

Петро ГНАТІВ, Олег СТАСІВ

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА АГРОЕКОСИСТЕМИ

*Монографія рекомендована до видання
Вченою радою ІСГКР НААН*



Львів – Оброшине 2025

Гнатів П. С., Стасів О. Ф. Системний аналіз та агроєкосистеми: наукова монографія. Оброшине: ІСГ КР НААН, 2025. 414 с.

<https://doi.org/10.32636/9786178433079/2>

ISBN 978-617-8433-07-9

Описані основні положення системології, понятійний апарат теорії систем, класифікації, аналіз структури і функцій систем. Висвітлені основи й алгоритми прикладного системного аналізу, моделювання в екології, інвайронментології та агроєкології. Викладені основи структурно-функціональної організації і типізації природних, напівштучних і техногенних екосистем. Запропоновані найпоширеніші математичні методи прикладного системного аналізу із застосуванням нейрокомп'ютерів. Описаний екосистемний підхід до аналізу аграрних, лісових, водних, урбанотехнічних систем, консорції людини, різноманітного забруднення довкілля та агропродукції. Розглянуті сучасні концепції еволюції екосистем, аграрних систем і біогеосфери.

Праця містить узагальнену цілісну концепцію практичного застосування системного підходу в аграрній сфері, в екобезпечному природокористуванні та в організації екобезпечного розвитку. Її можна рекомендувати для науковців, керівників, викладачів та аспірантів.

Рецензенти:

В. П. Кучерявий – Академік Лісівничої академії наук України, професор, доктор с.-г. наук

Ю. І. Грицюк – професор, доктор технічних наук

Р. В. Ільчук – доктор с.-г. наук, старший науковий співробітник

*Рекомендовано Вченою радою Інституту сільського господарства
Карпатського регіону НААН (прот. № 8 від 17.07.2025 р.)*

Hnativ P. S., Stasiv O. F. Systems analysis and agrarian ecosystems, 2025. 412 p.

The basic provisions of systematology, its conceptual apparatus, classification approaches, study of the systems' structures and functions have been presented. The fundamentals and algorithms for system analysis and simulation in ecology and environmentology have been considered. The fundamentals of structural and functional organization and standardization of natural as well as man-made and technogenic ecosystems have been elaborated. The most common mathematical methods of system analysis have been proposed.

The ecosystemic approach for the analysis of agricultural, forest, water, urban and man-made systems, systematic environmental monitoring has been described. The modern scientific concepts of the origin, structure and evolution of physical, biotic and social systems have been considered.

The manual has been published for the second time for Bachelor, Master and PhD students. It may also be useful for the researchers and specialists in environmental management and geo-social processes as well as for the ecosafety development organization.

© П. С. Гнатів, О. Ф. Стасів, 2025

© Видавництво Інституту сільського господарства
Карпатського регіону НААН України, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	11
INTRODUCTION.....	15

Частина I – ОСНОВИ ТЕОРІЇ СИСТЕМ

1. ВИНИКНЕННЯ І СТАНОВЛЕННЯ СИСТЕМОЛОГІЇ	19
1.1. Суть системи й поняття системності	19
1.2. Історія, розвиток та сучасні сфери системного світосприйняття.	23
1.3. Системний погляд на природокористування, збереження довкілля і сталий розвиток аграрної сфери.	29
2. СИСТЕМИ ЯК ЗАСІБ ТА ОБ'ЄКТ НАУКОВОГО ПІЗНАННЯ ...	33
2.1. Понятійний апарат системології	33
2.2. Системотвірні чинники: речовина, енергія, простір, час, свідомість ...	38
2.3. Еволюція Всесвіту, форм і функцій	41
2.4. Система наук як засіб і рівень пізнання світу	45
3. КРИТЕРІЇ КЛАСИФІКАЦІЇ СИСТЕМ	49
3.1. Проблеми і критерії побудови класифікації систем	49
3.2. Матеріальні й абстрактні системи	56
3.3. Неживі й живі системи	58
3.4. Ознаки та властивості простих і складних систем, їх ієрархія	59
3.5. Некеровані, напівкеровані та керовані (штучні) системи	60
4. СИСТЕМНА СТРУКТУРА ТА ЇЇ ОРГАНІЗАЦІЯ	62
4.1. Компонентний склад і природа зв'язків	62
4.2. Структури та суть організації систем	64
4.3. Поняття мети, декомпозиції й агрегації	68
4.4. Функціональна організація	71
5. ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ	74
5.1. Типізація системних функцій	74
5.2. Суть і механізми функціонування систем	77
5.3. Поняття емерджентності й синергізму	79
5.4. Проблеми ефективного функціонування системи	81
5.5. Функціонування агроєкосистем	83

6. СИСТЕМА І СЕРЕДОВИЩЕ	86
6.1. Внутрішнє, навколишнє середовище та межі систем	86
6.2. Системне розуміння взаємодії і протидії, конкуренції й боротьби	89
6.3. Суть розвитку й саморозвитку	97
6.4. Системна криза, зникнення системи й хаос	99
7. ВИНИКНЕННЯ Й ЕВОЛЮЦІЯ ЖИВИХ СИСТЕМ	103
7.1. Чинники й механізми еволюційної самоорганізації живих систем	103
7.2. Чинники й алгоритм самозбирання систем	105
7.3. Організація і складність екосистем та аграрних продукційних систем	112
7.4. Адаптивність агроекосистем та їхніх продукційних живих підсистем	114
8. АГРОЕКОСИСТЕМИ ТА СЕРЕДОВИЩА	118
8.1. Становлення вчення про агроекосистеми	118
8.2. Рівні організації агроекосистем	122
8.3. Агроекосистеми та середовища: критерії класифікації	128
8.4. Природні, напівприродні й штучні продукційні системи	133
8.5. Питання типізації агросистем і керування ними	135
8.6. Концепція екосистемних послуг та їхня суть	139
Частина II – СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ В АГРОЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННІ	
9. МЕТОДОЛОГІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ	148
9.1. Основні види, об'єкт і предмет системного аналізу в агроекології	148
9.2. Класичний алгоритм системного аналізу	152
9.3. Методи неформального системного аналізу	156
9.4. Алгоритм прикладного аналізу агроекосистем	159
9.5. Зміст прикладного системного аналізу компонентів і факторів природного середовища	161
9.6. Системний експертний аналіз в агроекології й захисті агроландшафтів	164
10. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ	166
10.1. Мета й завдання моделювання, матеріальні й абстрактні моделі	166
10.2. Формалізація та візуалізація моделей систем	168
10.3. Математичне моделювання	176
10.4. Системне моделювання і комп'ютери	179

11. СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ	182
11.1. Статистичні моделі й типи змінних параметрів	182
11.2. Властивості зв'язків між змінними і статистичні критерії	184
11.3. Основні статистичні методи у дослідній справі.	189
11.4. Перспективи нейронних мереж та суперкомп'ютерів	194
11.5. Системна робота штучних (комп'ютерних) нейромереж (<i>artificial intelligence</i>).	197
11.6. Графічні моделі та інфографіка	200
11.7. Системне моделювання в агроєкології та захисті природного середовища.	206

Частина III – СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ БІОГЕОСФЕРИ

12. АГРАРНІ ЕКОСИСТЕМИ	215
12.1. Первинні й аграрні екосистеми, їх ієрархія.	215
12.2. Агроєкосистемологія: об'єкт, предмет і завдання.	223
12.3. Алгоритм прикладного аналізу агроєкосистем.	225
12.4. Системи точного рільництва в експериментальній агроєкології.	228
12.5. Екосистеми тваринництва і довкілля.	231
13. ЕКОСИСТЕМИ ЛІСІВ, СУХОДОЛЬНИХ ВОДОЙМ, УРБО- І ТЕХНОЕННИХ ЛАНДШАФТІВ.	235
13.1. Лісова екологія – основа поліфункціонального лісівництва	235
13.2. Будова лісових екосистем і взаємовідношення компонентів	237
13.3. Лісові екосистемні фактори.	239
13.4. Функціонування біоти, недеревні ресурси і контроль шкідників	242
13.5. Акваєкосистеми Землі – класифікація і поширення.	249
13.6. Трансформація і забруднення водних екосистем	255
13.7. Система басейнового керування водними ресурсами.	257
13.8. Техносистеми й урбосистеми – утворення, взаємовплив	260
14. АГРОЕКОСИСТЕМИ, ЕКОТОКСИНИ І ЗАБРУДНЕННЯ	265
14.1. Токсини судинних рослин як засоби самозахисту та імунітету	265
14.2. Хімічні елементи та радіонукліди як забрудники агроландшафтів ..	274
14.3. Токсичні сполуки сірки й азоту	302
14.4. Стійкі органічні забруднювачі і хімічні канцерогени	310
14.5. Натурне моделювання екобезпечних агротехнологій	331



15. ЕКОСИСТЕМА ЛЮДСЬКОГО ОРГАНІЗМУ	335
15.1. Становлення і сучасна система знань про екологію людини	336
15.2. Аутоекотологія людського організму.	338
15.3. Повітря, вода, харчування і умови життя як чинники здоров'я людини..	352
15.4. Токсини, ксенобіотики і суспільний резонанс.	363
16. СИСТЕМНІ ПРОЦЕСИ БІОСФЕРИ, БІОГЕОСФЕРИ І СОЦІОСФЕРИ	368
16.1. Еволюція біосфери як живої складової біогеосфери.	368
16.2. Наслідки антропогенезу для біогеосфери.	374
16.3. Еволюція біоти, системне моделювання біогеосфери та його висновки.	383
16.4. Концепції виживання людства	389
ЛІТЕРАТУРА.	395



CONTENT

INTRODUCTION.	16
-----------------------	----

Part I – FUNDAMENTALS OF SYSTEM THEORY

1.	<i>ORIGIN AND FORMATION OF SYSTEMOLOGY</i>	19
1.1.	The Essence of a System and the Concept of Systemicity.	19
1.2.	The History, Development, and Modern Areas of Systemic Worldview.	23
1.3.	A Systemic Perspective on Environmental Management, Nature Conservation, and Sustainable Development in the Agricultural Sector.	29
2.	<i>SYSTEMS AS A MEANS AND OBJECT OF SCIENTIFIC COGNITION</i>	33
2.1.	Conceptual Framework of Systemology.	33
2.2.	System-Forming Factors: Matter, Energy, Space, Time, Consciousness	38
2.3.	Evolution of the Universe, Forms and Functions.	41
2.4.	The System of Sciences as a Means and Level of Understanding the World	45
3.	<i>CRITERIA FOR SYSTEM CLASSIFICATION</i>	49
3.1.	Problems and Criteria for Constructing System Classifications.	49
3.2.	Material and abstract systems.	56
3.3.	Non-Living and Living Systems.	58
3.4.	Features and Properties of Simple and Complex Systems, Their Hierarchy. .	59
3.5.	Uncontrolled, Semi-Controlled, and Controlled (Artificial) Systems.	60
4.	<i>SYSTEM STRUCTURE AND ORGANIZATION</i>	62
4.1.	Component composition and the nature of relations.	62
4.2.	The structure and nature of the system organization.	64
4.3.	The concept of goal, decomposition and aggregation.	68
4.4.	Functional organization.	71
5.	<i>FUNCTION OF SYSTEMS</i>	74
5.1.	Typing of system functions.	74
5.2.	The essence and mechanisms of functioning.	77
5.3.	The concept of emergence and synergy.	79
5.4.	The problems of systems' effective functioni.	81
5.5.	Function of agroecosystems.	83



6.	SYSTEM AND ENVIRONMENT	86
6.1.	Internal and External Environment and System Boundaries.	86
6.2.	Systemic Understanding of Interaction and Opposition, Competition and Struggle.	89
6.3.	The essence of development and self-development.	97
6.4.	Systemic crisis, loss of systems and chaos.	99
7.	ORIGIN AND EVOLUTION OF LIVING SYSTEMS	103
7.1.	Factors and Mechanisms of Evolutionary Self-Organization of Living Systems.	103
7.2.	Factors and Algorithm of System Self-Assembly.	105
7.3.	Organization and Complexity of Ecosystems and Agricultural Production Systems.	112
7.4.	Adaptability of Agroecosystems and Their Productive Living Subsystems. . .	114
8.	AGROECOSYSTEMS AND ENVIRONMENTS	118
8.1.	Development of the Agroecosystem Concept	118
8.2.	Levels of Agroecosystem Organization	122
8.3.	Agroecosystems and Environments: Classification Criteria	128
8.4.	Natural, Semi-Natural, and Artificial Production Systems	133
8.5.	Issues of Agroecosystem Typification and Management	135
8.6.	The Concept of Ecosystem Services	139

