популяції має сезонний характер, і зміна чисельності відбувається в певні моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n . Розіб'ємо популяцію на вікові групи від особин, які щойно народилися, до найстаріших, включивши в кожен групу особин певного віку. Нехай популяція містить n вікових груп. Тоді в кожен фіксований момент часу (наприклад, у момент t_0) популяцію можна охарактеризувати вектор-стовпчиком)

$$X(t_0) = \begin{pmatrix} x_1(t_0) \\ x_2(t_0) \\ \dots \\ x_n(t_0) \end{pmatrix}, \quad (6.59)$$

де $x_1(t_0)$ – чисельність першої вікової групи; $x_2(t_0)$ – чисельність другої вікової групи і так далі.

Вектор $X_1(t)$, що характеризує популяцію у наступний момент часу, наприклад, через 1 рік, буде пов'язаний із вектором $X_0(t)$ за допомогою деякої матриці переходу A : $X_1(t) = AX_0(t)$. Встановимо вид цієї матриці.

Зі всіх вікових груп виділимо ті, які дають нащадків. Нехай їх номери будуть $k, k+1, \dots, k+r$. Припустимо, що за проміжок часу від t_0 до t_1 особини i -ї групи переходять у групу $t+1$. Від групи $k, k+1, \dots, k+r$ з'являються нащадки, а частина особин (взагалі кажучи, від всіх груп) гине.

Складемо вектор $X_1(t_1)$. Його першою компонентою $x_1(t_1)$ є чисельність особин, що народилися у проміжок від t_0 до t_1 . Ця чисельність дорівнює сумі

нащадків від усіх репродуктивних вікових груп. Вважатимемо, що чисельність нащадків від окремої групи пропорційна чисельності цієї групи. Тоді нащадки від i -ї групи дорівнюватимуть $\alpha_i x_i(t_0)$, де α_i – коефіцієнт пропорційності. Усі нащадки, що з'явилися за проміжок від t_0 до t_1 , дорівнюють сумі $\sum_{i=k}^{k+p} \alpha_i x_i(t_0)$.

Отже,

$$x_1(t_1) = \sum_{i=k}^{k+p} \alpha_i x_i(t_0) = \alpha_k x_k(t_0) + \alpha_{k+1} x_{k+1}(t_0) + \dots + \alpha_{k+p} x_{k+p}(t_0).$$

Друга компонента виходить із урахуванням двох процесів. Перший – перехід особин, що знаходилися у момент часу t_0 в першій групі, у другу групу. Друга – можлива загибель частини з цих особин. Тому друга компонента $x_2(t_1)$ дорівнює не всій чисельності $x_1(t_0)$, а тільки деякій її частині $\beta_1 x_1(t_0)$, де $0 < \beta_1 < 1$.

Аналогічно отримуємо третю компоненту (вона дорівнює $\beta_2 x_2(t_0)$) і решту. Для простоти припустимо, що всі особини, що знаходилися у момент t_0 в останній віковій групі, до моменту t_1 загинуть. Тому остання компонента вектора $X(t_1)$ складається лише з тих особин, які до моменту t_1 перейшли із попередньої вікової групи і ще не загинули:

$$x_n = \beta_{n-1} x_{n-1}(t_0), \text{ де } 0 < \beta_n < 1.$$

Коефіцієнти α_i і β_i відображають внутрішні особливості популяції. Перші з них – коефіцієнти народжуваності, другі – виживання.

Таким чином, вектор $X(t_1)$ дорівнює

$$X(t_1) = \begin{pmatrix} x_1(t_1) \\ x_2(t_1) \\ \dots \\ x_n(t_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=k}^{k+p} \alpha_i x_i(t_0) \\ \beta_1 x_1(t_0) \\ \dots \\ \beta_{n-1} x_{n-1}(t_0) \end{pmatrix}. \quad (6.60)$$

Легко бачити, що вектор $X(t_1)$ отримується множенням вектора $X(t_0)$ на матрицю:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \alpha_k & \alpha_{k+1} & \alpha_{k+p} & 0 & 0 & 0 \\ \beta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{n-1} & 0 \end{pmatrix}.$$

По діагоналі матриці стоять нулі; під діагональними елементами стоять відповідно $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}$; у першому рядку на місці елементів із номерами до k , $k+1, \dots, k+p$ стоять відповідно $\alpha_k, \alpha_{k+1}, \dots, \alpha_{k+p}$. Решта всіх елементів цієї

матриці дорівнює нулю. Якщо розбиття на вікові групи проведене так, що до відтворення нащадків здатні всі групи, включаючи першу і останню, то у відповідній матриці A всі елементи першого рядка будуть відмінні від нуля. Таким чином,

$$X(t_1) = AX(t_0).$$

Розглядаючи наступний момент, ми застосуємо до вектора $X(t_1)$ ті самі міркування і отримаємо

$$X(t_2) = AX(t_1) = AAX(t_0) = A^2X(t_0).$$

Аналогічно

$$X(t_k) = AX(t_{k-1}) = AA\dots AX(t_0) = A^kX(t_0). \quad (6.61)$$

З останньої формули видно, що, знаючи структуру матриці і початковий стан популяції (вектор – стовпець $X(t_0)$), можна прогнозувати стан популяції в будь-який наперед заданий момент часу t_k .

Матриця A – квадратна із $n+1$ рядками і стовпцями, тому вона має $n+1$ власних чисел та власних векторів. Елементи A – додатні числа або нулі, оскільки ні α_i , ні β_i не можуть набувати від’ємних значень. Можна показати, що в цьому випадку найбільше власне число і всі координати відповідного йому власного вектора також додатні і мають певний екологічний сенс. А найголовніше власне число дає швидкість, з якою зростає розмір популяції, коли її вікова структура стабілізувалася.

Для того щоб матриця Леслі була нерозкладною, тобто ніякою перестановкою рядків і відповідних стовпців не могла бути приведена до вигляду

$$L = \begin{vmatrix} A & 0 \\ C & B \end{vmatrix},$$

де A і B – квадратні підматриці, необхідно і достатньо, щоб $\alpha_n \neq 0$. Екологічно ця умова означає, що як n -на вікова група виступає не максимально можливий, а найбільш репродуктивний вік особин. Характеристичне рівняння системи (6,31) має вигляд

$$P(\lambda) = \|L - \lambda E\| = \lambda^n - \alpha_1 \lambda^{n-1} - \alpha_2 \beta_1 \lambda^{n-2} - \alpha_3 \beta_1 \beta_2 \lambda^{n-3} - \dots - \alpha_n \prod_{i=1}^{n-1} \beta_i, \quad (6.62)$$

де E – одинична матриця.

Матриця Леслі не від’ємна і нерозкладна, і тому характеристичне рівняння має дійсне додатне характеристичне число, максимальне серед усіх характеристичних чисел і є простим коренем цього рівняння. Це число і є головним власним числом матриці. Крім того, оскільки $\alpha_n \neq 0$, рівняння не має нульових коренів. Із цих умов випливає, що асимптотичний розв’язок системи для досить великих k визначатиметься власним числом λ_1 (максимальним зі всіх) і відповідним йому власним вектором b_1 матриці Леслі:

$$X(k) = c_1 b_1 \lambda_1^k,$$

де c_1 – деяка стала, залежна від координат початкового розподілу вектора $X(0)$.

Якщо $\lambda_1 > 1$, то популяція зростає ($X(k)$ збільшується із зростанням k); якщо $\lambda_1 < 1$, то популяція гине (старіє); нарешті, якщо $\lambda_1 = 1$, то загальна чисельність популяції асимптотика прагне до постійної величини. Можна показати, що $r_1(1) < 0$ еквівалентно виразу $\lambda_1 > 1$, тобто умові зростання популяції, аналогічно $r(1) > 0$ відповідає загибелі, а $r(1) = 0$ – стаціонарній чисельності популяції. Таким чином, за виглядом матриці L без визначення максимального власного значення λ_1 можна робити якісні висновки про характер модельованої популяції у часі.

Як приклад розглянемо просту модель Уїльямсона (1981):

$$\begin{pmatrix} 0 & 9 & 12 \\ 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{t+n,0} \\ n_{t+n,1} \\ n_{t+n,2} \end{pmatrix}. \quad (6.63)$$

Початкова популяція складається з однієї самки старшого віку, що відбито у векторі–стовпці в лівій частині рівняння. Після одного часового інтервалу в популяції буде вже 12 самок молодшого віку, оскільки

$$\begin{pmatrix} 0 & 9 & 12 \\ 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 12 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6.64)$$

Повторне застосування моделі, коли вектор для попередньої популяції помножується на коефіцієнти плодючості і виживання, дає такі результати:

$$\begin{pmatrix} 0 & 9 & 12 \\ 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 12 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 0 & 9 & 12 \\ 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 36 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 0 & 9 & 12 \\ 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 36 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 24 \\ 12 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6.65)$$

Кожна тварина старшого віку, перш ніж померти, встигає вивести в середньому 12 нащадків, кожна тварина середнього віку, перш ніж померти або перейти в наступний клас (імовірність цих подій однакова), виводить у середньому 9 нащадків. Молоді особини не народжують потомства і з імовірністю 1/3 потрапляють до середньої вікової групи.

На рис. 6.13 в логарифмічному масштабі показані зміни чисельності кожної вікової групи для перших 20 часових інтервалів. З моменту часу, до якого спостерігаються коливання чисельності, передбачені численності експоненціально зростають, причому співвідношення між чисельностями тварин різного віку залишається постійним.

Головне власне число і власний вектор можна знайти простим методом послідовних наближень. Головне власне число дає швидкість, з якою зростає розмір популяції, в нашому випадку це 2, тобто за кожен часовий інтервал розмір популяції подвоюється. У загальному випадку, якщо λ – головне власне число,

$$A \cdot v = \lambda \cdot v, \quad (6.66)$$

де v – стійка вікова структура популяції, причому чисельність вікових класів представлена у вигляді відносних величин. Якщо побудувати графік залежності логарифма розміру популяції (чисельності) від часу, то нахил цього графіка після досягнення стійкої структури буде дорівнювати $Ln\lambda$ – внутрішній швидкості природного приросту.

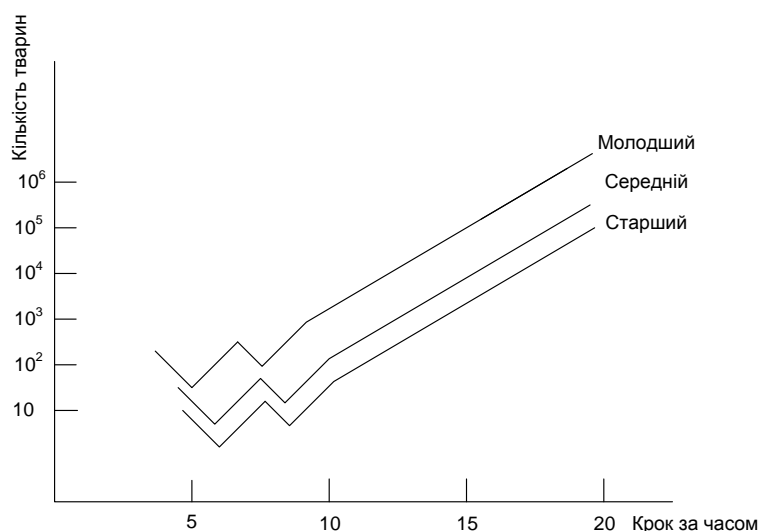


Рисунок 6.13 – Прогноз чисельності самок молодшого, середнього і старшого віку

Знаючи головне власне число, можна за рівнянням оцінити також число особин, яких необхідно вилучити з популяції, щоб розмір її став рівний початковому (тут H – частка особин, %, що вилучаються з популяції).

$$H = 100 \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda} \right), \quad (6.67)$$

У свою чергу, відповідний головному власному числу власний вектор відображає стійку вікову структуру популяції.

$$\begin{pmatrix} 24 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6.68)$$

У нашому прикладі цей вектор свідчить про те, що між чисельністю тварин молодшого, середнього і старшого вікових класів у популяції, що досягла стійкої вікової структури, є певне співвідношення.

Останніми роками розроблено велику кількість матричних моделей різних біоценозів. Це обумовлено перевагами матричної алгебри – одного з могутніх і дієвих інструментів сучасної математики. Апарат матричної алгебри дозволяє компактно записувати рівняння і вирази, полегшує запам'ятовування цих виразів, істотно спрощує процедуру знаходження розв'язків складних задач. Крім того, машинні мови високого рівня мають зручні інструкції для

виконання матричних обчислень. Незважаючи на громіздкість матричних обчислень, їх, як правило, легше запрограмувати, ніж розрахунки за динамічними моделями.

Вище ми зупинилися на екологічній інтерпретації головного власного числа і відповідного йому власного вектора матриць. Решта власних чисел і власних векторів може характеризувати стійкість і коливальні тенденції в моделях.

Достатньою умовою для існування періодичних змін загальної чисельності служать вирази

$$\lambda_1 > \max\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}\}, \text{ або } \lambda_1 < \min\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}\},$$

де β_i – елементи матриці L , що стоять під головною діагоналлю (6.65).

Таким чином, існування періодичності залежить від часового кроку моделі. Якщо в популяції не спостерігається коливань, необхідно розглядати досить великі вікові групи з ненульовою народжуваністю. У той самий час для популяцій, життєвий цикл яких закінчується єдиним репродуктивним актом ($\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n, \alpha_n \neq 0$), модель Леслі може дати лише асимптотично циклічні траєкторії, відповідні коливанням загальної чисельності.

Один із прикладів застосування моделі Леслі – опис вікової структури популяції вівсюнца Шелла – дрібнодерновинного злаку північних лугових степів. Модель побудована на підставі даних спостережень А. Н. Чебураєвої (1977) на 200 майданчиках 0,5 х 0,5 м в Попереченському степу Пензенської обл. Розенберг Г. С. виділяє три групи особин: 1) проростки, прегенеративні і генеративні особини; 2) субсенільні і 3) сенільні.

При побудові матриці L були використані деякі загальні уявлення про вікові особливості рослин. Так, коефіцієнти народжуваності α_i – при переході від першої групи (що включає всі генеративні стани) до «немолодих» і старіших рослин повинні зменшуватися. У сенільному стані при відновленні вегетації реалізується деяке дуже незначне число бруньків. Коефіцієнти виживаності β_i взяті приблизно однаковими (з першої групи в другу переходить половина особин, з другої у подальшу – трохи менше). Матриця Леслі має вигляд

$$L = \begin{vmatrix} 0,6 & 0,3 & 0,1 \\ 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4 & 0 \end{vmatrix}.$$

Характеристичне рівняння для моделі являє собою поліном третього ступеня $P(\lambda) = \lambda^3 - 0,6\lambda^2 - 0,15\lambda - 0,02 = 0$.

$P(1) = 0,23 > 0$, що свідчить про «старіння» даної популяції на спостережуваному інтервалі часу. Власні значення характеристичного рівняння рівні: $\lambda_1 = 0,814$; $\lambda_2 = -0,107 \pm 0,112i$; де i – уявна одиниця. Таким чином, характеристичне рівняння має один дійсний і два комплексно–спряжених корені; λ_1 є максимальним коренем цього рівняння, а оскільки $\lambda_1 < 1$, висновок про «зів'янення» даної популяції залишається без змін. Крім того, необхідно очікувати існування коливань чисельності вівсюнца, оскільки $\lambda_1 > \max(0,5; 0,4)$.

Таким чином, модель Г. С. Розенберга пояснює явища, що спостерігаються в природі – старіння популяції вівсюнця Шелла і наявність коливань у розподілі особин за віковим спектром упродовж ряду років. Більш задовільний прогноз впливає, якщо урахувати залежність коефіцієнтів матриці Леслі від погодних умов.

У рамках моделі Леслі була досліджена вікова структура сосни в Шотландії. Використання цієї моделі дозволило пояснити періодичність «конюшинових років» на заплавах р. Оки. Конюшина червона (*Trifolium pratense*) і рожева (*Trifolium hybridus*) домінують тут у травостой з періодичністю у 5–6 років. При сприятливих для цих бобів роках велика частина особин добре розвинена, утворює численні генеративні паростки, упродовж одного-двох років завершує свій життєвий цикл і відмирає (тобто має місце ситуація: всі $\alpha_i = 0$, окрім α_n).

Урахування залежності коефіцієнтів народжуваності і виживаності від чисельності дозволяє описати моделями типу Леслі ще тонші ефекти в розвитку популяції.

6.8 Оптимізаційні моделі

Описані в цьому розділі моделі, як правило, вважаються менш прийнятними для вирішення екологічних завдань, до того ж вони стали використовуватися порівняно недавно. Проте для фахівця з системної екології дуже важливо уявляти собі можливості моделей, коли робота знаходиться на стадії вибору шляху розв'язання задачі. Таке незвичайне слово «оптимізація» вигадане для того, щоб позначити відшукання максимуму або мінімуму якогось математичного виразу або функції, коли деякі її змінні ми можемо змінювати в певних межах. Якби ми хотіли знайти тільки максимум, ми могли б назвати процес максимізацією – словом, яке врешті-решт прийнятніше. І навпаки, відшукуючи тільки мінімум, ми могли б використовувати слово мінімізація. Математично одну з цих операцій завжди можна перетворити на іншу, отже в тому, що обидва процеси розглядаються як один, є певна логіка. Практично будь-які моделі можуть бути використані при відшуванні тих або інших максимумів або мінімумів. Чи буде це використання мати зміст, цілком залежить від конкретного завдання, але такі ситуації, коли необхідно вивчити можливість збільшення продуктивності деякої екологічної системи шляхом зміни навколишнього середовища або зміни методів управління, виникають в екології досить часто. Одна з головних причин застосування моделей у тому і полягає, що ми повинні уміти передбачати результати цих змін.

За допомогою динамічної моделі, наприклад, ріст дріжджів у змішаній культурі, описаній за допомогою диференціальних рівнянь, ми можемо спробувати визначити співвідношення між початковими кількостями двох видів дріжджів, при якому продукується максимум дріжджових клітин. Визначивши експериментально основні параметри моделей, ми можемо подальші експерименти з метою відшування потрібних співвідношень проводити вже на моделях.

У матричних моделях, експериментуючи з декількома різними віковими структурами популяції і інтенсивностями її експлуатації, ми можемо визначити оптимальне значення деякої цільової функції, хоча самі матричні методи за заданих початкових умов визначають стаціонарні стани та коефіцієнти збору врожаю.

Цікаві можливості для експериментування надають і стохастичні моделі. Моделюючи поведінку зміни екосистем верхового болота, можна досліджувати вплив зміни перехідної ймовірності на тривалість часу, протягом якого досліджувана ділянка залишається в якомусь конкретному стані, застосовуючи для цих цілей матриці перехідної ймовірності.

Важче, мабуть, передбачити оптимізацію в багатовимірних моделях, але, принаймні в одному сенсі ці моделі вже виявляють оптимальні умови, що визначають зв'язки. Так, наприклад, дискримінантні функції є лінійними функціями початкових змінних, що забезпечують якнайкращу (тобто оптимальну) дискримінацію між апріорними групами. Аналогічним чином канонічні кореляції визначають такі лінійні функції двох наборів змінних, що володіють найбільшими кореляціями.

Абсолютно природним, проте, є бажання сформулювати модель так, щоб полегшити відшукання оптимальної комбінації ключових змінних, і основні математичні формулювання такого роду були розроблені незалежно в тих ранніх додатках математичних методів до практичних завдань, які відомі зараз під назвою «дослідження операцій». Ще до появи написання інструкцій для ЕОМ до вжитку ввійшов вираз «математичне програмування», яке в найбільш простій формі відоме під назвою «лінійне програмування». У цій моделі центральне місце може займати лінійна цільова функція

$$Y = A_1 \cdot X_1 + A_2 \cdot X_2 + \dots + A_n \cdot X_n = \sum A_t \cdot X_t \quad (6.69)$$

і для цієї моделі визначається максимум або мінімум функції при одному або більше обмеженнях, які також виражені у вигляді лінійних функцій, хоча початково це можуть бути просто нерівності, наприклад

$$b_1 \times X_1 + b_2 \times X_2 \geq Z. \quad (6.70)$$

Часто є неявні обмеження, що полягають у тому, що X_i не можуть бути від'ємними.