Part II – SYSTEMIC ANALYSIS IN AGROECOLOGY AND NATURAL RESOURCE USE

9.	FOUNDATION OF SYSTEM ANALYSIS	147
9.1.	Main Types, Object, and Subject of Systems Analysis in Agroecology	147
9.2.	Classical Algorithm of Systems Analysis	151
9.3.	Methods of Informal Systems Analysis	154
9.4.	Algorithm of Applied Agroecosystem Analysis	157
9.5.	Content of Applied Systems Analysis of Components and Factors of the Natural Environment	160
9.6.	System Expert Analysis in Agroecology and Agro-landscape Protection	163
10.	SYSTEM MODELING	165
10.1.	Purpose and Objectives of Modeling, Material and Abstract Models	165
10.2.	Formalization and Visualization of System Models	167
10.3.	Mathematical Modeling	174
10.4.	System Modeling and Computers	177



11.	<i>STATISTICAL METHODS OF SYSTEMS ANALYSIS</i>	181
11.1.	Statistical Models and Types of Variable Parameters	181
11.2.	Properties of Relationships Between Variables and Statistical Criteria	183
11.3.	Basic Statistical Methods in Research Practice	188
11.4.	Prospects of Neural Networks and Supercomputers	193
11.5.	Systemic Operation of Artificial (Computer-Based) Neural Networks (Artificial Intelligence)	196
11.6.	Graphical Models and Infographics	199
11.7.	System Modeling in Agroecology and Environmental Protection	203
 Part III – SYSTEMS ANALYSIS OF NATURAL AND ARTIFICIAL COMPONENTS OF THE BIOGEOSPHERE		
12.	<i>AGRARIAN ECOSYSTEMS</i>	213
12.1.	Primary and Agrarian Ecosystems, Their Hierarchy	213
12.2.	Agroecosystemology: Object, Subject, and Tasks	222
12.3.	Algorithm of Applied Agroecosystem Analysis	223
12.4.	Precision Farming Systems in Experimental Agroecology	226
12.5.	Livestock Ecosystems and the Environment	229
13.	<i>ECOSYSTEMS OF FORESTS, INLAND WATERS, URBAN AND TECHNOLOGICAL LANDSCAPES</i>	232
13.1.	Forest Ecology – The Basis of Multifunctional Forestry	232
13.2.	Structure of Forest Ecosystems and Interrelations of Their Components	234
13.3.	Forest Ecosystem Factors	236
13.4.	Biota Functioning, Non-Timber Resources, and Pest Control	239
13.5.	Earth's Aqua Ecosystems – Classification and Distribution	244
13.6.	Transformation and Pollution of Aquatic Ecosystems	252
13.7.	River Basin Management System for Water Resources	254
13.8.	Technosystems and Urban Systems – Formation and Interactions	257
14.	<i>AGROECOSYSTEMS, ECOTOXINS, AND POLLUTION</i>	262
14.1.	Toxins of Vascular Plants as Means of Self-Defense and Immunity	262
14.2.	Chemical Elements and Radionuclides as Agro-Landscape Pollutants	271
14.3.	Toxic Compounds of Sulfur and Nitrogen	299
14.4.	Persistent Organic Pollutants and Chemical Carcinogens	308
14.5.	Field Modeling of Environmentally Safe Agro-Technologies	328



15.	<i>ECOSYSTEM OF THE HUMAN BODY</i>	332
15.1.	The Development and Current Knowledge System of Human Ecology	333
15.2.	Autecology of the Human Body	335
15.3.	Air, Water, Nutrition, and Living Conditions as Factors of Human Health	349
15.4.	Toxins, Xenobiotics, and Public Response	360
16.	<i>SYSTEMIC PROCESSES OF THE BIOSPHERE, BIOGEOSPHERE AND SOCIOSPHERE</i>	364
16.1.	Evolution of the Biosphere as the Living Component of the Biogeosphere	364
16.2.	Consequences of Anthropogenesis for the Biogeosphere	370
16.3.	Evolution of Biota, System Modeling of the Biogeosphere, and Its Conclusions	378
16.4.	The Concept of Human Survival	384
	<i>LITERATURE</i>	390



ПЕРЕДМОВА

Видання нашої книги зумовлене швидким прогресом наук про біогеосферу як "домівку" людства й загостренням проблем виробництва продовольства й захисту довкілля на Землі. У науковій, навчальній, науково-популярній літературі такі поняття, як "система", "системний підхід", "системний аналіз", "системна проблема", "системна криза" трапляються дедалі частіше і допитливий читач замислюється над їхнім конкретним змістовим наповненням. Вони стали такими ж часто вживаними, як і терміни "екологія", "екологічний підхід", "екологічна криза", "екологізація". Спроби оволодіти системним методом без належної наукової чи практичної підготовки приречені на невдачу через неоднозначність і неточність цих і багатьох інших понять системології – науки про системи. Важливо зауважити, що популізму і профанації у сфері агроекології та захисту природного й людського довкілля, нажаль, не поменшало.

Поняття системи у нашу добу не обмежене теоретичною сферою, а стає наріжним каменем у фундаменті різних прикладних наук. Спочатку системні поняття були оприлюднені у вигляді абстрактної і дещо зухвалої наукової ідеї, згодом – новаторської теорії. Сьогодні ж системні дослідження, системний аналіз, системотехніка та споріднені категорії стали робочими засобами багатьох наук. Сучасні державні органи, особливо безпекові, установи, бізнесові структури мають відповідні підрозділи, або принаймні окремих фахівців, що зобов'язані здійснювати системний аналіз, контролювати системні процеси, давати прогнози, пропонувати системні ідеї.

Поняття системи і системності має три аспекти:

✓ об'єктивно Всесвіт є системою, його будова є системною, тобто системність є незалежною від людини, онтологічною, діалектичною властивістю всього об'єктивного, що існувало, існує й існуватиме у світі;

ПЕРЕДМОВА

✓ системою є сукупність надбаних людьми, упорядкованих за галузями наук, знань та уявлень про Всесвіт як про систему, тобто така системність є гносеологічним явищем – доволі складним і багатогранним (за І. Кантом – "Дослід без теорії сліпий, але теорія без дослідю є просто інтелектуальною грою");

✓ людство на певному етапі свого розвитку та на базі освоєних знань почало, продовжує і надалі створюватиме різні системи суспільного призначення як інструменти цивілізаційного розвитку – віртуальні й реальні, дрібні й великомасштабні структури і конструкції.

Системний підхід, як прогресивний спосіб інтелектуальної діяльності, забезпечив значне поглиблення природничих знань і нові відкриття в науці, винаходи в техніці й досягнення у виробництві, створення технологій точного (цифрового) рільництва і фермерства. Глобальні й локальні системні екологічні, продовольчі та соціальні проблеми зумовлюють постійну увагу до нього з боку науковців і управлінців, фахівців з аграрного виробництва, охорони природи і довкілля. Без володіння системним методом неможливі вирішення комплексних соціо-еколого-економічних проблем на різних рівнях.

Дедалі більший інтерес до системного аналізу – всебічного дослідження об'єктів і явищ у природі й суспільстві, їхнього взаємовпливу і взаємозалежності, потребує подальших фундаментальних досліджень та узагальнень, що опираються на теорію систем, системний аналіз в агрономії, агроекології та захисті довкілля. Це важливо ще з тих міркувань, що віднедавна екологи саме екологію почали розглядати не як розділ спеціальних знань, а як загальнонауковий методологічний засіб пізнання і суспільних, і природничих, і технологічних явищ та об'єктів, що є компонентами різних систем, але водночас і навколишнього середовища. Попередньо 2010 року в Україні нами було видано книгу "Теорія систем і системний аналіз в екології" (Львів: Камула, 2010. 205 с.), у якому ми відмежували системи від екосистем, екологію від середовищезнавства (інвайронментолоїї), а прикладні екології описали як спеціальні науки.

Глибокий науковий системний підхід потрібен у кожній сфері фахової діяльності. Трагічні наслідки природних, екологічних і техногенних катастроф значною мірою зумовлені не просто нерозумінням системності будови природи і суспільства, а нездатністю втілити ідеї в такі дії, які не порушували б системні закони функціонування природно-антропогенних комплексів. Системний аналіз – це сукупність методів і засобів, які використовують для дослідження, моделювання та конструювання простих, складних і надскладних об'єктів. В аграрній екології й захисті довкілля – це, насамперед, обґрунтування рішень у процесі освоєння природних ресурсів агроландшафтів, перетворення або й створення продукційних екосистем та керування ними за допомогою економічних, технічних і біологічних засобів. Теоретичну та методологічну базу системного аналізу становлять системний підхід і загальна теорія систем.

З огляду на це, пропонуємо нове фундаментальне дослідження й узагальнення системних методів, викладене у науковому виданні під назвою "Системний аналіз і агроєко-системи". Основна мета монографії – обґрунтування сучасних підходів до аналізу аграрних екосистем та удосконалення прикладних методів системного аналізу в агрономії та в захисті довкілля, впровадження у виробничий процес тематики про взаємовідношення і взаємозалежність природних явищ та антропогенезу. Наша праця спрямована на розширення методичного інструментарію спеціаліста в розумінні системності світобудови, на просування алгоритму й методів системного аналізу в агроєкології та захисті довкілля загалом, в тому числі лісових і водних, технічних систем щодо їх екобезпеки. Запропоновані нові концепції аналізу аграрних, технічних та урбаністичних систем, системи людського організму як гетеротрофної консорції відкривають нові можливості у вирішенні практичних проблем.

Пропонована монографія має три частини. Перша охоплює основи загальної теорії систем, друга – наукові засади і практичні підходи щодо використання системного аналізу в агроєкології та інвайронментології. Третя частина книги, пропонує поглиблені фундаментальні підходи до прикладного системного аналізу у різних сферах. На основі

ПЕРЕДМОВА

принципів і законів системології нами запропоновано власні концепції суті системного трактування найважливіших компонентів біogeосфери, які людина перетворює і підлаштовує під свої корисні інтереси. Лісові, аграрні, водні, технічні, урбаністичні, системи й антропоєкосистема (система людського організму з її симбіоценозом і довкіллям) уперше досліджені й описані за єдиним методологічним підходом.

Визначення усіх систем подані з позиції екоцентризму. Антропоєкосистема має екологічне визначення, хоча ми не заперечуємо й інших підходів, у тому числі до трактування антропосоціосистем. Пропонуємо колегам подавати свої зауваження й пропозиції щодо концепції книги та думки про наше бачення розробки проблематики системного підходу, його корисності для агрономів, агроєкологів, фахівців з безпеки довкілля.

Автори книги щиро вдячні рецензентам – професорам Володимиру Радченку, Юрію Грицюку, Роману Ільчуку, вченим, які надали фахові консультації – Володимиру Кучерявому, Володимиру Лихочвору, Тимофію Пасічнику, Оксані Нечай та Марії Лозинській за вагомі доповнення й правки матеріалів. Надіємося, що конструктивні зауваження і пропозиції колег, різнобічних фахівців дадуть нам змогу в подальшому розвивати й удосконалювати системний аналіз якості довкілля й аграрних екосистем.





"By visible you will be able to see invisible"

Hryhoriy Skovoroda

ITRODUCTION

The edition of our book is caused by the rapid progress of science about biogeosphere as the "home" of humanity and the worsening problems of environmental protection in the world. In educational and scientific literature such concepts as "system", "system approach", "systemic analysis", "systemic problem", "systemic crisis" are more and more often met and a curious reader thinks about their specific topical content. They become as commonplace as the terms "ecology", "ecological approach", "environmental crisis", "greening". Attempts to master the system method without an adequate scientific or practical training are doomed to failure because of the ambiguity and inaccuracy of these and many other concepts of systemology – the science of the system. It is important to note that populism and profane about the protection of the natural and human environment, unfortunately, are not diminished.

Nowadays the concept of system is not limited to theoretical sphere and becomes a cornerstone in the foundation of various applied sciences. At the beginning the systemic concepts were published as an abstract and somewhat daring scientific ideas, later – as a pioneering theory. Today, systemic research, systemic analysis, systems engineering and related categories became working means of many sciences. Modern state agencies, especially security and business institutions, have the relevant departments, or at least some professionals who carry out a systematic analysis, control the system processes, give predictions, generate systemic ideas.