Коли змінних лише дві, задача оптимізації такого роду досить легко розв'язуються графічними методами. Для більш ніж двох змінних задача сильно ускладнюється, і звичайний підхід до її розв'язання припускає використання так званого «методу» симплексу. Насамперед шляхом введення допоміжних змінних, обмеження, виражені у вигляді нерівностей, замінюються лінійними рівняннями. Проте обмеження, що полягають у тому, що всі змінні повинні бути більше нуля, залишаються тими самими. Потім шукається будь-який допустимий розв'язок задачі, і, як тільки він знайдений, ітеративним методом намагаються поліпшити цей розв'язок, тобто наблизити його до певного оптимуму цільової функції за допомогою малих змін значень змінних. Ця ітеративна процедура триває доти, поки не можна буде одержати ніякого

подальшого поліпшення.

Одна з переваг оптимізаційних моделей полягає в тому, що вони завжди висвітлюють два важливі аспекти проблеми. Одержаний розв'язок дає значення змінних цільової функції, при яких ця функція досягає максимуму або мінімуму, залежно від того, яке поставлене завдання. Проте, крім того, метод указує й те обмеження, яке потрібно ослабити, щоб поліпшити оптимальне значення цільової функції. Внаслідок цього експериментатор може ретельніше перевірити постановку завдання і, зокрема, свої оцінки коефіцієнтів при змінних в цільовій функції та природу зазначеного обмеження. Якщо виявиться, що можна поліпшити оцінки або ослабити обмеження, то він зможе знайти ще кращий розв'язок.

Як приклад розглянемо оптимальні стратегії хижака. Припустимо, що хижак існує в кублі в точці A і є два потенційні джерела їжі, розташовані на ділянках B і C . Час, необхідний для того, щоб дістатися до ділянок B і C та повернутися з одиницею здобичі, дорівнює двом і трьом хвилинам відповідно. З іншого боку, на ділянці B хижак витрачає на упіймання здобичі x_1 дві хвилини, тоді як на ділянці C йому потрібна лише одна хвилина, щоб зловити одиницю здобичі x_2 . Енергетична цінність однієї одиниці x_1 оцінюється в 25 Дж, а одиниці x_2 – 30 Дж.

Якщо ми введемо тепер обмеження, що полягає в тому, що на шлях із кубла в будь-якій з ділянок і назад хижак може витратити не більше 120 хвилин на добу і що на пошук жертв він може витратити не більше 80 хв на добу, то ми дійдемо класичного завдання лінійного програмування. Згадані обмеження записуються у вигляді нерівностей:

$$2x_1 + 3x_2 \leq 120 \text{ – для часу в дорозі;}$$

$$2x_1 + 1x_2 \leq 80 \text{ – для часу пошуку їжі.}$$

Потрібно записати також неявні обмеження $x_1 \geq 0$, $x_2 \geq 0$, оскільки хижак не може зловити від'ємне число жертв. При цих обмеженнях ми хочемо максимізувати цільову функцію

$$Z = (25x_1 + 30x_2) \text{ Дж.}$$

Цю задачу легко розв'язати графічно, скориставшись записаними у вигляді нерівностей обмеженнями. Обмеження за часом у дорозі показує, що якщо x_1 дорівнює нулю, то x_2 може бути не більше 40 одиниць. Так само, якщо x_2 дорівнює нулю, то x_1 може бути не більше 60 одиниць. Комбінації граничних значень x_1 і x_2 можна подати у вигляді прямої, що сполучає дві точки – $(x_1 = 60; x_2 = 0)$ і $(x_1 = 0; x_2 = 40)$ (рис. 6.14).

Застосувавши аналогічні міркування до обмеження за часом пошуку їжі, ми одержимо, що якщо x_1 дорівнює нулю, то x_2 не може перевищувати 80 одиниць, а якщо x_2 дорівнює нулю, то не може бути більше 40 одиниць.

Усі розв'язки, що мають сенс, лежать, таким чином, у чотирикутнику $OPQR$ (див. рис. 6.14), а максимум цільової функції досягається в точці, яка найбільш віддалена від початку координат у напрямі, показаному стрілкою. Ця точка має координати $(x_1 = 30; x_2 = 20)$, отже, максимальне значення цільової функції дорівнює $Z = 25x_1 + 30x_2 = 1350$ Дж.

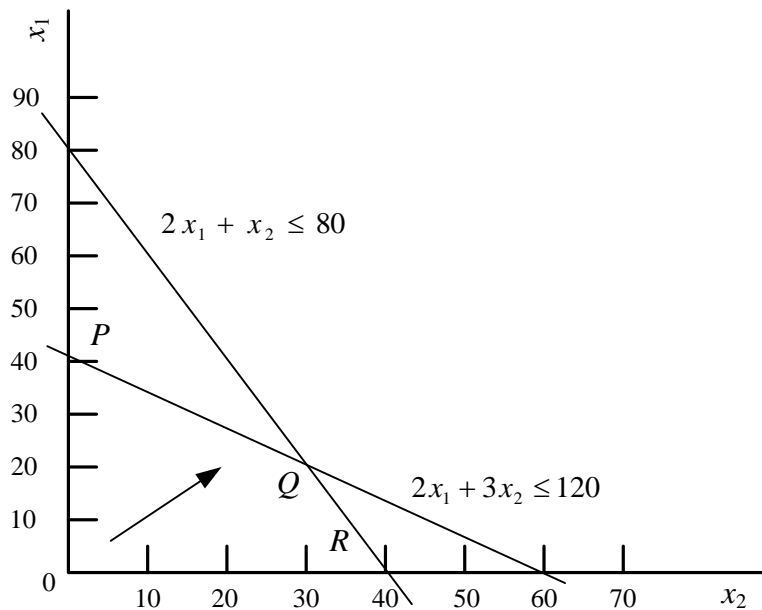


Рисунок 6.14 – Графічне розв'язання простої задачі лінійного програмування

Можна самостійно перевірити, як впливає ослаблення одного або обох обмежень на цільову функцію, маючи на увазі, що найважливішим при оптимізації часто є знаходження того обмеження, ослаблення якого дозволяє знайти ще кращий розв'язок.

Цей приклад, зрозуміло, дуже простий, і графічний метод розв'язання звичайно можна застосовувати лише у тому разі, коли цільова функція і обмеження залежать від двох змінних; щоправда, такі розв'язки нерідко можна знайти і для випадку декількох обмежень. Проте є ефективні алгоритми для розв'язання задач лінійного програмування й особливо для тих завдань, які виникли і сформульовані як завдання про перевезення, пов'язані з оптимізацією транспортування різних матеріалів і корисних копалини. Проте існує безліч екологічних проблем, які можна виразити через моделі лінійного програмування. Більшість цих проблем пов'язана з управлінням природними ресурсами в сільському господарстві та лісоводстві, де лінійне програмування застосовується в дослідженнях з управління і планування лісових запасів, при економічному аналізі заходів щодо поліпшення якості деревних лісових порід і при аналізі розвитку сільськогосподарських підприємств і т. п. Проте не всі завдання можна подати через лінійні цільові функції і лінійні обмеження, особливо в екологічних дослідженнях. Нелінійність же цих функцій або обмежень – або і того, й іншого – дуже сильно утрудняє відшукування розв'язків. До таких самих труднощів призводять і постановки завдань, при яких накладаються певні обмеження на розміри скупчень, у яких можуть бути зосереджені одиниці якихось конкретних ресурсів. У зв'язку з цим була розроблена теорія нелінійного програмування, хоча екологічних моделей, побудованих виключно на основі цієї теорії, досить мало.

Іноді великомасштабні проблеми оптимізації можна підрозділити на ряд дрібніших завдань, що створюють послідовність у часі або в просторі, або навпаки. Подібні постановки завдань часто дозволяють спростити процедуру

відшукування розв'язків, при цьому потрібно спеціально перевіряти, чи дає послідовність оптимальних розв'язків підзадач наближення оптимального розв'язку повної проблеми. Такий пошук якнайкращого розв'язання на кожному етапі відомий під назвою «динамічного програмування». Математичний апарат, що використовується в таких моделях, досить складний, і тому приклади їх успішного застосування в екології нечисленні. У праці Уатта (1971) розглядається застосування динамічного програмування для визначення стратегій боротьби зі шкідниками. Шрайдер (1968) описує модель, яка дає рекомендації щодо капіталовкладень у лісоводстві, від саджання дерев до отримання річної продукції однієї або декількох первинних деревообробних галузей.

6.9 Ігрові моделі

Часто виникають ситуації, в яких різні учасники мають не збіжні між собою інтереси. Математичні моделі та методи для дослідження таких «конфліктних» ситуацій одержали назву теорії ігор.

Наведемо прості поняття і наслідки цієї теорії. Під словом «гра» розуміють сукупність правил, керуючись якими гравці-учасники приймають рішення. Припустимо, що результатом гри є платня, яку, відповідно до правил, учасник, що програв, платить тим, хто виграв. Для простоти обмежимося спочатку так званою «грою двох осіб із нульовою сумою». Для того щоб повністю визначити таку гру, потрібно задати таблицю платежів – платіжну матрицю, наприклад таку матрицю розміром 3x4:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|c|c|}
 \hline
 5 & 4 & 8 & 9 \\
 \hline
 A & 0 & -1 & 5 & 7 \\
 \hline
 1 & -2 & 3 & 6 \\
 \hline
 \end{array} \\
 B
 \end{array}$$

Цей запис означає, що гравець A обирає один із рядків цієї матриці, а гравець B , не знаючи вибору A , обирає один зі стовпців матриці. Число на перетині вибраних рядка і стовпця визначає виграш першого гравця (відповідно програш другого). Наприклад, якщо A вибрав другий рядок, а B – третій стовпець, то A виграв 5 одиниць, а B їх програв. Якщо ж A вибрав третій рядок, а B – другий стовпець, то A програв 2 одиниці, а B їх виграв.