The concept of a system and consistency has three aspects:

✓ objectively the Universe is a system, its structure is systemic, its consistency is independent of man, ontological, dialectic property of all objective that exists, existed and will exist in the world;

✓ system is a set of achievements of human beings, organized in science, knowledge and ideas about the universe as a system, such a system is an epistemological phenomenon – complex and manyfold (by I. Kant – "Experiment without theory is blind, but theory without experiment is simply an intellectual game");

✓ humanity at a certain stage of development and on the basis of assimilated knowledge began, continue and in the future will continue to create different systems of public appointment as instruments of civilization – virtual and real, small and large-scale structures and designs.

System approach as a progressive way of intellectual activity provided a significant deepening of natural knowledge and new discoveries in science, inventions and achievements in technology and production. Global systemic and local environmental and social problems cause constant attention on the part of scientists and managers, experts in protection of nature and environment. Without acknowledgement of the system it is impossible to solve complex socio-ecological and economic problems at different levels.

More and more interest is paid to systemic analysis – a comprehensive study of objects and phenomena in nature and society, and their mutual interdependence, it requires study in higher educational institutions specialized on disciplines that are based on the theory of systems analysis in ecology and environmental protection. This is important since there is a consideration that recently some environmentalists have begun to consider the environment not as a part of special knowledge, but as a general scientific methodological knowledge and means of public, natural and technological phenomena and objects which are components of different systems, but at the same time of the environment. For this purpose, in 2010 in Ukraine for the first time was published a textbook "Systems theory and systems analysis in ecology" (Lviv, Kamula, 2010 – 205 pp.).

However, deep research systemic approach is needed in every sphere of professional activity. The tragic consequences of natural and environmental disasters has happened not due just incomprehension of systematic structure of nature and society, but the inability to realize the ideas in such actions which would not violate the laws of systemic natural and man-made complexes functioning.

Systemic analysis – is a set of methods and tools that are used for researches, modeling and design of simple, complex and complicated objects. In ecology and environmental protection – It is, above all, substantiation of decisions of biogeosphere natural resources development, conversion or even creation and management of ecosystems through economic, technical and biological agents. Systemic approach and general systems theory make theoretical and methodological basis of systems analysis.

With this in mind, we propose a new research and generalization of the systemic method developed in the scientific publication entitled "Ecosystem and system analysis". The main purpose of the monograph – justification of the modern approaches to the ecosystems analysis and development of the applied systemic analysis techniques to protect the environment, implementation into the learning process of the subject of relationship and interdependence of natural phenomena and anthropogenesis. Our work is to expand a specialist's methodological tools in understanding the universe's structure systematicity, training an ecologist an algorithm and methods of system analysis of environment in general, as well as forest, water and technical systems for their environmental safety. The new concepts of agricultural, industrial and urban systems analysis, the systems of the human body as heterotrophic consortium were proposed. It is important to streamline and improve the environmental monitoring in Ukraine and its international implementation.

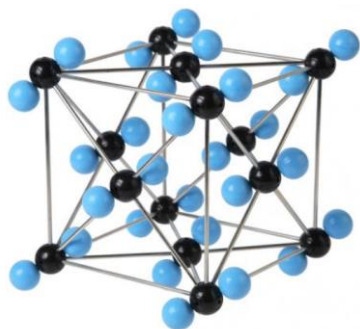
The proposed manual consists of three parts. The first covers the basics of general systems theory, the second – the scientific foundations and practical approaches to the use of systems analysis in ecology and environmentology. The third – summarizes and provides in-depth fundamental knowledge for applied systems analysis in various fields, and systemic approaches to monitoring of environment. Based on the principles of systemology laws we offered our own approaches to the core and relevance of systemic treatment of the major biogeosphere components which man transforms and adjusts to fit his interests. Forest, agricultural, water, urban, technical systems and anthropoecosystem (the system of the human body with its symbiocenosis and environment) were for the first time explored



and described by a single methodological approach. Definitions of all the systems were presented from the perspective of ecocentrism. Anthropoecosystem has an ecological definition, although we do not deny other approaches, including anthroposociosystems. We offer colleagues to provide their comments and suggestions on the concept of the book and thoughts about our vision of the course for the ecologists, specialists in environmental security.

The authors are sincerely grateful to the reviewers – Professor V. G. Radchenko, V. P. Kucheryavyy, V. I. Parpan, V. V. Lykhochvor for significant additions and edits of the materials. We hope that the colleagues' constructive comments and suggestions of different professions will enable us to further develop and improve systemic analysis of environmental quality and ecosystems.





Частина I

ОСНОВИ ТЕОРІІ СИСТЕМ

$$c = \sqrt{\frac{E}{m}}$$



1.1. Суть системи й поняття системності

Світ навколо людини, як і вона, різноманітний, складний, загадковий, ще відносно неглибоко і дуже фрагментарно досліджений, а в багатьох аспектах взагалі не пізнаний і таємничий. Прагнення розуму з'ясувати логіку порядку, мету виникнення й існування Всесвіту спонукає до вічного пошуку способів і засобів пізнання світобудови.

Системний підхід потрібно розглядати як методологічний засіб людини для сприйняття дійсності, котрий має певну змістовну спільність логічних принципів. Це, за сутністю, – системна парадигма, системний світогляд. Призначення системного підходу в тому, що він спрямовує людину на системне бачення дійсності. Він спонукає розглядати світ із позицій його системного устрою (Hammond, 2008). Системний підхід, будучи принципом пізнання, виконує орієнтаційну і світоглядну функції, забезпечує не тільки бачення світу, але й орієнтування в ньому.



Системний підхід полягає в тому, що будь-який малий чи великий, складний чи простий об'єкт потрібно розглядати як відносно самостійну, цілеспрямовану систему зі своїми особливостями функціонування та еволюції.

Грунтуючись на ідеях цілісності та відносної незалежності об'єктів, що перебувають у цілісному світі, принцип системності передбачає розгляд досліджуваного об'єкта як певної системи, котру описують за (Gleeson, 2019): 1) елементним (компонентним) складом; 2) структурою як формою взаємозв'язку елементів; 3) функціями елементів і цілого; 4) єдністю внутрішнього і зовнішнього середовища системи; 5) законами розвитку системи та її складників.

Поняття системи охоплює деякий ідеальний об'єкт, що є множиною умовно неподільних (цілісних) елементів, між якими з'ясовані певні відношення (зв'язки). Завдяки їм набір елементів перетворюється на пов'язане ціле, де кожен елемент зрештою може виявитися (можливо,



опосередковано) пов'язаним зі всіма іншими елементами, і його властивості не можна зрозуміти без урахування цього зв'язку. З іншого боку самій системі, як цілому, притаманна наявність інтеграційних властивостей. Наявність зв'язків і відношень між елементами й породжувані ними інтеграційні, цілісні властивості системи забезпечують її відносно самостійне, відособлене існування (а в деяких випадках і розвиток). Система, як відносно відмежована цілісність, протистоїть середовищу, оточенню. В ньому виділяють найближче оточення, у взаємодії з якими функціонує система. Разом із внутрішніми відношеннями системі також властиві зовнішні зв'язки й відношення.

З-поміж усієї безлічі зв'язків і відношень системи особливо важливі так звані системотвірні, що є головно внутрішніми. Саме вони виражають цілісні, інтеграційні властивості системи, визначають її специфіку – емерджентність, тобто ознаку, яка не притаманна будь-якому з її окремих складників.

Наведемо приклади розуміння системи класиками системології.

"Система – це набір елементів, котрі взаємодіють", – писав Л. фон Берталанфі (1962).

"Система – це відносно відособлена частина, фрагмент світу, Всесвіту, що має особливу якість (емерджентність), відносну самодостатність (термодинамічну ізолюваність)", – вважав П. Еткінс (1987).

"Система – це комплекс вибірково залучених елементів, які взаємно сприяють досягненню певного корисного результату, що визнаний основним системотвірним чинником", – стверджував П. Анохін (1978).

Сукупність зв'язків і відношень системи зі своїм довкіллям називають **зовнішньою структурою**, а внутрішні системотвірні зв'язки і відношення утворюють **внутрішню структуру** або просто структуру системи. Системі властива **ієрархічна будова**, яка пов'язана з потенційною подільністю її елементів. Водночас, кожна система у певних ситуаціях може бути розглянута як елемент у системі вищого рівня ієрархії. Ієрархічна будова властива також зв'язкам і відносинам будь-якої системи: результативні й у цьому сенсі неподільні відношення і зв'язки конкретної системи можуть бути розділені на елементарніші відношення і зв'язки, на основі яких формуються системи нижчого рівня ієрархії. З іншого боку, певні набори зв'язків і відношень якоїсь системи можна розглядати як результативні в ширшій системі. У цьому разі система виступає як складне ієрархічне утворення, в якому виділяють різні рівні, різні типи взаємодій між рівнями тощо. Наслідком ієрархічної будови системи є можливість послідовного охоплення систем нижчого рівня системами вищого рівня.

Поведінка (режим, функціонування) системи підпорядкована певним, властивим їй законам. Сукупність цих законів об'єднана поняттям **функції системи**, що визначає тимчасову динаміку системи. У кожен певний

момент часу система перебуває в якомусь стані, що є сукупністю значень операціонально вимірюваних ознак, властивостей (*атрибутів*) системи чи її елементів. Особливу групу становлять системи, що здатні розвиватися. З-поміж них виокремлені системи, що здатні самоорганізовуватися та саморозвиватися.

Найширше коло дослідників задовольняють означення системи через поняття "елементи", "властивості", "відношення", "зв'язки", "цілісність". Отже підсумуємо, що



система – це цілісна множина природно або штучно взаємопов'язаних елементів, яка у взаємодії з навколишнім середовищем поводить себе як особлива (емерджентна) єдність, є елементом у системі вищого порядку, а елементи системи своєю чергою є системами нижчого рівня.

Теорія систем, системологія, або наукове знання про системи, має власні гносеологічні можливості. Вона тлумачить походження, устрій, функціонування і розвиток систем різної природи. Це – не просто світогляд, а струнка й цілісна наукове знання про світ систем.

Системний метод становить певну інтегральну сукупність відносно простих методів і прийомів пізнання, а також перетворення дійсності. Складники системності реалізують специфічні функції. Системний метод має пізнавальну і методологічну функції, а системна теорія пояснює інформацію й упорядковує знання.

У широкому розумінні



системний аналіз – це методологія з'ясування таких атрибутів і відносин в об'єктах, які важко спостерігати й не вдається зрозуміти за сприйняття цих об'єктів як цілісних систем, а також вивчення властивостей систем і взаємин як відношень між цілями й засобами їх реалізації.

Зауважимо, що в літературі можна знайти дещо вільне вживання таких понять, як "системний підхід", "принцип системності", "системний аналіз" і "системний метод". Найчастіше ними оперують як синонімами, але поняття "системний підхід" і "системний аналіз" потрібно розрізняти. Так, якщо системний підхід – це принцип пізнання, то системний аналіз є процесом, певним застосуванням принципу системності як методологічним комплексом дії (Metcalf et al., 2021).

Окрім того, системний аналіз здійснюють не лише стосовно функціонування і розвитку тих, або інших систем, але й щодо сукупності фактів,

подій, ідей тощо. Таким чином **системність** стає інструментом пізнавальної діяльності, ефективним арсеналом конкретних методів пізнання світу.

Теорія систем (системологія), як знання про системи, нагромаджує їх, упорядковує і використовує для пояснення систем різної природи. У ХХ ст. почала оформлятися цілісна загальна теорія систем, а також прикладні теорії. Надалі відбулося виокремлення прикладної області системного знання – **системотехніки**, як прикладного інженерного напрямку застосування системного підходу й системного аналізу з використанням засобів математики і комп'ютерної техніки.

З плином часу різні види системних концепцій інтегрувалися у **системологію**, яка охоплює загальну теорію систем, спеціальні (прикладні) й галузеві теорії систем, системотехніку (рис. 1.1). Вагомість системології в тому, що вона є найзагальнішою, всеохопною та інтегальною наукою про системи всіх видів і різного походження.



Рис. 1.1. Найзагальніша структура системології як науки

Загальна теорія систем (ЗТС) інтегрує найзагальніше знання про системи (Rouvreau & Drack, 2007). Вона перебуває під впливом головно двох наук – філософії, яка дає їй обґрунтування категоріального апарату, методи і прийоми пізнання, якісне бачення систем, і математики, що забезпечує формалізацію і кількісний аналіз систем (Adams, 2012). ЗТС покликана дати змогу науковцям відповідати на універсальні для всіх галузей знань запитання: 1) що має бути? 2) що може бути? 3) чого не може бути в будь-яких системах? Вагому методологічну роль у розвитку загальної теорії систем відіграють логіка, теорія чисел, кібернетика й інші науки.