Вважатимемо, що мета кожного із гравців полягає в максимізації найменшого можливого виграшу (відповідно мінімізації найбільшого можливого програшу). Основне питання, що виникає в теорії ігор: чи існує якнайкращий спосіб гри у кожного із гравців, тобто чи є у них оптимальні стратегії.

Перш ніж сформулювати відповідь, повернемося до даної матриці. Відразу бачимо, що гравцю A найвигідніше вибрати перший рядок, оскільки всі її елементи більші за відповідні елементи решти рядків. Так само гравцю B найвигідніше обрати другий стовпець, оскільки всі елементи цього стовпця

менші за відповідні елементи решти стовпців. Отже, в даному прикладі оптимальними стратегіями будуть такі: для A – вибір першого рядка, а для B – вибір другого стовпця. Число 4, що стоїть на припиненні першого рядка і другого стовпця, носить назву *ціни гри*, тобто платні, яку одержує оптимально граючий гравець. Таким чином, в даному прикладі гарантований виграш A – не менше 4 одиниць і гарантований програш B – не більше 4 одиниць (він дорівнює 4 одиницям, якщо обидва гравці грають оптимально).

Якщо виявляється, що для цієї платіжної матриці мінімум у якому-небудь рядку збігається з максимумом у якому-небудь стовпці, то ці рядок і стовпець називаються *оптимальними*, а їх перетин – *сідловою точкою* платіжної матриці. Відповідне число і буде ціною гри.

Проте далеко не кожна матриця має сідлову точку, наприклад, матриця

$$A \begin{array}{|c|} \hline 01 \\ \hline 40 \\ \hline \end{array} \\ B$$

сідлової точки не має. Говорити тут про максимізацію найменшого можливого виграшу (мінімізації найбільшого можливого програшу) можна лише під час використання так званої змішаної стратегії при багатократній грі з однією і тією самою платіжною матрицею. Суть цієї стратегії полягає у виборі різних стратегій з певними частотами. Отже, нехай A обирає перший рядок із частотою x , а другий – із частотою $(1 - x)$. Аналогічно для Y відповідні частоти позначимо через y і $(1 - y)$. Тоді середній виграш A , що позначається через $E(x, y)$, дорівнює

$$E(x, y) = 4(1 - x)y + x(1 - y) = x + 4y - 5xy. \quad (6.71)$$

Нас цікавить величина $\max_x \min_y E(x, y)$. Маємо

$$E_y = 4 - 5x, \quad (6.72)$$

звідки $E_y > 0$ при $0 \leq x \leq \frac{4}{5}$, $E_y = 0$ при $x = \frac{4}{5}$ і $E_y < 0$ при $\frac{4}{5} < x \leq 1$. Тоді

$$\min_y E(x, y) = \begin{cases} E(x, 1) = x & \text{при } 0 \leq x \leq \frac{4}{5} \\ \frac{4}{5} & \text{при } x = \frac{4}{5} \\ E(x, 0) = 4(1 - x) & \text{при } \frac{4}{5} \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Відповідно

$$\max_x \min_y E(x, y) = \frac{4}{5} \quad (6.73)$$

й оптимальною змішаною стратегією для A буде вибір першого рядка з

частотою $\frac{4}{5}$ та другого рядка – із частотою $\frac{1}{5}$. Середній програш B , позначений $F(x,y)$, дорівнює $-E(x,y)$. Нас цікавить величина $\max_x \min_y F(x,y)$, де

$$F(x,y) = 5xy - x - 4y. \quad (6.74)$$

Маємо $F_x = 5y - 1$, звідки $F_x < 0$ при $0 \leq y \leq \frac{1}{5}$, $F_x = 0$ при $y = \frac{1}{5}$ та $F_x > 0$ при $\frac{1}{5} < y \leq 1$. Тоді

$$\min_x F(x,y) = \begin{cases} F(x,0) = -4y & \text{при } 0 \leq x \leq \frac{1}{5} \\ -\frac{4}{5} & \text{при } x = \frac{1}{5} \\ F(1,y) = y - 1 & \text{при } \frac{1}{5} \leq y \leq 1 \end{cases}$$

(графік на рис. 6.15). Відповідно

$$\max_x \min_y F(x,y) = -\frac{4}{5} \quad (6.75)$$

й оптимальною стратегією для A буде вибір першого стовпця з частотою $\frac{1}{5}$, й другого стовпця – із частотою $\frac{4}{5}$. При оптимальних змішаних стратегіях виграш A і відповідно програш B у п'ять разів менший за максимально можливий під час одиночної гри.

Відзначимо також, що в розглянутому прикладі ми показали існування оптимальних стратегій і встановили рівність

$$\max_y \min_x E(x,y) = \max_x \min_y E(x,y) = \frac{4}{5}; \quad (6.76)$$

при цьому величину $E(x,y)$ можна трактувати як математичне сподівання виграшу, а величину $v = \frac{4}{5}$ визначити як ціну гри.

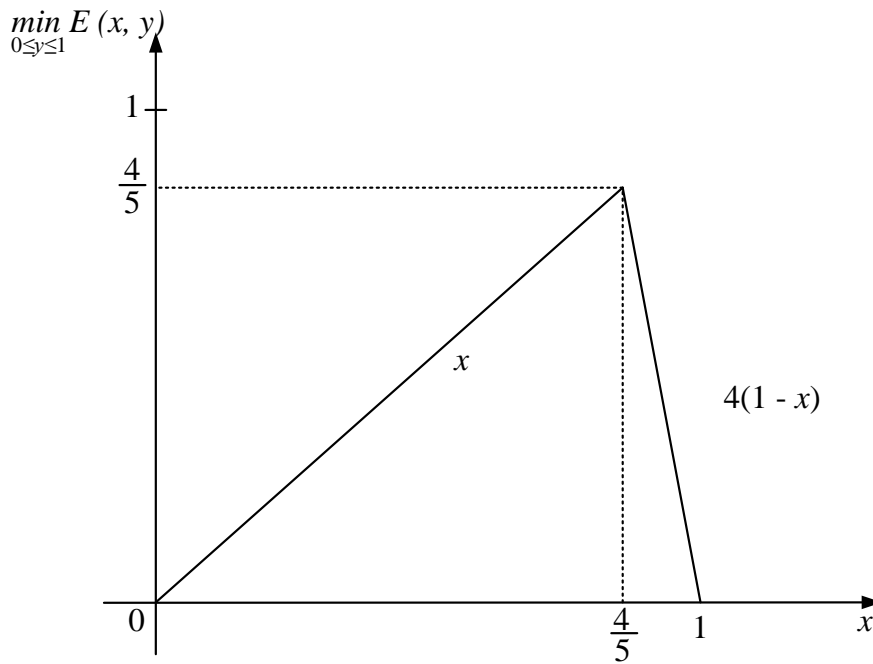


Рисунок 6.15 – Графік функції $\min_{0 \leq y \leq 1} E(x, y)$

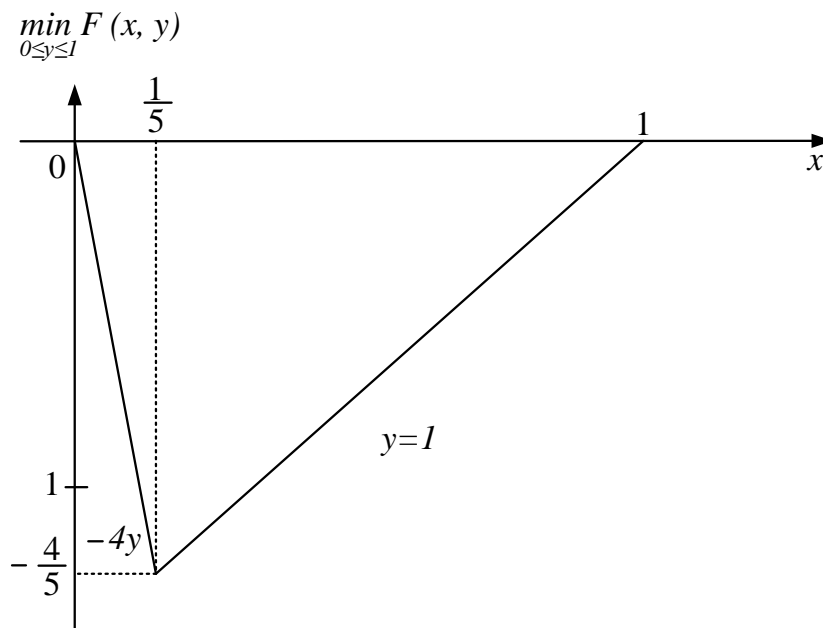


Рисунок 6.16 – Графік функції $\min_{0 \leq y \leq 1} F(x, y)$

Розглянемо тепер загальний випадок прямокутної матриці

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & \dots & c_{mn} \end{pmatrix}.$$

При будь-якій допустимій стратегії гравця A : $x_1 \geq 0, \dots, x_m \geq 0, x_1 + x_2 + \dots + x_m = 1$ та будь-якій допустимій стратегії гравця B : $y_1 \geq 0, \dots, y_m \geq 0, y_1 + y_2 + \dots + y_m = 1$ математичне сподівання виграшу дорівнює

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_i y_j. \quad (6.77)$$

Безліч допустимих стратегій $x = (x_1, \dots, x_n)$ гравця A позначимо через X , а безліч допустимих стратегій $y = (y_1, \dots, y_n)$ гравця B позначимо через Y .

Розглянуті вище приклади є окремими випадками загальних теорем для ігор із прямокутними матрицями (прямокутними іграми); з них, зокрема, випливає:

1. Величини $\max_{x \in X} \min_{y \in Y} E(x, y)$ та $\max_{y \in Y} \min_{x \in X} E(x, y)$ існують і рівні між собою; при цьому величина

$$\max_{x \in X} \min_{y \in Y} E(x, y) = \max_{y \in Y} \min_{x \in X} E(x, y) = v \quad (6.78)$$

є ціною гри.

2. Будь-яка прямокутна гра має ціну; кожен гравець у прямокутній грі завжди має оптимальну стратегію.