Галузеві теорії систем розкривають специфіку систем різної природи. Йдеться про теорії фізичних, хімічних, біотичних, економічних,

господарських і соціальних систем, якими займаються у відповідних галузях наук.

Спеціальні теорії систем спрямовані на відображення їх окремих сторін, аспектів, зрізів, етапів. Вони перебувають під впливом відповідних теорій. Наприклад, теорія дисипативних систем, теорія перехідних систем, теорія еволюції систем тощо.

1.2. Історія, розвиток та сучасні сфери системного світосприйняття

Слово "система" (гр. *συστήμα* – ціле, складене з частин, організм, устрій, союз) походить із античної Греції. Понад 2,5 тис. років тому стародавні філософи (Фалес, Анаксимандр, Анаксімен, пізніше і Геракліт, Емпедокл та ін.) започаткували наукове вчення про будову об'єктивного світу. За узагальненням Емпедокла, Всесвіт існує на основі взаємодії та взаємоперетворення матеріальних тіл: води (за Фалесом), землі, повітря (за Анаксіменом) і вогню (за Гераклітом) під впливом природних чинників. Згідно з іонійською натуралістичною школою, всі **форми речовини** й вогню мали єдину матеріальну субстанцію, а якісні відмінності виникли внаслідок кількісних перетворень і густини цієї субстанції (вічний рух, за Анаксимандром).

Згодом Платон, Демокріт, Аристотель та ін. сприймали складні тіла, процеси і міфи Всесвіту як складені з різних систем (наприклад, атомів у тодішньому розумінні цього компонента системи – **П.Г.** і **О.С.**). Із розвитком астрономії була з'ясована геліоцентрична система ближнього космосу.

Далі розвиток системного світобачення пов'язаний із виникненням різних філософських концепцій, теорій про структуру пізнання і можливості прогнозу (Ф. Бекон, Г. Гегель, І. Кант, Й. Фіхте й ін.). Епоха зародження основ системного аналізу – це найчастіше дослідження систем фізичного або філософського (гносеологічного) походження.

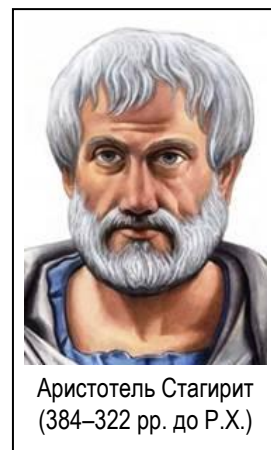
Постулат Аристотеля:



"Важливість цілого вище важливості його складників", поступово був витіснений актуальнішим **постулатом Галілея:**

"Ціле пояснюється властивостями його складників".

У конкретному вигляді науковий підхід до керування складними



системами запропонував М. Ампер у своїй праці "Дослідження філософії наук, або аналітичний виклад класифікації всіх людських знань" (ч. I – 1834 р., ч. II – 1843 р.). Учений уперше виокремив науку про керування державою під назвою "кібернетика". Сьогодні кібернетика – це наука, яка вивчає системи будь-якої природи, здатні приймати, зберігати трансформувати інформацію й використовувати її для керування та регулювання.



Норберт Вінер
(1894–1964)

У першій половині XIX ст. Броніслав. Трентовський розробив наукові основи практичної діяльності керівника – "гібернета", кібернетика, за сучасною лексикою. Його праця має назву "Ставлення філософії до кібернетики як до мистецтва керування народом" (1843 р.). Сенс грецького слова "гіберно" (адміністративна одиниця, населена людьми) був добре зрозумілий ще в XIX ст. У ширшому сенсі – це об'єкт керування, до складу якого належать люди, а гібернет – особа, що керує ресурсами й людьми, які населяють територію. Цей керівник повинен уміти, виходячи із потреб загального блага, примирювати певні суперечності, інші – загострювати, скеровуючи розвиток до потрібної мети.

За Б. Трентовським дійсно ефективно керування повинно враховувати всі внутрішні й зовнішні фактори, що впливають на об'єкт керування, а головна складність його реалізації пов'язана зі складністю поведінки людей. Учений далеко заглибився у розуміння й усвідомлення системності людських колективів, груп, у з'ясування складності керування людьми.

Усвідомлення деяких нових аспектів поняття системності й, особливо, керування простежуємо в роботах Н. Вінера. Його праця "Кібернетика" (1948) визначає цю науку як "...науку про управління та зв'язок у тваринах і машинах". Пізніше Н. Вінер почав аналізувати процеси в людському суспільстві з позицій кібернетики. З кібернетикою пов'язаний розвиток таких системних уявлень, як типізація моделей систем, виявлення особливого значення зворотних зв'язків у системі, підкреслення принципу оптимальності в управлінні й синтезі систем, усвідомлення значення інформації та можливостей її кількісного опису, розвиток методології моделювання, особливо виконання обчислювальних експериментів із застосуванням комп'ютера (що призвело до розвитку важливого напрямку моделювання – імітаційного). Проте досі кібернетика найкраще реалізувала свої можливості у дослідженні переважно технічних систем.



Людвіг фон Берталанфі
(1901–1972)

Започаткування загальної теорії систем пов'язують із Л. фон Берталанфі, який в 20–30-ті роки XX ст. займався питаннями системного підходу при вивченні фізіології організмів (Drack, 2009).

Розвиваючи загальну точку зору на необхідність цілісного підходу в біології та фізіології, він пропагував системний підхід як універсальну концепцію, що об'єднує інтереси різноманітних наук. Л. фон Берталанфі так описує народження своєї ідеї: "...організми – це організовані явища, і ми, біологи, повинні аналізувати їх в цьому аспекті. Я намагався застосувати цю організмичну програму в різних дослідженнях – метаболізму, росту, біофізики організму. Одним із моїх результатів виявилася так звана теорія відкритих систем і станів рухливої рівноваги, яка, по суті, є розширенням звичайної фізичної хімії, кінетики і термодинаміки. Виявилось, водночас, що я не зміг зупинитися жодного дня на обраній дорозі і був змушений прийти до тієї, яка ще більше генералізує, і яку я назвав загальною теорією систем". У період 1962–1968 років цей вчений інтегрував у загальній теорії систем положення багатьох наук: кібернетики, теорії інформації, теорії рішень, топології, факторного аналізу, теорії множин, теорії мереж, теорії автоматів, теорії графів (Drack & Pouvreau, 2015).

Отже, впродовж XIX–XX ст. учені з різних наукових галузей сформулювали основні системні категорії, системотвірні принципи й аксіоми, обґрунтували базові засади системності наукового знання.

В останній чверті XX ст., поряд з успіхами системного підходу, з'явилися кризові тенденції. Метод у низці випадків перестав задовольняти потреби часу. В індустріальну епоху системність базувалася на методології причинно-наслідкових зв'язків, детермінізму, однозначності явищ природи і суспільства. З переходом цивілізації від постіндустріальної до інформаційної фази розвитку однозначність розуміння природи предметів і явищ відступили. Зазначимо, що основна причина цього не стільки в кризі системного підходу чи його детерміністської транскрипції. Науковий і суспільний прогрес настільки прискорився, що від нововведень людське суспільство і знання постійно перебувають у стані трансформування – невинного оновлення.

Знаковим етапом принципового оновлення системної методології стало оприлюднення І. Пригожиним (лауреат Нобелівської премії 1977 року з хімії) теорії дисипативних структур, концепції хаосу і перехідних процесів. Основна частка його робіт присвячена нерівноважній термодинаміці і статистичній механіці незворотних процесів. Одне з головних досягнень вченого є в тому, що було показано існування нерівноважних термодинамічних систем, які, за певних умов, поглинаючи речовину й енергію зі свого довкілля, можуть здійснювати якісний стрибок до ускладнення. Причому такий стрибок не може бути передбачений, вихо-

дючи з класичних законів статистики. Такі системи пізніше були названі його ім'ям. Розрахунок цих систем став можливим завдяки його роботам, виконаним 1947 року.



Донелла Медоуз
(1941–2001)

Вагомою віхою в розумінні суті системності було розроблення концепції синергетики Г. Гакена (1980) і принципу синергізму. Цей принцип або мультиплікаційний підхід претендує на відокремлення і постає на перший план серед інших методологій, оскільки сприяє дослідженню проблеми ефективності систем. Завдяки цим новаціям системний метод набуває здатності пояснювати саме перехідні й нестаціонарні процеси, що й є властиві природним саморегульованим системам, якими визнані екосистеми всіх рівнів.

Ідеї системного підходу, що вагомо вплинули на поглиблення розуміння екосистем, плідно розвивали також В. Афанасьєв, Г. Бейтсон, І. Блауберг, К. Боулдінг, Л. Бріллюєн, Д. Гвішіані, Дж. Голдейн, В. Глушков, Дж. ван Гіг, Р. Ейкофф, П. Еткінс, Е. Зюсс, Е. Квейд, А. Кухтенко, М. Лесенко, Ю. Лібіх, А. Лотка, Л. Мамфорд, К. Мьобіус, Г. Мюрдаль, Л. Петрушенко, П. Погребняк, В. Сочава, Ф. Тарасенко, Г. Хардин, Е. Шумахер та інші.

Новітнім поштовхом до розвитку системного мислення і системного підходу став вихід 1972 року книги "The Limits to Growth" за авторства Д. Медоуз та ін., яка описувала глибину "кризи росту" чисельності населення та економіки на планеті і прогнозувала катастрофічні наслідки бездумного природокористування. Після смерті Д. Медоуз 2001 року була видана спеціальна "Абетка системного мислення" (Медоуз, 2011), яку авторка готувала навмисне для навчання системному мисленню її численних опонентів і критиків, особливо політичних популістів.

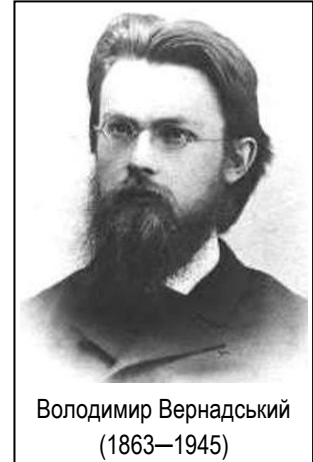
Отже, становлення системного світобачення історично було стимульоване фундаментальними науковими відкриттями. Від античного світу починаються епохальні наукові сходінки, узагальнивши які М. Згуровський і Н. Панкратова (2007) і Н. Панкратова (2018) поділили на три основні рівні пізнання Всесвіту.

Перший рівень – це епоха становлення основ механіки і сучасної фізики. Водночас було апробовано методологію багатофакторного аналізу стану і розвитку еволюційних фізичних процесів і явищ, на базі якої досі твориться сучасна техносфера.

Другий рівень – поширення дарвінізму, сприйняття ідеї руху й перманентної мінливості у живому світі. Найважливішим є утвердження парадигми якісних змін властивостей живих об'єктів у часі, як феномену розвитку. Отже явище розвитку – це не просто динаміка, а якісний стрибок.

На живі системи були творчо перенесені методи багатофакторного аналізу, які сприяли пізнанню еволюційних процесів сучасної біосфери.

Третій рівень – знаменує новітню епоху визнання єдності та взаємозумовленості всіх еволюційних процесів у матеріальному світі (фізичних, хімічних, біотичних, соціальних). Перший крок до цього пізнання зробив В. Вернадський. Учений виявив системність взаємозв'язків різних еволюційних процесів у масштабах всієї планети, їхню залежність від процесів у Всесвіті.



Володимир Вернадський
(1863–1945)

Отже, на останньому рівні бачимо, що потреба у системному осмисленні шляхів розвитку цивілізації й еволюції планети Земля, у реальній оцінці системної ролі "людини розумної" в біосфері, у формулюванні системних проблем глобального масштабу – це життєво важлива історична необхідність, а не тимчасова модна парадигма.

Повенемося до загальної теорії систем. Вона запропонована вченим-біологом Л. фон Берталанфі в 30-ті роки XX ст. і базується на ідеї визнання ізоморфізму законів, чинників функціонування системних об'єктів.



Загальна теорія систем (ЗТС) – це спеціально-наукова і логіко-методологічна концепція дослідження об'єктів, що є системами.

Предметом досліджень у рамках цієї теорії є: будова систем різних типів і рівнів; основні принципи й закономірності поведінки систем; функціонування і розвиток систем. Згідно з діалектичним методом, ЗТС – це така наука, за допомогою якої можна робити: 1) узагальнення; 2) прогнози; 3) давати пояснення; 4) формулювати нові питання; 5) виправляти помилки; 6) з'ясовувати чіткі зв'язки з найважливішими науковими теоріями і принципами; 7) здійснювати інтеграцію, економне "упакування" набутих знань на спільній для науки мові тощо.

Методологія теорії систем ґрунтується на універсальних філософських категоріях і постулатах, а також на аналітичних можливостях математики. Фундаментальним є **емпіричний метод**. Він подає нам світ таким, яким ми його виявляємо: досліджуємо різні системи, що існують в ньому (фізичні, геоматичні, ботанічні, зоосистеми, екосистеми тощо), а потім робимо висновки про виявлені закономірності (індуктивний метод) й узагальнення, тобто здійснюємо синтез.

У науці минулого, і частково у наш час, панував однобокий емпіризм. У біології та споріднених галузях лише збір і накопичення експедиційних чи експериментальних даних розглядали як дійсно "наукову діяльність".

Теорії ж прирівнювали до "спекуляцій" або "філософії". Нехтували тим, що просте нагромадження емпіричних даних хоч і є певним прогресом, проте ще не представляє власне "науки".

Поширеним є метод, за яким спочатку розглядають всю сукупність реальних систем, поступово звужуючи об'єкт дослідження до раціональної осяжної межі (дедуктивний метод).



Редукціонізм (лат. *reductio* – рух назад, повернення до попереднього стану) – методологічний принцип, згідно з яким складні явища можуть бути повністю пояснені за допомогою законів, властивих простим явищам.

Проте, експериментування з поняттями на манівці має не більше шансів на успіх, ніж безсистемне експериментування з біотичними об'єктами. Тому системний підхід передбачає традиційне поєднання індуктивного і дедуктивного методів.

Один із основоположників ЗТС Л. фон Берталанфі вважав, що з теорією систем мають частково спільні цілі й методи такі наукові дисципліни:

- ✓ кібернетика, що має в основі принцип зворотного зв'язку;
- ✓ теорія інформації, яка вводить поняття інформації як деякої вимірюваної кількості, та розвиває принципи передачі інформації;
- ✓ теорія ігор, яка аналізує в рамках особливого математичного апарату раціональну конкуренцію двох або більше протилежних сил для досягнення максимального виграшу й мінімального програшу;
- ✓ теорія ухвалення рішень, яка аналізує раціональний вибір у людських спільнотах;
- ✓ топологія, що охоплює неметричні області, такі, як теорія мереж і теорія графів;
- ✓ факторний аналіз, тобто процедури виділення чинників у багатозмінних явищах у психології й інших наукових областях;
- ✓ загальна теорія систем (у вузькому сенсі), яка намагається вивести із загальних визначень поняття "система", низку понять, властивих для організованих цілісностей, таких, як взаємодія, сума, механізація, централізація, конкуренція, фінальність тощо, і котра застосовує їх до конкретних явищ.

Також існує корелят теорії систем у прикладній науці, яку інколи називають наукою про системи, або системною наукою (англ. *Systems Science*). Цей напрям найтісніше пов'язаний із автоматикою.

У прикладних науках є: системотехніка (англ. *Systems Engineering*), тобто наукове планування, проектування, оцінку і конструювання систем "людина–машина"; дослідження операцій (англ. *Operations Research*), тобто наукове керування реальними системами людей, машин, матеріалів, грошей тощо; інженерна психологія (англ. *Human Engineering*) та ін.



Л. фон Берталанфі у своєму критичному огляді загальної теорії систем (1962) одну із п'яти причин її виникнення формулює так: "...існує наполеглива потреба в поширенні засобів науки на ті сфери, які виходять за рамки фізики і мають специфічні риси біологічних, психологічних і соціальних явищ. ...Мають бути побудовані нові понятійні моделі. ... (оскільки – *П.Г. і О.С.*) фізика – це лише одна модель, що має справу із певними аспектами реальності. ...Вона явно не охоплює всіх аспектів світу і ...специфічні проблеми в біології. ...Вірогідно, необхідне введення інших моделей, які відображають явища, що є поза компетенцією фізики".

1.3. Системний погляд на природокористування, збереження довкілля і сталий розвиток аграрної сфери

Живі організми (особини) або їх угруповання (біоценози) після свого народження втягуються у складний ланцюг взаємодій із усім, що оточує їх. Біота планети утворює практично суцільну "плівку життя" на Землі (за В. Вернадським).

Своїм життям організми та їх популяції впливають на своє довкілля – свій дім, змінюючи його. До зародження цивілізації і людина біотична була гармонійною часткою природи, проте тепер усе змінилося. Коли виникала наука екологія, її розглядали як науку про "дім природи".

Екологія вивчає всі взаємодії компонентів природи в сукупності. З численних визначень екології синтезуємо своє, яке охоплює всі її аспекти.



Екологія – це наука, що вивчає взаємовідношення живих організмів і їх сукупностей між собою і з навколишнім біотичним та абіотичним середовищем, структурно-функціональні властивості екосистем – від найменших консорційних до біогеосфери включно, історію формування, еволюцію, природну й антропогенну динаміку цих систем, їхні корисні функції для людини та можливості їх розумного використання (Голубець і Гнатів, 2007).

Іншими словами, вона вивчає як організми, популяції та складніші біоценози, використовуючи органічні, мінеральні й енергетичні компоненти свого довкілля, продукують нову органічну речовину, як ця речовина розподіляється між іншими організмами у певній екосистемі, та яким чином ця продукувана субстанція врешті-решт знову розпадається на елементарні мінеральні компоненти.

Водночас, екологи прагнуть пізнати, якими механізмами створюється і підтримується дивовижна стабільність природних комплексів, що

саме забезпечує збереження та зміну їх просторово-часової структури, як складаються у них харчові ланцюги та кругообіг поживних речовин (біо-геохімічні цикли), якими чинниками визначається їхній поступ та еволюція. Отже, екологія вивчає надорганізмовий і надпопуляційний рівні функціонування біотичних систем і сукупність або структуру зв'язків між організмами, популяціями та їх середовищем. Тому її невід'ємним та універсальним методом стає системний аналіз.

На початку ХХІ ст. в Україні вся сукупність знань про структурну й функціональну організацію живих систем, про взаємовідношення між людиною, людським суспільством і біосферою та природою загалом, про проблеми її охорони тяжіє до двох блоків: перший – власне екологічний; другий – соціоекологічний. До першого належить фундаментальна (класична, як розділ біології) екологія, прикладні екології, охорона природи й навколишнього *природного середовища*. Другий блок охоплює соціоекологію, екогомологію – галузі знань про структуру й роботу створених людьми соціальних земних систем. На Заході добре розвинуті середовищезнавство (інвайронментологія) й захист навколишнього щодо людини середовища (її доквілля).

Екологія має фундаментальне завдання вивчати особливості існування живих систем у функціонально взаємопов'язаному з ними природному чи антропізованому середовищі, їхню стійкість до збурювального впливу виробничої діяльності людини та природних стихій, способу підтримування їхніх життєвих функцій і збереження їх у мінливому зовнішньому середовищі.



Основними розділами екології як системи знань, є **аутекологія** (екологія організмів – організмових систем), **демекологія** (екологія популяційних систем), **синекологія** (екологія біотичних систем-угруповань) і **біогеосферологія** (вчення про глобальну екосистему – біогеосферу).

У системі прикладних розділів виокремлені: екологія лісових систем (сільваекологія), екологія аграрних систем (агроекологія), екологія водних систем (акваекологія), техно- і урбоекологія, екологія людини як живої істоти (антропоекологія), соціоекологія (наука про взаємовідношення соціумів та екосистем – в західних країнах середовищезнавство або інвайронментологія), палеоекологія, еволюційна екологія й ін. Зрозуміло, що біотичні угруповання чи конкретні екосистеми (лісові, лучні, водні) можуть бути об'єктами фундаментальних екологічних досліджень, тому межі між фундаментальною екологією та її прикладними розділами є умовними. Критерієм для такого розмежування є різнорівнева цілеспрямованість і остаточна мета системного дослі-

дження: пізнання загальних екологічних закономірностей чи конкретних особливостей, важливих для певної галузі виробництва.

Екологія є засадничою базою для прикладної науки – *охорони природи*. Вона покликана розробляти всю сукупність системних заходів, спрямованих на збереження біотичного і ландшафтного різноманіття, територіальних природоохоронних об'єктів (резерватів, заповідників, заказників, пам'яток природи, біотопів тощо), місць трапляння рідкісних, ендемічних, реліктових видів та їхніх угруповань, зрештою, рідкісних чи унікальних середовищ (екотопів) для формування та існування таких самих біоугруповань, реінтродукції та інтродукції в науково обґрунтованих випадках тощо. Виокремлена потреба захисту й збереження унікальних етно-культурних середовищ у їх природному довіллі.

Новітньою ознакою нашого часу є те, що перед сучасною "людиною розумною" постало завдання: постійно стежити за станом середовища, у якому існують природні, штучні екосистеми та саме людство; контролювати стан і динаміку довкілля; пізнавати закономірності його змін під впливом різних антропогенних і природних чинників; вивчати способи збереження його у сприятливих для суспільства параметрах, захищати від руйнівних процесів. Отже, системна роль людини на планеті Земля – це теж питання і завдання для невідкладного вивчення.

Особливо стали актуальними такі прикладні галузі науки, як середовищезнавство та споріднена з нею *захист довкілля* (сукупність наукових і практичних методів, способів та заходів захисту середовища існування людей, розвитку людських цивілізацій (Khoury, 2025. Гнатів, 2007; Гнатів і Голубець, 2008).



Інвайронментологія (середовищезнавство) – прикладна галузь знань про навколишнє еко-соціо-економічне середовище розумової та виробничої діяльності людини й людських спільнот, про невиснажливе використання природних, соціальних та економічних ресурсів і збереження цього середовища сприятливим для теперішніх і майбутніх поколінь в умовах переходу до сталого розвитку.

Практичні рішення проблем екобезпечного (збалансованого, сталого) розвитку значно випередили формування системного розуміння проблем реалізації глобальної програми такого розвитку. Для цього потрібні нові підходи, новітня галузь системних знань, об'єктом аналізу якої були би надскладні, інтегровані в єдину надсистему, еко-, соціо- й економічні підсистеми, а предметом – особливості їхнього функціонування, самоорганізації й саморегуляції за участю людини, яка охоплює її єдиним контуром



керування (єдиною пам'яттю та єдиним кібернетичним регулятором). Таку сферу знань, що перебуває у стадії становлення і бурхливого розвитку в різних формах, із більшим чи меншим успіхом представлять їх сучасні напрями: соціоекологія, ландшафтна екологія, урбоекологія, техноекологія й інші.

Важливо, щоби з урахуванням потреби нового рівня системного мислення (Khoury, 2025), системного підходу не лише до комплексного дослідження структурно-функціональних особливостей гео-, еко- та соціальних систем і закономірностей розвитку геосоціосистемних процесів, але й до відповідного обґрунтування рішень на всіх рівнях не за тривіальною схемою класичної галузевої діяльності, а відповідно до сучасного бачення системного функціонування соціосфери та підпорядкованих їй геоматичних, еко- і соціосистем.



2.1. Понятійний апарат системології

Для відображення системи та здійснення системного аналізу потрібен спеціальний понятійний комплекс – сукупність категорій і дефініцій, які повинні мати однозначне трактування та предметне застосування.

Вчені пропонують кілька сотень категорій і термінів у сфері системного підходу (Ross & Wade, 2015). Їх можна згрупувати як базисні категорії, на яких ґрунтуються всі інші поняття. До таких належать: найзагальніші категорії системи і її складових; категорії, що описують властивості; категорії станів системи, її середовища і процесів; категорії відображення системи; категорії, які описують ефективність системи; категорії системного аналізу.

Базисні категорії є засадничими поняттями для означення системи. Головні з них мають такі визначення.

Ціле – форма існування системи в однозначно виразній якості, що означає її незалежність від інших систем. Ціле – це завжди завершене, таке, що об'єднує органічно взаємопов'язані між собою частини.

Цілісність – властивість однозначної якості системи як цілого, яку означають елементи в їх реальній взаємодії. Цілісність – це основа стабільності, постійності системи.

Множина – набір, сукупність будь-яких об'єктів (елементів, компонентів), що відрізняються загальною, притаманною для всіх їх властивістю. Це поняття не є логічним, а лише таким, що пояснює. Така нечіткість визначає нечіткість теорії систем, яка базується на нестрогих поняттях.