3. Нехай E – математичне сподівання виграшу в прямокутній грі з матрицею C , що має ціну v . Тоді для того, щоб елемент $x^* = (x_1^*, \dots, x_m^*) \in X$ був оптимальною стратегією для гравця A , необхідно і достатньо, щоб для всякого $j = 1, 2, \dots, n$ базисного вектора $y^{(j)} = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ спостерігалася

нерівність

$$v \leq E(x^*, y^{(j)}). \quad (6.79)$$

Аналогічно для того, щоб елемент $y^* = (y_1^*, \dots, y_n^*) \in Y$ був оптимальною стратегією для гравця B , необхідно і достатньо, щоб для будь-якого елемента базисного вектора $x^{(i)} = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ спостерігалася нерівність

$$E(x^{(i)}, y^*) \leq v. \quad (6.80)$$

Покажемо тепер на двох прикладах, як можна застосувати ці твердження для обчислення цін і визначення оптимальних стратегій для прямокутних ігор. Як такі приклади розглянемо стратегії ловлення на вудку і живлення риби.

Уявимо собі, що існування такого виду риби, що живляться біля поверхні води, залежить від наявності трьох видів комах, що літають, яких позначимо через m_1 , m_2 і m_3 відповідно; комахи з'являються в зоні захоплення із частотами $15n$, $5n$ і n (тобто комах m_2 у 5 разів більше, ніж m_3 , а комах m_1 у 3 рази більше, ніж m_2).

Припустимо, що рибалка B ловить рибу A на комах одного із цих видів, насаджуючи їх на гачок. Тоді матриця стратегій C ловлення на вудку і живлення риби має такий вигляд (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Матриця стратегій

Стратегії		Рибалка використовує як наживку		
		m_1	m_2	m_3
Риба живиться	m_1	-2	0	0
	m_2	0	-6	0
	m_3	0	0	-30

На підставі викладених тверджень досить знайти невід’ємні числа $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ і число, що задовольняє такі умови:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1, \quad y_1 + y_2 + y_3 = 1, \quad (6.81)$$

$$v \leq -2x_1, \quad -2y_1 \leq v,$$

$$v \leq -6x_2, \quad -6y_2 \leq v,$$

$$v \leq -30x_3, \quad -30y_3 \leq v.$$

Замінімо останні шість нерівностей на рівність. Тоді маємо

$$x_1 = y_1 = -\frac{v}{2}, \quad x_2 = y_2 = -\frac{v}{6}, \quad x_3 = y_3 = -\frac{v}{30}. \quad (6.82)$$

Підставляючи ці значення в рівність (5.48), одержимо

$$v = -\frac{10}{7}; \quad (6.83)$$

$$x_1 = \frac{5}{7}, \quad x_2 = \frac{5}{21}, \quad x_3 = \frac{1}{21}; \quad (6.84)$$

$$y_1 = \frac{5}{7}, \quad y_2 = \frac{5}{21}, \quad y_3 = \frac{1}{21}; \quad (6.85)$$

Таким чином, ціна гри для риби буде від’ємною і дорівнюватиме $-\frac{10}{7}$.

Вона показує, що врешті-решт риба буде спіймана. При цьому оптимальна стратегія рибалки збігається зі стратегією живлення (також оптимальної) риби і оптимальна стратегія зменшує ймовірність упіймання риби у кожному конкретному випадку.

Дещо ускладнимо завдання. Припустимо, що рибалка іноді використовує приманку m_4 , яка може бути прийнята помилково за одну із трьох комах, але яка вдвічі частіше викликає підозру в риб. Тоді матриця зі стратегій ловлення на вудку і живлення риб набере вигляду табл. 6.2:

Таблиця 6.2 – Матриця стратегій

Стратегії		Рибалка використовує як наживку			
		m_1	m_2	m_3	m_4
Риба живиться	m_1	-2	0	0	-1
	m_2	0	-6	0	-1
	m_3	0	0	-30	-3

Тепер досить знайти невід'ємні числа $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3, y_4$ і число v , що задовольняють такі умови:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 &= 1, & y_1 + y_2 + y_3 + y_4 &= 1, & (6.86) \\ v &\leq -2x_1, & -y_4 - 2y_1 &\leq v, \\ v &\leq -6x_2, & -3y_4 - 6y_2 &\leq v, \\ v &\leq -30x_3, & -15y_4 - 30y_3 &\leq v. \\ v &\leq -x_1 - 3x_2 - 1x_3 \end{aligned}$$

Ліва система нерівності перевизначена, а права недовизначена (у лівій невідомих більше, ніж нерівностей, а в правій менше). Відмітимо, що якщо остання нерівність у правій колонці $-15y_4 - 30y_3 \leq v$ буде виконана при $y_3 = 0$, то її буде виконано і при всіх $y_3 > 0$. Отже, вважаючи $y_3 = 0$, праву систему нерівностей можна замінити системою трьох лінійних рівнянь:

$$-y_4 - 2y_1 = v, \quad -3y_4 - 6y_2 = v, \quad -15y_4 - 30y_3 = v$$

з трьома невідомими y_1, y_2, y_4 . Її розв'язок, очевидно, має вигляд

$$y_1 = -\frac{7v}{15}, \quad y_2 = -\frac{2v}{15}, \quad y_4 = -\frac{v}{15};$$

Підставляючи одержані вирази в рівність (11.32), де $y_3 = 0$, одержимо $-\frac{10}{15}v = 1$, тобто ціна гри для риби від'ємна і дорівнює

$$v = -\frac{10}{15} = -\frac{2}{3}, \quad (6.87)$$

що дещо менше, ніж у попередньому випадку. Оптимальна стратегія рибалки має вигляд

$$y_1 = \frac{7}{10}, \quad y_2 = \frac{2}{10}, \quad y_3 = 0, \quad y_4 = \frac{1}{10}. \quad (6.88)$$

Вивчимо тепер оптимальну стратегію для риби, оскільки $y_3 = 0$, то й $x_3 = 0$, тобто комахи m_3 дуже небезпечні для життя. Тоді із системи чотирьох нерівностей випадають третє і четверте, яке $x_3 = 0$ є наслідком двох перших (їх напівсумою). Таким чином, для визначення x_1, x_2 і v маємо систему трьох рівнянь із трьома невідомими

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1, \quad v = -2x_1, \quad v = -6x_2,$$

звідки

$$x_1 = -\frac{v}{2}, \quad x_2 = -\frac{v}{6},$$

і з урахуванням $x_3 = 0$,

$$-\frac{v}{2} - \frac{v}{6} = -\frac{2}{3}v = 1 \quad v = -\frac{3}{2}. \quad (6.89)$$

Означає, що оптимальна стратегія для риби дорівнює

$$x_1 = \frac{3}{4}, \quad x_2 = \frac{1}{4}, \quad x_3 = 0, \quad (6.90)$$

ціна ж її внаслідок (6.89) дорівнює $-\frac{3}{2}$, тобто збігається з (6.88), що,

також впливає із загальної теорії.

Моделі, що базуються на теорії ігор, є цікавими, але поки що недостатньо вивчений підхід до вирішення стратегічних екологічних завдань. Розроблення теорії для складніших ігор з ненульовою сумою та ігор багатьох осіб, де між гравцями можуть створюватися коаліції, повинна знайти ефективне застосування в екологічних проектах, пов'язаних із плануванням та оцінкою різних дій на навколишнє середовище.

6.10 PEST- та SWOT-аналіз в управлінні екологічними системами

Будь-який екологічний проект з удосконалення функціонування екологічної системи або її окремих елементів та управління системою не може бути спланованим без детального аналізу існуючої ситуації. В той же час існуюча ситуація повинна бути описана з урахуванням інтересів зацікавлених сторін проекту, які часто бачать ситуацію по різному. Аналіз існуючої ситуації складається з аналізу проблем, цілей та стратегій управління розвитком екосистеми. Такий аналіз може здійснюватися різними шляхами із залученням експертів-консультантів. Проте для того, щоб проект задовольняв потреби всіх цільових груп потрібне також залучення до аналізу і представників усіх зацікавлених сторін реалізації проекту.

Аналіз проблем – найбільш важлива частина планування проекту, оскільки саме вирішення проблем є основою для розроблення подальших заходів з управління системою. На підставі аналізу різних факторів, що впливають на розвиток і функціонування системи, формується проблемне поле ситуації.

Проблемне поле – це сукупність проблем, існуючих у системі, їх взаємозв'язок між собою та з факторами зовнішнього та внутрішнього середовища.

Процедура аналізу проблем полягає в точному визначенні рамок та предмета аналізу, аналізі зацікавлених сторін, визначенні проблем та побудови їх ієрархії, дослідженні причинно-наслідкових зв'язків системи за допомогою схеми або так званого «дерева проблем», що ілюструють головну проблему та її вплив у верхній частині, а причини, що викликають проблему, – у нижній.

Розглянемо будову дерева проблем на прикладі нестачі їжі в регіоні (рис. 6.8).

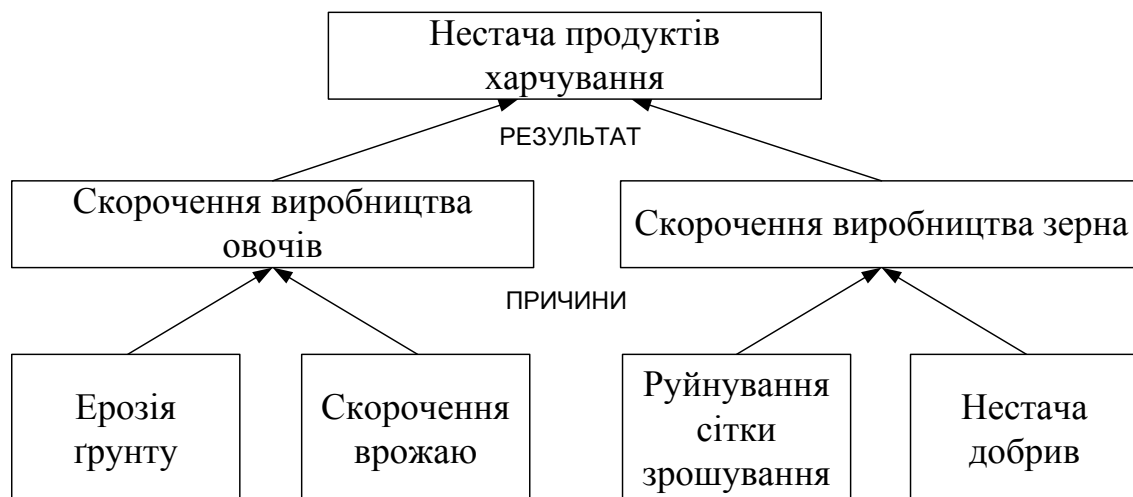


Рисунок 6.8 – Приклад побудови дерева проблем

Дерево проблем може також ураховувати причини причин і бути більш розгалуженим, оскільки кожна причина викликає певний наслідок, який, у свою чергу, є причиною для іншого наслідку, але всі наслідки збігаються до головної проблеми.