Сукупність – поєднання, сполучення, загальний наслідок чого-небудь.

Базисні категорії, які дають розуміння системи, мають такі визначення.

Система – сукупність елементів (компонентів), що перебувають у взаємних відношеннях і зв'язках із середовищем, та утворюють певну природну або штучну цілісність. Протилежним до "системи" поняттям є "не система".

Підсистема – елемент системи, який при детальному розгляді виявляється системою. Будь-яка система має два-три або й багато рівнів підсистем.

Надсистема – більш загальна система, яка охоплює підсистеми.

Допоміжні категорії системології: елемент, властивість, емерджентність, зв'язок, функція, структура, організація, простота, складність, мета системи, гомеостаз, закритість і відкритість, стан, процес, хаос, інтеграція, синергія, адаптація, ентропія та ін.

Найважливіші категорії, що визначають будову системи, можна описати за такими визначеннями.

Елемент (компонент) – умовно неподільна одиниця у застосованому способі розчленовування системи.

Властивість – приналежність об'єкта (елемента) до певного класу речей, явищ, яка ні якісно, ні кількісно не змінює його (тобто не утворює внаслідок такої приналежності нового явища, предмета, об'єкта). Так, бути "зеленим" означає лише належати до "зеленого руху", але така приналежність при цьому не утворює нового члена суспільства. Проте, зв'язки між елементами зумовлюють появу нових властивостей у цілісній їх сукупності – системі.

Виникає феномен – **емерджентності**, тобто ознака чи властивість, яка не існує у будь-якого з елементів, розглянутого окремо.

Зв'язок – взаємне обмеження "свободи" елементів, що створює обмеження на поведінку об'єктів і, головне, залежність між ними. Прямий зв'язок – безпосередня дія елементів один на одного і на функції системи, зворотний зв'язок – дія результатів функціонування системи на процес самого функціонування.

Структура – упорядкованість відношень, що пов'язують елементи системи і які забезпечують її рівновагу, спосіб організації системи, тип зв'язків.

Організація – властивість усіх систем різного ієрархічного рівня, що відповідає певній упорядкованості її змісту, відповідно до дії системотвірних чинників. Стосовно конкретного рівня розчленування, **організація** – це властивість об'єктів проявляти взаємозалежну поведінку частин у рамках цілого.

Категорії, що описують властивості системи або її елементів, наведені нижче.

Простота – властивість об'єкта, який приймається в іншій системі як елемент.

Складність – властивість елемента, який представлений в іншій системі як підсистема.

Мета системи – збереження звичного для неї, зрівноваженого стану за будь-якої зовнішньої дії. Мету виражають у вигляді цільової функції.



Іншими словами, постійність дій у відповідь на певну зовнішню дію є метою системи. Отже, мета визначає напрям дій системи (або саму її суть). Система, як правило, має кілька цілей, що створюють ієрархію.

Гомеостаз – динамічна рівновага системи у межах мети її функціонування. Поняття вперше запропонував біолог У. Кеннон (1932) для опису фізіологічних процесів, які підтримують життєві стани систем організму (тиск крові, температура, гормональний баланс тощо). Порушення гомеостазу спричинює деструктивні процеси, хвороби організму.

Закритість – повна ізолюваність системи від навколишнього середовища і жорстка детермінована поведінка елементів.

Стан системи описують такими категоріями.

Стан системи – це множина її властивостей, що існують водночас.

Перехідний стан – це такий інтервал, у якому система буває в процесі переходу між двома станами.

Стабільний стан – утримання системою своїх особливих (оригінальних) властивостей.

Кризовий стан – це стан, у якому система перестає структурно і функціонально відповідати своєму призначенню (криза).

Процес – це явище зміни стану системи.

Хаос (безлад) – це стан функціональної неврегульованості, який зумовлює руйнування або виникнення систем.

Ентропія (поворот, перетворення) – функціональний стан системи, що означає втрату придатної до використання нею енергії (у самоплинних процесах – наближення до хаосу). У фізиці – це розсіювання енергії у вигляді тепла у закритій термодинамічній системі, у математиці й інформатиці – міра невизначеності ознак певної сукупності властивостей відповідних систем.

Негентропія (негативна ентропія – протилежне поняття щодо ентропії) – явище зростання упорядкованості в системі, збільшення у ній внутрішньої енергії і зменшення невизначеності (властива для всіх відкритих живих систем). Якщо людина позбавляє себе їжі – тобто енергії (робить себе частково закритою на "вході" системою), її організм, з-поміж іншого і психіка, незворотно деградує унаслідок припинення негентропії системи організму.

Оточення системи можна описувати такими категоріями.

Середовище внутрішнє – це сукупність об'єктів у межах системи, які впливають на її поведінку, але не належать їй.

Середовище навколишнє – це зовнішнє середовище системи або сукупність об'єктів, які розташовані за межами системи і впливають на неї, але не належать їй.

Головні категорії для опису процесів такі.

Функція – це властивість системи чинити конкретні перетворення, для виконання яких її елементи здійснюють рух, а також взаємодія системи з її навколишнім середовищем у процесі досягнення мети або збереження рівноваги.

Функціонування – це дія системи із плином часу.

Послідовність станів системи, що визначена її функцією, відображає *поведінку системи*.

За особливостями поведінки і, отже, за типом законів, що діють у системі, розрізняють системи реактивні й активні. Функціонування *реактивних* систем визначає лише дія середовища.

У функціонуванні систем *активних* істотну роль відіграють внутрішні закони їхньої поведінки, певна внутрішньо спричинена мета системи, а дії середовища на систему відіграють підпорядковану роль.

Керування – спрямовування системи до стану рівноваги або на досягнення мети.

Інтеграція – це процес і механізм об'єднання і поєднаності елементів, яким властиві інтегративність, системотвірні зміни, чинники, зв'язки тощо.

Синергія – це феномен узгодженої колективної взаємодії окремих елементів у системотвірному процесі. Взаємодія внаслідок синергізму створює емерджентний результат функціонування системи, який перевищує суму результатів функціонування її окремих елементів.

Адаптація – це явище пристосування системи до навколишнього середовища без утрати своєї ідентичності.

Деградація – це процес погіршення властивостей системи.

Руйнування – це спричинення неврегульованості, підвищення ентропійності аж до встановлення хаосу.

Зростання – це процес збільшення кількісних параметрів системи.

Розвиток є процесом саморуху від простого до складного й нового, або зміни в матеріальних та ідеальних системах, які означають виникнення нової якості.

Агресія – це спосіб обмеження властивостей системи з метою її знищення, руйнування або вимушеної інтеграції.

Поглинання – це зовнішня дія з метою інтеграції (захоплення, присвоєння).

Для відображення системи застосовують різні категорії.

Інформація охоплює відомості, знання спостерігача про систему, відображення міри її різноманітності.

Модель системи – штучний об'єкт, який представляє систему в обсязі певних знань про неї, і який може слугувати її заміною в дослідницькому або практичному процесах, а отримані в ході маніпуляцій результати можуть бути перенесені на саму систему з метою її вдосконалення, створення, знищення тощо.

Проект системи – це засіб конструювання об'єкта як моделі системи.

Системам властиві інші різноманітні ефекти, найважливіші з-поміж яких: ефект цілісності; інтеграційний ефект; адаптивність; синергетичний ефект, рівень ентропійності тощо.

Для різнобічного розуміння змісту системного аналізу найважливішими є такі категорії.

Аналіз як загальне поняття – це дослідницька діяльність за допомогою уявного розчленування системи на складники.

Аналіз системний охоплює сукупність методів, прийомів та алгоритмів застосування системного підходу в аналітичній діяльності.

Аналіз системний дослідницький будується як дослідження для використання результатів у науці.

Аналіз системний загальний спирається на загальну теорію систем і його здійснюють із найзагальніших системних позицій.

Аналіз системний прикладний є специфічним різновидом практичної діяльності для використання результатів із практичною метою.

Аналіз системний спеціальний спирається на спеціальні теорії систем і бере до уваги специфіку природи систем.

Уся теорія систем побудована на фундаменті із чотирьох аксіом і чотирьох засадничих законів, які виведені з аксіом.

Аксіома перша – в системі завжди є одна постійна генеральна мета. Це так званий **принцип цілеспрямованості**, призначеності системи.

Аксіома друга – мету для системи ставить зовнішнє середовище або надсистема. Іншими словами, це **принцип задання мети** для системи.

Аксіома третя – для досягнення мети система повинна діяти певним чином. Відповідає **принципу виконання дії** системами.

Аксіома четверта стверджує – результат дії систем існує незалежно від самих систем. Її ще розглядають як **принцип незалежності результату дії**.

На підставі визнання перших трьох аксіом сформульовані закони загальної теорії систем.

Зокрема, це – **закон збереження** або **принцип постійності дії** системи для збереження постійності мети. Закон збереження матерії (матерія ніколи не з'являється з нічого і вона ніколи нікуди не зникає) є лише прикладним фізичним законом, що сформульований раніше, і може слугувати прикладом індуктивного мислення в ході становлення теорії систем.

Наступний, це – **закон причинно-наслідкових обмежень** або **принцип детермінізму дій** системи. Іншими словами, на будь-який наслідок є своя причина, або нічого само собою без причини не з'являється і просто так без наслідків не зникає. Система завжди має реагувати лише на визначені зовнішні дії та завжди давати лише визначену реакцію на ці дії. Отже, хеморецептор на O_2 завжди реагуватиме тільки на O_2 , а не Na^+ , Ca^{++} або

глюкозу. Водночас він видасть певний потенціал дії, а не, наприклад, порцію гормону, механічне скорочення чи щось інше.

Визначеність зовнішніх дій і реакцій на них накладає обмеження на їхні можливі види. Тому із закону причинно-наслідкових обмежень виникає необхідність:

а) виконання певної (специфічної) дії для досягнення визначеної (специфічної) мети;

б) наявності певної (специфічної) системи (підсистеми) для виконання відповідної дії тому, що жодна дія сама собою не відбудеться;

в) черговості дій: система завжди починає діяти і виробляє свій результат дії лише після впливу на неї зовнішньої дії.

Отже, завжди результат дії системи може з'явитися тільки після певних дій іншої системи або надсистеми. Зовнішня дія первинна, а результат дії – вторинний. Зі всіх можливих дій будуть виконані лише ті, які спричинені зовнішньою дією і визначені можливостями системи, яка реагує. Якщо після виконаної зовнішньої дії мета вже досягнута і немає нової зовнішньої дії, після досягнення результату дії система має бути в повному спокої. Це настає тому, що лише мета зобов'язувала систему діяти, а вона вже досягнута. Немає мети, немає дій. Якщо з'явиться нова зовнішня дія, то з'явиться і нова мета, і лише тоді система знову почне діяти і виникне новий результат дії.

Важливими є *закон ієрархії цілей* або *принцип розподілу мети* на ієрархічно підпорядковані цілі, а також, *закон ієрархії систем* або *принцип розподілу підпорядкованих цілей* між підсистемами і *принцип підлеглості підсистем*.

2.2. Системотвірні чинники: речовина, енергія, простір, час, свідомість

Закон збереження – це один з основних законів об'єктивного світу. Виходячи з його фізичного трактування, що матерія ніколи не з'являється з нічого, і вона ніколи нікуди не зникає, а лише перетворюється (тобто вона була, є і буде завжди), окреслимо фундаментальні *середовищевірні* та *системотвірні субстанції*. Всі вони об'єднані у три основні групи форм руху (існування) матерії: нежива природа, жива природа і суспільство. До основних форм існування матерії належать речовина, енергія, простір, час і свідомість.

Речовина й енергія є взаємозалежними формами існування матерії. Речовина може мати відомі нині стани: рідкий, твердий, газоподібний, плазмоподібний, а також набувати вигляду різних тіл, включаючи живі. *Речовина* завжди втілюється у які-небудь об'єкти – від елементарних час-



тинок до галактик. На планеті Земля, та й у Всесвіті, більш-менш стійка речовина – це сукупність хімічних елементів. Кожен стан речовини може переходити в інший (фізичні, хімічні, біотичні структурні перетворення) за рахунок перегрупування елементів шляхом зміни зв'язків між ними. Речовина й енергія взаємоперетворюються під дією зовнішніх сил за закономірністю, розрахованою А. Айнштайном, оскільки



$$c = \sqrt{\frac{E}{m}},$$

де:

c – швидкість світлового променя в абсолютному вакуумі;

E – енергія; m – маса.