Цей підхід визначення поля проблем за допомогою врахування причинно-наслідкового ланцюга може бути поєднаний з політичними, технічними, соціальними та економічними особливостями досліджуваної системи за допомогою PEST-аналізу.

PEST-аналіз (іноді позначають як STEP) – це здебільшого маркетинговий інструмент, призначений для виявлення політичних (P – *political*), економічних (E – *economic*), соціальних (S – *social*) і технологічних (T – *technological*) аспектів зовнішнього середовища, що впливають на досліджувану проблему.

Політика вивчається тому що вона регулює владу, яка, у свою чергу, визначає середовище компанії й отримання ключових ресурсів для її діяльності. Основна причина вивчення економіки – це створення картини розподілу ресурсів на рівні держави, яка є найважливішою умовою фінансування заходів. Не менш важливі споживчі переваги визначаються за допомогою соціального компонента PEST-аналізу. Останнім чинником є технологічний компонент. Метою його дослідження прийнято вважати виявлення тенденцій у технологічному розвитку, які часто є причинами змін і втрат ринку, а також появи нових продуктів, наприклад, ксенобіотиків, супертоксикантів тощо. Розглянемо ці фактори більш детально (рис. 6.9).

Політичне середовище – це один із найважливіших факторів, що необхідно вивчати насамперед для того, щоб мати чітке уявлення про наміри федеральних (муніципальних, місцевих) органів влади щодо розвитку суспільства, регулювання механізму обігу грошей у державі, створення умов ресурсного забезпечення для кожної організації, зміни в законодавстві,

правовому регулюванню й оподатковуванню, а також про те, за допомогою яких засобів владні структури проводитимуть в життя свою політику.

До джерел інформації для аналізу політичного середовища відносять: дані опитувань громадської думки, проведені різними інститутами й громадськими організаціями; доповіді та виступи політичних лідерів й урядових діячів; порядки денні засідань Верховної Ради (парламенту); приватні інтерв'ю державних діячів; програми зустрічей і візитів зарубіжних політиків і представників державної влади провідних країн світу та ін.

Отримана інформація дозволяє скласти загальну картину політичної обстановки в країні, розробити прогноз її розвитку на перспективу і створити власні механізми пристосування до навколишнього середовища. Наприклад, наявна законодавча база та політика у сфері поводження з відходами, викидами та скидами підприємства є основою для прийняття певних управлінських рішень. Недосконалість правової бази та національної політики може створювати також і перешкоди до ефективного управління станом екологічної або соціальної системи та призвести до неможливості вирішення проблеми.

Економічне середовище – один із найважливіших факторів, що визначають нормальне функціонування будь-якої організації. Так, стан світової економіки може сильно впливати на вартість ресурсів, необхідних для реалізації заходів з управління системою. По суті, аналіз економічної складової макросередовища спрямований на розуміння того факту, як формуються і розподіляються ресурси. Слабка економіка держави різко зменшує можливості забезпечувати ефективність упровадження заходів з управління системою. Наприклад, під час виробництва продукції першочерговими є завдання отримання максимального прибутку за рахунок скорочення витрат на природоохоронні заходи, зменшення впливу виробництва на екосистеми і відновлення порушених унаслідок виробництва екосистем. Серед основних показників, що аналізуються під час вивчення економіки, можна назвати такі: величина валового національного продукту, темпи інфляції, рівень зайнятості, платіжний баланс, темп економічного зростання, рівень безробіття, процентні ставки, продуктивність праці, рівні оподаткування, норми накопичення тощо.

У процесі аналізу економічного фактора потрібно приділяти також увагу таким показникам, як рівень економічного розвитку, добувні природні ресурси, рівень розвиненості конкуренції, структура населення, рівень освіченості робочої сили, розмір заробітної плати та ін. Аналіз економічного фактора повинен проводитися системно і бути спрямованим на його комплексну оцінку з метою встановлення існування можливостей для ефективної діяльності організації.

Соціальне середовище враховує інформацію, що стосується таких факторів, як: демографічні, соціальна захищеність населення, охорона праці і здоров'я трудящих, традиції, домінуючі життєві цінності й установки людей та ін. Одним із важливих аспектів є медико-демографічний, оскільки забруднення довкілля та порушення рівноваги екосистем може відбитися на здоров'ї людей.

Технологічне середовище є одночасно внутрішньою змінною і зовнішнім фактором великого значення. Швидкість зміни технології постійно

збільшується. При цьому аналіз дозволяє вчасно побачити можливості науково-технічного прогресу (НТП) для виробництва нової продукції й удосконалення тієї, що випускається, а також технології виготовлення продукції і застосування засобів зменшення антропогенного впливу на довкілля (безвідхідні та ресурсозбережні технології), впровадження сучасних методів очищення скидів та викидів і вторинної переробки відходів. Крім того, технологічний та науковий рівень характеризує наявні засоби реалізації проекту та засоби вирішення проблеми.

Зараз доцільно також увести п'ятий компонент цього аналізу – екологічний або фактори навколишнього середовища (природні зміни, катаклізми, катастрофи та інше), оскільки якщо розглядати використання цього методу в екології, потрібно враховувати екологічну ситуацію на рівні системи, щодо якої проводиться аналіз.

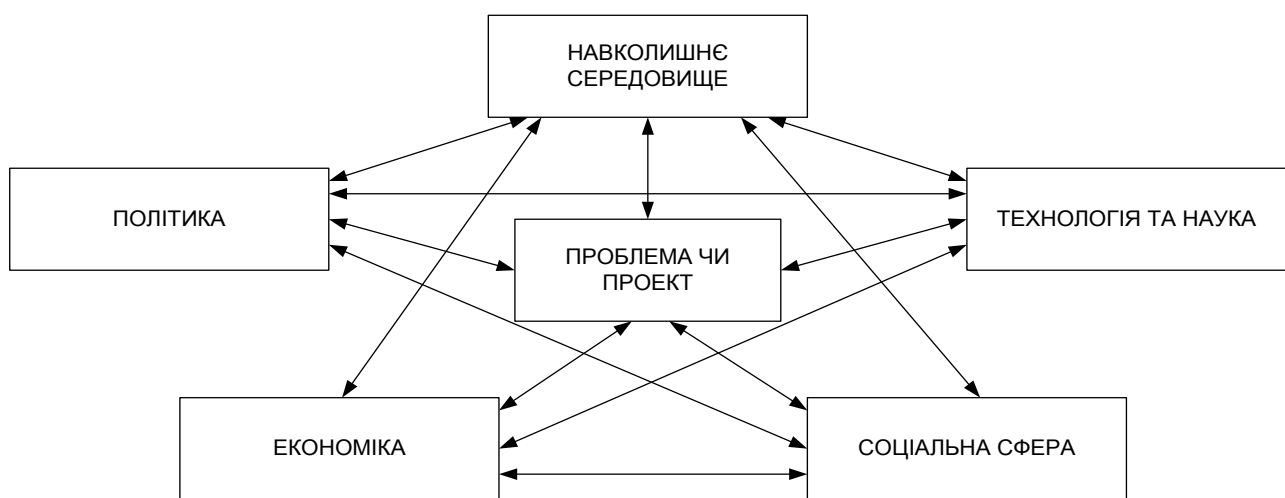


Рисунок 6.9 – П'ятикомпонентний PEST-аналіз

Аналіз виконується за схемою «чинник – система». Результати аналізу оформляються у вигляді матриці, підметом якої є фактори макросередовища, присудком – сила їх впливу, що оцінюється в балах, рангах та інших одиницях вимірювання. Результати PEST-аналізу дозволяють оцінити сукупність зовнішніх факторів, що впливають на проблему, та успіх реалізації запланованих заходів за їх вирішення.

PESTLE-аналіз є розширеною двома факторами (*Legal* і *Environmental*) версією **PEST**-аналізу. Іноді застосовуються й інші формати, наприклад, **SLEPT**-аналіз (плюс правовий фактор) або **STEEPLE**-аналіз: соціально-демографічний, технологічний, економічний, навколишнє середовище (природний), політичний, правовий та етнічні фактори. Також може враховуватися й географічний фактор.

Після аналізу проблем і виконання необхідних досліджень наступним кроком є аналіз цілей. Аналіз цілей проводиться для:

- підготовки опису ситуації в майбутньому, коли проблеми вже вирішені;
- перевірки ієрархії цілей;
- побудови причинно-наслідкових зв'язків (схемою, що має назву

«дерево цілей») між цілями та засобами їх досягнення.

Таким чином, негативні моменти, виявлені на «дереві проблем» (рис. 6.8), перетворюються на позитивні цілі на «дереві цілей» (рис. 6.10).

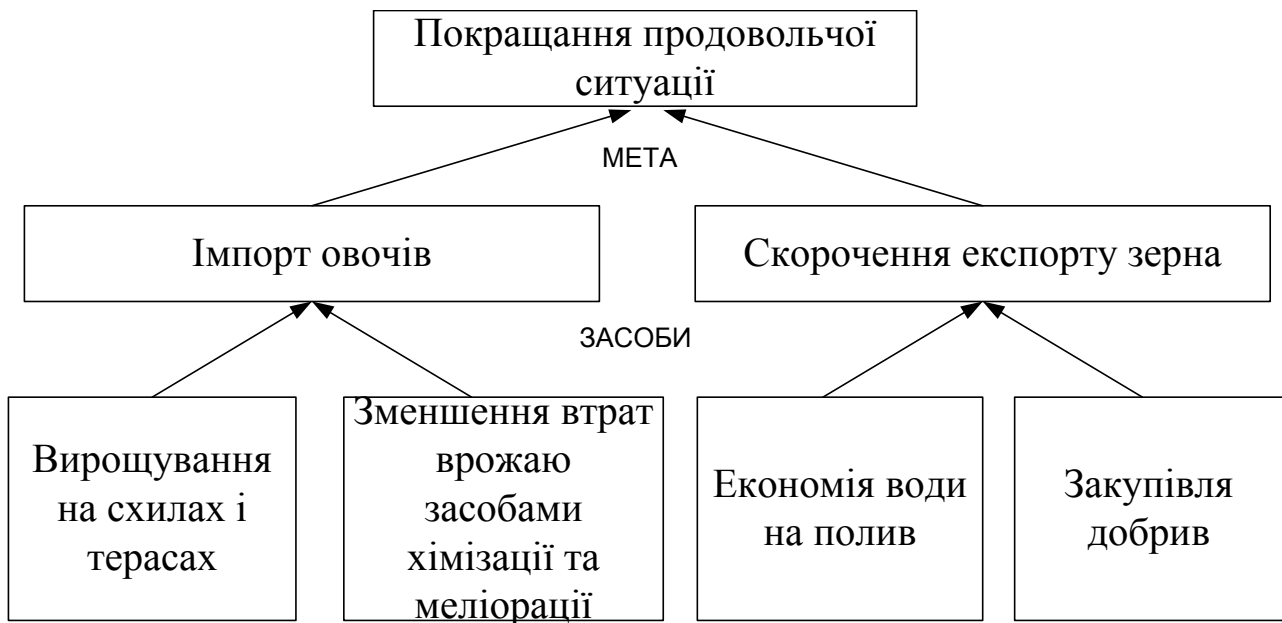


Рисунок 6.10 – Дерево цілей покращання продовольчої ситуації

Цей приклад дає чітке уявлення про бажану ситуацію в майбутньому. Часто дерево цілей відображає деякі цілі, які не можуть бути досягнуті в даному проекті, й, отже, виникає проблема вибору стратегії.

Більше того, деякі цілі можуть виявитися нереалістичними, так що для вирішення проблем знадобляться якісь нові рішення або спробу вирішити проблему доведеться відкласти на невизначений термін. Наприклад, для вирішення проблеми «дуже багато побутових відходів» запропонована мета «зменшення обсягу побутових відходів», а аналіз здійсненності показує, що ця мета недосяжна. Тоді, можливо, альтернативними рішеннями стануть «зменшення чисельності населення» або «зменшення споживання». І, нарешті, залишається ще одна можливість – відкласти вирішення проблеми у зв'язку з тимчасовою відсутністю бажання у населення до роздільного збирання відходів і можливості переробляти такі побутові відходи в промислову сировину.

Стадія аналізу стратегії передбачає:

- ідентифікацію (виявлення) різних можливих стратегій для досягнення проектної мети;
- вибір стратегії проекту.

На «дереві цілей» різні групи цілей одного і того самого типу визначають стратегію. Як головна стратегія майбутніх дій може бути обрана одна або комбінація декількох стратегій. Найбільш реалістичну і досяжну стратегію обирають за допомогою ряду критеріїв, наприклад *пріоритетів* зацікавлених сторін, фінансових коштів, термінів і т. д. В екології пріоритет віддається життю і здоров'ю населення, збереженню довкілля та біорізноманіття живих

істот.

Ці критерії беруть з нормативної документації України (наприклад, із Закону про охорону навколишнього середовища), і вони повинні використовуватися в експертній оцінці при виборі стратегії майбутнього проекту.

Остаточно стратегію приймають після формулювання мети проекту. Вибір відбувається на основі порівняння ряду цілей одного і того самого рівня. Мета проекту, розміщена на вищому рівні дерева цілей, часто містить багатокомпонентну програму, в якій «молодші» цілі вимагають реалізації малих проектів. Обрана стратегія (див., наприклад, рис. 6.11) заноситься в перший стовпець логічної матриці.

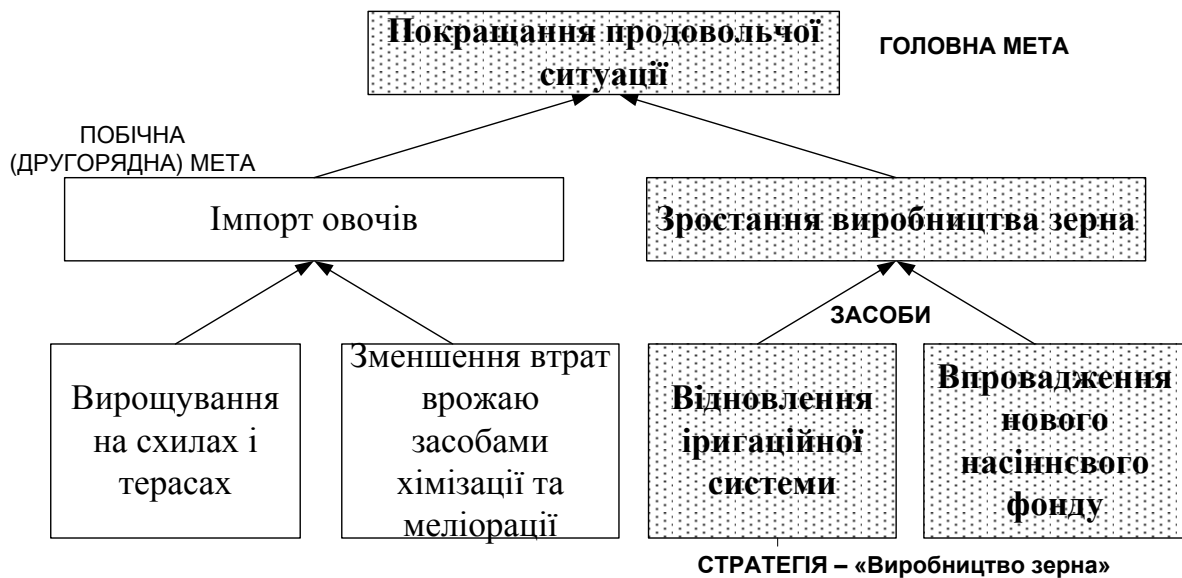


Рисунок 6.11 – Приклад аналізу стратегій

Реалізація проекту та вирішення поставленої мети залежить не лише від зовнішніх факторів, розглянутих вище, а й від можливостей організації або команди реалізувати намічений проект або природоохоронні заходи задля вирішення поставлених під час аналізу завдань.

Одним із основних інструментів стратегічного управління, що оцінюють в комплексі внутрішні й зовнішні чинники, які впливають на розвиток проекту, є **SWOT-аналіз**.

SWOT – початкові літери слів *Strengths* (Сильні сторони), *Weaknesses* (Слабкі сторони), *Opportunities* (Можливості), *Threats* (Загрози). У 1963 році в Гарварді на конференції з проблем бізнес-політики професор К. Ендрюс уперше публічно озвучив акронім SWOT. Цей акронім базувався візуально у вигляді матриці SWOT. Спочатку SWOT-аналіз базувався на озвучуванні і структуризації знань про поточну ситуацію й тенденції, пізніше – став використовуватися в ширшому значенні – для конструювання стратегій. Тобто, з появою SWOT-моделі аналітики отримали інструмент для своєї інтелектуальної праці. SWOT-аналіз – це процес установа зв'язків між

найхарактернішими для підприємства можливостями, загрозами, сильними сторонами (перевагами), слабкостями, наслідки якого в подальшому можуть бути використані для формулювання і вибору стратегій підприємства. Він проводиться з метою дослідження підприємства як системи господарювання у певному середовищі. SWOT-аналіз – це своєрідний інструмент; він не містить остаточної інформації для прийняття управлінських рішень, але дає змогу впорядкувати процес обмірковування всієї наявної інформації з використанням власних думок та оцінок. SWOT-аналіз дає змогу формувати загальний перелік стратегій підприємства з урахуванням їхніх особливостей – адаптації до середовища або формування впливу на нього. Широке застосування та розвиток SWOT-аналізу пояснюються тим, що стратегічне управління пов'язане з великими обсягами інформації, яку потрібно збирати, обробляти, аналізувати, використовувати, а відтак виникає потреба пошуку, розроблення та застосування методів організації такої роботи.

Головною метою проведення SWOT-аналізу є отримання достовірних даних про можливості та загрози для реалізації проекту. Тому для досягнення цієї мети перед SWOT-аналізом ставляться такі завдання: виявлення можливостей, що відповідають ресурсам організації; визначення маркетингових загроз і розроблення заходів щодо знешкодження їх впливу; виявлення сильних сторін організації й зіставлення їх із ринковими можливостями; визначення слабкостей та розроблення стратегічних напрямів їх подолання; виявлення конкурентних переваг та формування її стратегічних пріоритетів.

Методика проведення SWOT-аналізу передбачає здійснення декількох етапів:

I. Визначення власних сильних і слабких сторін підприємства (організації, проекту) (табл. 6.3). Перший етап дозволяє визначити, які сильні сторони та недоліки підприємства. Для цього необхідно: скласти перелік параметрів, за яким оцінюватиметься підприємство; за кожним параметром визначити, що є сильною стороною підприємства, а що – слабкою; зі всього переліку вибрати найбільш важливі сильні та слабкі сторони.

Таблиця 6.3 – Загальні характеристики сильних і слабких сторін, що використовуються у SWOT-аналізі

Потенційні внутрішні переваги	Потенційні внутрішні недоліки
<ul style="list-style-type: none"> – чітко сформульована стратегія; – достатні фінансові ресурси; – вищі за середні технологічні та інноваційні навички; творчий менеджмент; – добре вивчений ринок, потреби покупців; – вища за середню рентабельність і прибутковість та маркетингові навички. 	<ul style="list-style-type: none"> – нестача фінансових ресурсів, недостатній економічний ефект; – втрата репутації у споживачів; – недоліки в стратегічній діяльності; – відсутність реальних особливих навичок у галузі менеджменту, нестача талантів; – недоступність інформації, необхідної для реалізації проекту; – відсутність міцної позиції, щоб боротися із загрозами.