Отже константа c є універсальним співвідношенням перетворюваної енергії та маси у Всесвіті. Основний обсяг таких перетворень відбувається переважно у надрах зірок на різних стадіях їх еволюції.



Енергія (гр. ενεργός – дія) – загальна кількісна міра руху і взаємодії всіх видів матерії.

Поняття енергії дає змогу розуміти всі явища, які спостерігаємо у природі. Її сукупна міра у Всесвіті – $E = mc^2$. Із позицій системності енергією є міра (або кількість) взаємодії між елементами в середині системи чи між системами, яку потрібно реалізувати при створенні зв'язку. Фізичною мірою енергії може бути, наприклад, калорія, джоуль.

Будь-які природні об'єкти є системами, тому взаємодії між ними є взаємодіями між системами. Водночас, системи утворюються за рахунок взаємодії між їхніми елементами й виникнення міжелементних зв'язків. Від взаємодії між системами утворюються вже міжсистемні зв'язки.

Будь-яка дія, включаючи взаємодію, потребує енергії. Тому з утворенням зв'язку в нього "вкладається" енергія. Тож, оскільки взаємодія між елементами системи або різними системами є зв'язком між ними, то зв'язок, відповідно, є енергетичним поняттям. Іншими словами, при створенні системи з елементів і за її перебудови із простої у складну має бути витрачена енергія, яка буде освоєна на формування нових зв'язків між елементами.

За руйнування системи зв'язки між її елементами зникають із виділенням (розсіюванням, утратою) енергії. Системи зберігаються за рахунок енергії зв'язків між її елементами. Це є внутрішня енергія системи. При руйнуванні цих зв'язків енергія вивільняється, тож сама система як ціліс-

ний об'єкт зникає. Звідси, внутрішня енергія системи – це енергія зв'язків між елементами системи.

За внутрішньосистемних перетворень (в ендотермічних реакціях) на утворення нових зв'язків іде енергія, яка надходить у систему ззовні. Внутрішня енергія системи може бути витрачена в екзотермічних реакціях – внутрішніх перебудовах за рахунок розриву усталених зв'язків між її власними елементами, що вже існували до моменту змін. Коли ж зв'язок уже утворений, то через закон збереження його енергія вже не змінюється, якщо на систему не чинити певної дії.

Усі матеріальні тіла, явища, процеси реалізуються у просторі упродовж невинного плину часу. Простір і час є базисними властивостями (формами руху – філософське трактування – **П.Г.** і **О.С.**) матерії, які можна практично застосувати для визначення відмінностей у разі спостереження за будь-якою дією чи елементом.



Простір визначає порядок взаєморозташування компонентів довкілля.

Час – це послідовність існування тіл і явищ, які змінюють одне одного (темпоральні зміни), суб'єктивно з'ясована завдяки свідомості доступними людині приладами чи окомірно.

Для живих систем час має напрям. У неживій, поза межами свідомості, природі часу не існує. Час немає фізичного сенсу поза свідомістю, оскільки немає ні початку, ні кінця, і немає розмірності. Це лише відносна шкала, придумана людиною – нумерологічний порядок фізичних змін. Всесвіт за своєю сутністю "безчасовий". Ідея, що час є четвертим виміром простору, не принесла особливого прогресу у фундаментальну фізику і, на думку вчених, є у протиріччі з формалізмом спеціальної теорії відносності. Ця теорія стверджує, що простір і час єдині та взаємозалежні форми існування матерії, бачення плину часу і розміри тіл залежать від швидкості переміщення вимірюваних об'єктів у просторі, а геометричні параметри чотиривимірного континууму (простір–час) змінюються залежно від скупчення мас речовини й породженого ними гравітаційного поля.

Водночас існує альтернативна гіпотеза, що Всесвіт є тривимірним від макрорівня до фотонного мікрорівня (за Планком). У цьому тривимірному просторі не існує "скорочення довжини", немає ніякого "уповільнення часу". Що дійсно існує, так це швидкість матеріальних змін в релятивістському сенсі (за Айнштайном).

Вірогідно, час – це інтелектуальний засіб упорядковування результатів фізичного вимірювання осяжних людською свідомістю процесів і явищ за допомогою рукотворних приладів і фіксування послідовності подій.

У просторі з плином часу відбувається і соціальний рух матерії. Реальними системами світу є соціальні, політичні, економічні, наукові, духовні, культурні й інші. Вони можуть активно впливати як один на одного, так і на інші форми матерії (через діяльність інших систем і людини), існують і діють не хаотично, а за специфічними, але жорсткими законами свого існування. Їх також стосується закон збереження, тому що соціальні системи мають свої види "енергії", яка не з'явилася з нічого, а можуть лише переходити від однієї системи до іншої.

Наріжною властивістю людських соціальних систем та їхнім енергетичними стрижнем є **свідомість** – індивідуальна і соціальна. Носієм свідомості є *Homo sapiens* – людина розумна. Системотвірна роль свідомості у соціальній групі форм існування матерії є вирішальною. Її можливості й ресурс ще належно не вивчені, хоча набуває поширення переконання, що саме свідомість соціальна (досвід індивідуальний і суспільний) буде визначальною силою щодо збереження оптимістичних перспектив як для людської цивілізації, так і для біосфери.

2.3. Еволюція Всесвіту, форм і функцій

Поряд із уявленнями про виникнення світу і його будову, які мають свої корені ще у доісторичні часи, згодом сформованими на релігійних віруваннях, людство постійно намагалося дати певне наукове пояснення цієї загадки, певним чином упорядкувати доступні відомості про рух матерії (за теперішнім визначенням – **П.Г.** і **О.С.**) .

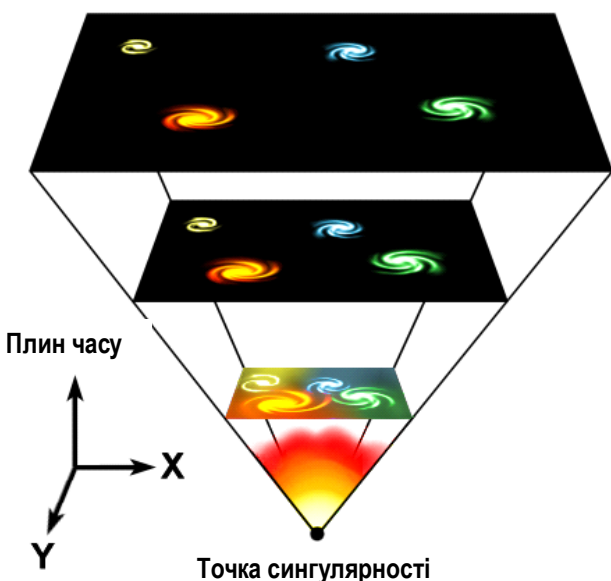


Рис. 2.1. Розширення Всесвіту після „великого вибуху“

Сучасною науковою ідеєю **походження Всесвіту**, яка претендує на утвердження як теорія, є гіпотеза "великого вибуху" (рис. 2.1). У вузькому сенсі останнє словосполучення вживають для позначення точки у часі, коли почалося, на думку вчених Р. Алфера, Х. Бете і Г. Гамова, вибухоподібне розширення осяжного для нас Всесвіту (за підрахунками приблизно 14–15 млрд років тому). У ширшому сенсі "**великим вибухом**" називають популярну космологічну парадигму, яка пояснює витоки й розширення Всесвіту (за Е. Габблом, 1932), а також склад і композицію первісної



матерії за допомогою нуклеосинтезу, як стверджує відповідна теорія.

Одним із наслідків "великого вибуху" вважають те, що умови сьогоденішнього Всесвіту відрізняються від умов у минулому і в майбутньому. Виходячи з цієї моделі, 1948 року Г. Гамов переконливо спрогнозував існування космічної мікрохвильової фонові радіації, яка була відкрита згодом – у шістдесятих роках, і послужила підтвердженням на користь теорії "великого вибуху" на противагу теорії стаціонарного Всесвіту. Екстрапольовані на минуле, ці спостереження вказують на те, що Всесвіт розширився із початкового стану, в якому вся матерія й енергія були сконцентровані, маючи величезну температуру й густину. Фізики не мають єдиної думки про те, що саме передувало початковому стану, хоча загальна теорія відносності вказує на реальність гравітаційної сингулярності (єдиної точки).

Як відбувався "великий вибух", яка послідовність різних стадій від миті створення Всесвіту – це предмет космології. Зупинимось лише на окремих стадіях, які дають уявлення про системну еволюцію і системну будову світу.

Виходячи із закону, що матерія ніколи не з'являється з нічого, і вона ніколи нікуди не зникає, фізики вважають, що до моменту "великого вибуху" речовина й енергія були єдиним цілим, що існувало в одній точці – точці сингулярності. Панувала абсолютна симетрія – ідеальна простота, яка можлива лише за надвисоких енергій, недосяжних для людства (Pagels, 1982).

У перші миттєвості "великого вибуху" матерія втратила симетрію та розділилася на речовину й енергію. Виникла асиметрія. Упродовж наносекунд його початку матерія зазнавала надшвидких енергетичних і просторових трансформацій, що у перші секунди та хвилини призвели до утворення кварків та антикварків. Так почалося самозбирання структур, з'явилися **перші форми** існування матерії. Кварки парами з антикварками почали взаємодіяти й конденсуватися у нейтрони й протони. Тому одночасно з'явилася **перша функція** – енергетична взаємодія форм, що зумовила утворення **перших систем**. До третьої хвилини протони й нейтрони за цим же принципом, але за дії вже іншого виду енергії, збиралися у стабільні ядра. Енергії від випадкових зіткнень уже стало не достатньо, щоб розбивати ядра майбутніх атомів. Всесвіт ще залишався непрозорим, оскільки іони не пропускали світло. Упродовж подальших 300 тис. років довкола ядер конденсувалися електрони, виникли атоми. Світло вже так сильно не розсіювалося і не поглиналося, отже, Всесвіт набув прозорості. Космічний простір ставав чорним. За наступних 3 млрд років з'явилися перші квазари. Розпочалася хімічна еволюція простих фізичних систем – атомів, котрі почали об'єднуватися у молекули. До 5 млрд років тривало утворення перших галактик. Сформувалися всі відомі фізичні **форми енергії** – гравітаційна, електромагнітна, ядерна.



Після 10 млрд років від моменту "великого вибуху" народжується **Сонячна система**. Вона зазнає значних структурних перетворень, що спричиняють формування планет і Землі з їхньою твердою і прохолодною літосферою. Вірогідно на інших планетах, але достеменно на Землі з'являється вода, атмосфера й умови для стабілізації органічних сполук, що могли стати основою органічних макромолекул, з-поміж іншого і білкових агрегатів. За таких умов на Землі почали виникати й адаптуватися перші **форми живих систем** – первісні організми.

Нагадаймо й іншу гіпотезу, яка стверджує, що наш Всесвіт виник не із сингулярності унаслідок "великого вибуху", а як результат "великого стрибка", спричиненого квантовими процесами й силами. Згідно з іншим припущенням, осяжний Всесвіт – це лише одна частина із безмежної кількості інших всесвітів, сукупність яких називають Мультивсесвітом (Метавсесвітом). Його загально побачити чи виміряти неможливо, а уявити важко. Але керуючись логікою визнання вічності існування матеріального світу та за системного світобачення, така гіпотеза актуальна.

Водночас зауважимо, що від моменту розділення матерії на речовину й енергію (виникнення асиметрії, явища перетворення та передавання енергії, тобто функції) у Всесвіті триває і зворотній процес – приєднання, сполучення, об'єднання. Тіла, що мають більше енергії, приєднують ті, які не мають її, або об'єднуються із тими, які мають рівноцінний потенціал. Ця дійова сутність матерії у різних варіантах є всюдишньою і, навіть у біотичних і суспільних утвореннях вона виявляє свою непоборну силу.

Задовго до пояснення фізичного походження світу виникла перша теорія **зародження й еволюції життя** на Землі. Хоча перші згадки про ідею еволюції сягають давнини, сучасної форми вона набула в працях А. Воллеса та Ч. Дарвіна. У 1930-х роках синтетична теорія еволюції спробувала об'єднати еволюційну теорію з генетикою Г. Менделя. Еволюційна теорія – наукова теорія, що пояснює поступальний розвиток життя на Землі від простих форм (клітини, бактерії) до складних (рис. 2.2).

Усі організми, чи то віруси, бактерії, рослини, гриби чи тварини, мають подібний елементарний хімічний склад, але дуже відмінну структурну і функціональну будову. Найперші організми на Землі, прокаріоти, що з'явилися приблизно 3,8–4,0 млрд років тому, мали один тип клітин, подальші – еукаріоти – два, і так далі.