II. Визначення ринкових можливостей і погроз (табл. 6.4). Це своєрідна «розвідка місцевості» – оцінка ринку. Цей етап дозволяє оцінити ситуацію поза вашим підприємством і зрозуміти, які у вас є можливості, а також, яких погроз потрібно побоюватися.

Таблиця 6.4 – Загальні зовнішні можливості та загрози для підприємства, що використовуються в SWOT-аналізі

Потенційні зовнішні можливості	Потенційні зовнішні загрози
<ul style="list-style-type: none"> – розвиток економіки країни; – соціально-політична стабільність; – обґрунтоване законодавство; – обслуговування додаткових груп споживачів; – доступність ресурсів. 	<ul style="list-style-type: none"> – інфляція; – «ворожі дії» з боку держави; – зміни в потребах і смаках споживачів; – негативні демографічні зміни; – негативна екологічна ситуація; – соціально-політична нестабільність.

III. Зіставлення сильних і слабких сторін підприємства з можливостями та погрозами ринку. Для зіставлення можливостей підприємства до умов ринку і узагальнення результатів SWOT-аналізу застосовується матриця SWOT, яка має такий вигляд (рис. 6.12).

На перетинах окремих складових груп факторів формуються поля, для яких характерні певні сполучення, які необхідно враховувати надалі в ході розроблення стратегій певного типу: поле СіМ – передбачає розроблення стратегій підтримки та розвитку сильних сторін підприємства щодо реалізації можливостей зовнішнього середовища; поле СіЗ – орієнтує стратегію на боротьбу із загрозами за допомогою використання внутрішніх резервів; поле СлМ – спрямовує дії підприємства на використання можливостей для подолання слабких сторін його внутрішнього потенціалу; поле СлЗ – передбачає розроблення такої стратегії, яка б дала змогу підприємству не лише зміцнити свій потенціал, а й відвернути можливі загрози у зовнішньому середовищі. З огляду на це існує нагальна потреба розроблення стратегій як подолання загроз, так і усунення слабкості підприємства, що завжди є важким завданням.

		Зовнішнє середовище	
		Можливості	Загрози
Внутрішнє середовище	Сильні сторони	1. 2. і т. ін.	1. 2. і т. ін.
	Слабкі сторони	Поле СіМ (заходи)	Поле СіЗ (заходи)
1. 2. і т. ін.	Поле СлМ (заходи)	Поле СлЗ (заходи)	

Рисунок 6.12 – Матриця SWOT

SWOT-аналіз порівняно з іншими методами має як переваги, так і недоліки. Основною його перевагою є простота і можливість витратити невеликі кошти на його проведення, а також гнучкість і наявність безлічі варіантів. Також це систематизація знань про внутрішні та зовнішні фактори, що впливають на процес стратегічного планування; можливість визначити конкурентні переваги підприємства та сформулювати стратегічні пріоритети, періодично проводити діагностику ринку та ресурсів підприємства. Недоліками SWOT-аналізу, які потрібно враховувати, є: неможливість урахування всіх сил і слабкостей, можливостей і загроз; суб'єктивність вибору та ранжування факторів зовнішнього та внутрішнього середовища; погана адаптація до середовища, що постійно змінюється.

Отже, проведення SWOT-аналізу має важливе значення для здійснення стратегічного планування, оскільки його методика – ефективний, доступний, дешевий засіб оцінки стану проблемної та управлінської ситуації в установі. Він дозволяє систематизувати проблемні ситуації; краще розуміти структуру ресурсів, на які необхідно опиратися в удосконаленні діяльності та розвитку компанії на перспективу; відстежувати загальний стан зовнішнього середовища; виділяти і використовувати нові потенційні можливості швидше, ніж конкуренти; вибрати оптимальну дорогу розвитку й уникнути небезпек; приймати зважені рішення, що стосуються розвитку бізнесу. Правильно і вчасно прийняті стратегічні рішення відіграють сьогодні ключову роль в успішній діяльності організації. Саме вони роблять вирішальний вплив на конкурентоспроможність продукції та підприємства в цілому.

Контрольні запитання і завдання до самостійної роботи до розділу

1. Які критерії детерміністської моделі?
2. Як змінюються висновки при застосуванні детерміністської та стохастичної моделі?
3. Що таке екологічні тригери?
4. Поясніть випадки існування автоколивних систем.
5. Наведіть приклади існування граничних циклів в екологічних системах.
6. Які можливі варіанти взаємодії двох видів в узагальненій моделі Вольтерра?
7. Охарактеризуйте модель Колмогорова.
8. Які висновки з моделі Мак-Артура?
9. Поясніть особливості моделі Базикіна.
10. Дайте характеристику матричних моделей екологічних систем.

Перелік скорочень

ОПР – особа, яка приймає рішення

МСПШ – Метод систематичного покриття поля

МОКНУВ – Метод заперечення і конструювання

ММЯ – Метод морфологічного ящика

НТП – науково-технічний прогрес

НТР – науково-технічна революція

SWOT – початкові літери слів Strengths (Сильні сторони), Weaknesses (Слабкі сторони), Opportunities (Можливості), Threats (Загрози)

РК – розбіжні коливання

ЗК – загасальні коливання

ЕН – коливання, що наближаються до рівноваги за експоненціальним законом

ЕВ – коливання, що віддаляються від рівноваги за експоненціальним законом

PEST-аналіз (іноді позначають як STEP) – маркетинговий інструмент, призначений для виявлення політичних (P – political), економічних (E – economic), соціальних (S – social) і технологічних (T – technological) аспектів зовнішнього середовища.

Список використаної літератури

1. Гандзюра В. П. Екологія : навчальний посібник / В. П. Гандзюра. – 2-ге вид., переробл. і доп. – К. : ТОВ «Сталь», 2009. – 375 с.
2. Голубець М. А. Екосистемологія / М. А. Голубець. – Львів, 2000. – 316 с.
3. Гродзинський М. Д. Основи ландшафтної екології : підручник / М. Д. Гродзинський. – К. : Либідь, 1993. – 224 с.
4. Джигирей В. С. Екологія та охорона навколишнього природного середовища : навч. посіб. / В. С. Джигирей. – 2-ге вид., стер. – К. : Т-во «Знання», 2002. – 203 с.
5. Заславский Б. Г. Управление экологическими системами / Б. Г. Заславский, Р. А. Полуэктов. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 296 с. (Теория и методы системного анализа).
6. Лавров В. В. Системний підхід як методологічна основа для оцінки і зменшення загроз біорізноманіттю (лісові екосистеми) / В. В. Лавров // Оцінка і напрямки зменшення загроз біорізноманіттю України / за заг. ред. О. В. Дудкіна. – Київ : Хімджест, 2003. – С. 156–273.
7. Лаврушина Е. Г. Теория систем и системный анализ: Практикум / Е. Г. Лаврушина, Н. Л. Слугина. – Владивосток : Изд-во ВГУЭС, 2007. – 100 с.
8. Мельник Л. Г. Фундаментальные основы развития / Л. Г. Мельник. – Сумы : ИТД «Университетская книга», 2003. – 288 с.
9. Примак А. В. Системный анализ контроля и управления качеством воды и воздуха / А. В. Примак, В. В. Кафаров, К. И. Качиашвили. – К. : Наук. думка, 1991. – 360 с.
10. Пэнтл Р. Методы системного анализа окружающей среды / Р. Пэнтл. – М. : Мир, 1979. – 214 с.
11. Реймерс Н. Ф. Природопользование: Словарь-справочник. – М. : Мысль, 1990. – 637 с.
12. Ризниченко Г. Ю. Математические модели в биофизике и экологии: монография / Г. Ю. Ризниченко. – Ижевск ; М. : Ин-т компьютер. исслед., 2003. – 183 с.
13. Ризниченко Г. Ю. Математические модели биологических продукционных процессов / Г. Ю. Ризниченко. – Москва-Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2003. – 184 с.
14. Рубин А. В. Математические модели биологических продукционных процессов : учеб. пос. / А. В. Рубин. – М. : Изд-во МГУ, 1993. – 302 с.
15. Рубин А. Б. Кинетика биологических процессов / А. Б. Рубин, Н. Ф. Пытьева, Г. Ю. Ризниченко. – М. : Изд-во МГУ, 1987 – 304 с.
16. Сорока К. О. Основи теорії систем і системного аналізу : навч. посіб. / К. О. Сорока. – Х. : ХНАМГ, 2004. – 291 с.

Список рекомендованої літератури

1. Александров В. В. Развивающиеся системы. В науке, технике, обществе и культуре / В. В. Александров. – Ч. 1. Теория систем и системное моделирование. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2000. – 243 с.
2. Организм и среда: факториальная экология: учеб. пособие / О. Л. Воскресенская, Е. А. Скочилова, Т. И. Копылова и др. – Йошкар-Ола : Мар. гос. ун-т, 2005. – 180 с.
3. Дулепов В. И. Системная экология : учеб. пособие / В. И. Дулепов, О. А. Лескова, И. С. Майоров. – Владивосток : Изд-во ВГУЭС, 2004. – 252 с.
4. Системный анализ и аналитические исследования: руководство для профессиональных аналитиков / А. И. Ракитов, Д. А. Бондяев, И. Б. Романов и др. – М., 2009. – 448 с.
5. Спицнадель В. Н. Основы системного анализа : учеб. пособие / В. Н. Спицнадель. – СПб. : Изд. дом «Бизнес-пресса», 2000. – 326 с.
6. Сурмин Ю. П. Теория систем и системный анализ : учеб. пособие / Ю. П. Сурмин. – К. : МАУП, 2003. – 368 с.
7. Филичев С. А. Экологи изобретают: решение экологических задач методами технического творчества : учеб. пособие / С. А. Филичев, О. Д. Лукашевич. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2011. – 116 с.

Навчальне видання

Масікевич Юрій Григорович,
Шестопапов Олексій Валерійович,
Негадайло Анатолій Анатолійович та ін.

Теорія систем в екології

Підручник

Художнє оформлення обкладинки Р. А. Васькіна
Редактори: Н. А. Гавриленко, Н. В. Лисогуб
Комп'ютерне верстання О. В. Шестопапова, А. А. Негадайла

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 19,30. Обл.-вид. арк. 24,60. Тираж 500 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.