Вінцем досконалості стала Людина, організм якої має 254 типи спеціалізованих груп клітин. При цьому функціональна топологія завжди була зосереджена в одному організмі та координувалася його системою керування. Зростання кількості функцій або кількості типів клітин залежно від часу має ступеневий вид, що відповідає принципу самоорганізованої критичності. У міру збільшення кількості функцій, паралельно вдосконалювалася система керування ними. Спочатку природа створила в

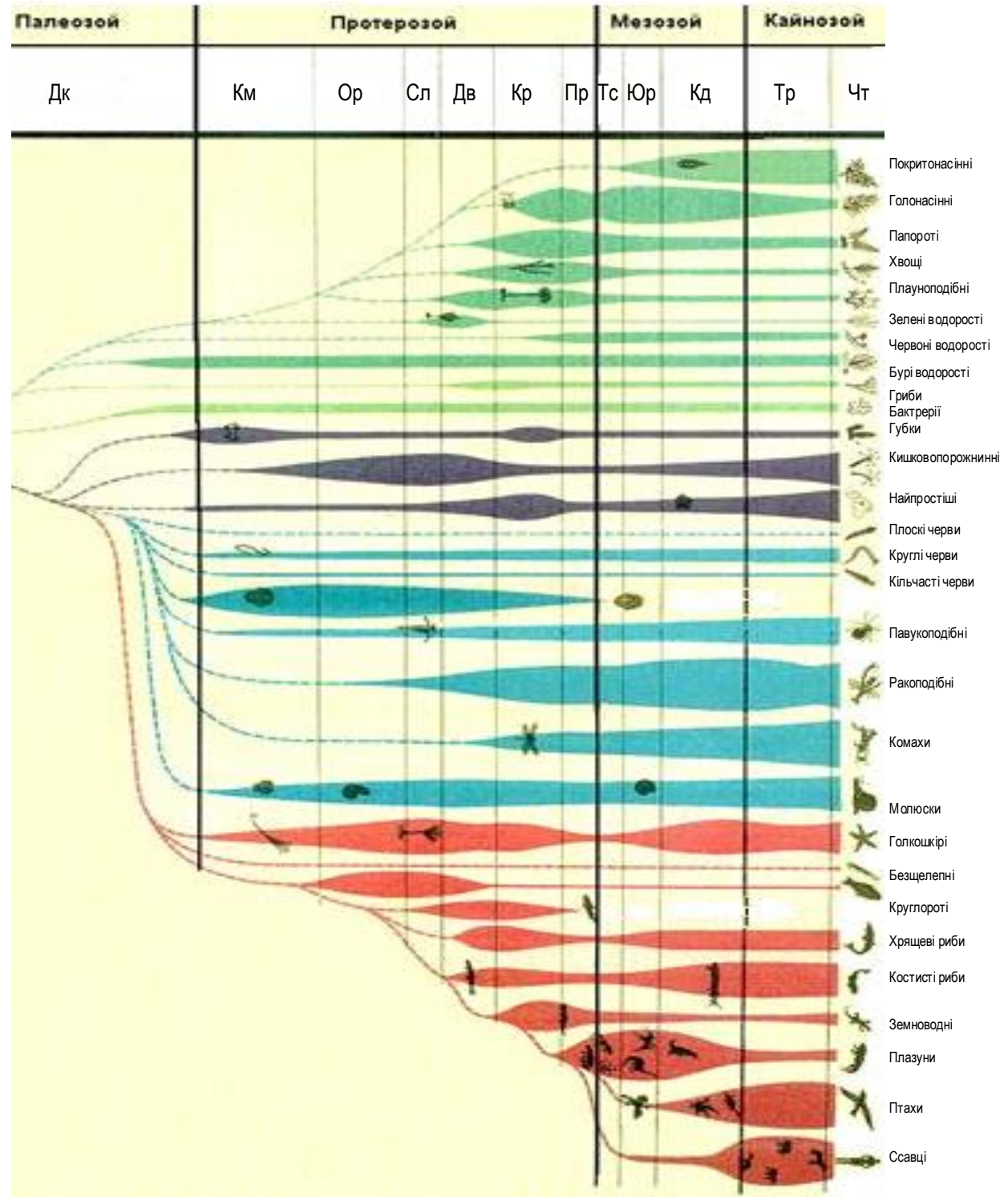


Рис. 2.2. Схема панівної теорії еволюції біоти.

Геологічні періоди: Дк – Докембрій; Км – Кембрій; Ор – Ордовик; Сл – Силур; Дв – Девон; Кр – Карбон; Пр – Пермь; Тс – Триас; Юр – Юра́; Кд – Крейда; Тр – Третинний; Чт – Четвертинний

Потім нервові клітини були об'єднані в центри (ганглії), що забезпечило цілісну (системну) реакцію організму у відповідь на дію. Згодом ганглії були об'єднані в головному відділі й виник головний мозок, що вже забезпечував оптимізовану поведінкову реакцію всього організму. Далі еволюція керування пішла шляхом вдосконалення головного мозку. Закономірність розвитку цього напрямку дуже узагальнено можна відстежити на основі уявлень про цефалізацію як функцію часу.

Еволюція біоти на Землі має також **екосистемний напрям**, який увінчався формуванням сучасної біосфери. "Генеральна мета Природи" в екосистемному напрямі полягає у збереженні досягнутої структури біосфери шляхом закріплення в ланках екосистем найвдаліших варіантів видів і збереження піраміди екосистем загалом. Екосистеми володіють коливальною реакцією у відповідь на зміни зовнішнього середовища, тому мають максимальну стійкість як системи живого. Їх могла руйнувати лише катастрофічна зовнішня дія. Природна екосистема забезпечує найоптимальніші умови для стійкого існування будь-якого приналежного до неї виду. Для нового досконалішого виду завжди створювалися нові, складніші екосистеми, в яких цей вид займав чільне положення в харчовій (енергетичній) піраміді.

Важлива особливість природних екосистем – це здатність до повної **утилізації** всіх продуктів життєдіяльності її компонентів, а це вимагає не лише вертикальних зв'язків, але і безлічі горизонтальних – із сусідніми екосистемами. Напівштучні й антропогенні екосистеми у цьому аспекті є нестабільними і непередбачуваними, що в сукупності послаблює гомеостаз біосфери.

2.4. Система наук як засіб і рівень пізнання світу

В інформаційному суспільстві настає етап наукового, системно-міждисциплінарного підходу до проблем науки, освіти, техніки і технології, етап, що концентрує увагу не лише на речовинно-енергетичних, але й на системно-міждисциплінарних аспектах, побудові та дослідженні системно-інформаційної картини світу, про настання епохи системних парадигм.

Науки утворюють систему знань (**інтелектуальну систему**), що перебуває у безперервному розвитку (Mobus & Kalton, 2014). Еволюція часом змінювалася революційними стрибками, внаслідок яких були переоцінені нагромаджені знання. Наука неоднорідна, вона представлена множиною окремих наукових знань, або наукових дисциплін. Спочатку всі види знань належали до єдиної універсальної сфери – філософії, і лише пізніше вони одна за одною почали "відгалужуватися", утворюючи дочірні

види наук. Ще в античності дещо самотійно існували математика, астрономія і медицина. Потім був тривалий період застою, поки нарешті в епоху Відродження і в Новий час не виокремилися від філософії фізика і хімія. Нарешті, в XIX ст. стався вибух різноманіття наукових дисциплін. Тоді остаточно сформувалися як самотійні види наук – хімія і біологія, з'явилися психологія, соціологія й інші.



Огюст Конт
(1798-1857)

Різнорманіття наукових знань за своєю генезою утворює певну систему. Багато мислителів намагалися зрозуміти цю систему і визначити її основні принципи. Основи класифікації наук заклав А. Сен-Симон. У XIX ст. О. Конт класифікував всі науки за спільністю предмету їхнього дослідження і створив "енциклопедичний ряд" основних наук. Послідовність наук за О. Контом побудована наступним чином: математика, астрономія, фізика, хімія, біологія (включаючи фізіологію та психологію), і, нарешті, соціологія. Вчений вважав, що кожна наступна наука побудована на знаннях попередньої, використовуючи з'явлені вже принципи та методи, але водночас досліджує складніші явища, структури та функції.

Сучасні філософи запропонували свої системи, за якими всі науки можна розділити на структурні й дослідні. **Структурні науки** (логіка, математика) практично не використовують рівень емпіричної реалізації структур і досліджують об'єкти і їх логічні теорії в чистому вигляді. Отже, у цих науках науковий логос обмежений тільки своїми двома верхніми рівнями. У **дослідних науках** науковий логос представлений у всій своїй повноті, з-поміж іншого включаючи і рівень емпіричної (дослідної) реалізації структур. Ці науки зацікавлені не просто в дослідженні чистих (абстрактних) структур, але ще і в застосуванні їх до матеріального світу. З-поміж дослідних наук можна виокремити науки **природничі** (фізика, хімія, біологія, екологія), **гуманітарні** (історія, етика, естетика, суспільствознавство) та **синтетичні** (кібернетика, синергетика, теорія систем).

В Україні системну організацію всієї наукової сфери здійснює Національна академія наук (НАН України) (рис. 2.3 А). Мета її діяльності:

- ✓ отримання нових та узагальнення наявних знань про природу, людину та суспільство;
- ✓ розроблення наукових основ науково-технічного, соціально-економічного та культурного розвитку країни;
- ✓ підготовка висококваліфікованих наукових кадрів;
- ✓ всебічне сприяння практичному застосуванню результатів наукових досліджень;
- ✓ формування наукового світогляду у суспільстві.



*Рис. 2.3. Великий конференц-зал Національної академії наук України
(А) Будинок Президії аціональної академії аграрних наук (Київ)*

Найважливіші напрями досліджень НАН України пов'язані з проблемами математики, фізики твердого тіла, комплексу проблем матеріалознавства, розроблення основ зварювальних процесів, хімії, фізіології та біохімії живих організмів, зоології, ботаніки, біофізики, економіки, історії, української літератури і мови.

Національна академія аграрних наук України (НААН) розпочала функціонувати від 1931 року (рис. 2.3 Б). Історичним цивілізаційним досягненням Академії аграрних наук є створення і поширення по усьому світу легендарного сорту озимої пшениці Миронівська 808 авторства колективу Миронівського інституту пшениці ім. В. М. Ремесла НААН, який виведений під керівництвом академіка В. М. Ремесла. Згодом цей незвичайний сорт став основою багатьох нових, ще якісніших сортів української селекції (рис. 2.4).

До складу Першим президентом НААН у незалежній Україні був обраний академік Олексій Созінов. На 2025 рік структурно Академія розділена на 6 галузевих відділень: землеробства, меліорації та механізації, рослинництва, зоотехнії, ветеринарної медицини, аграрної економіки і продовольства, наукового забезпечення інноваційного розвитку.

Академії входять 271 установа, підприємств і організацій. В тому числі, в прямому підпорядкуванні Академії є 88 наукових установ: 11 національних наукових центрів, 41 інститут, 3 державні обласні і 4 галузеві дослідні станції.

Системна парадигма, системний підхід, системи як засіб наукового пізнання світу опановують інтелектуальну сферу людської діяльності, були в минулому і залишаться в майбутньому надійним інструментом всебічного розвитку і рушієм прогресу цивілізації. Поза сумнівом, системи, як об'єкт



**Олексій Созінов
(1930-2018)**

наукового пізнання, будуть цікавити дедалі ширше кола вчених і практиків, а кількість нових галузей системних знань і надалі зростатиме. Розвиненість і розгалуженість сфер науки, наукової та інноваційної діяльності визначає ступінь цивілізованості кожної держави та її спрямованість на суспільний прогрес і процвітання всіх громадян.

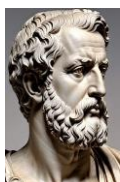


*Рис. 2.4. Демонстраційна ділянка сорту озимої пшениці
Берегиня миронівська на полі Миронівського інституту пшениці
ім. В. М. Ремесла НААН*



3.1. Проблеми і критерії побудови класифікації систем

Класифікація систем є складною проблемою, якщо не визначити наперед її практичне призначення – для якої конкретної мети вона потрібна. Якщо цього не зробити, то виникає думка, що у світі стільки систем, скільки існує об'єктів. Інша причина – в невизначеності розуміння суті системи, а також у відсутності найзагальніших параметрів, що описують систему.



Класифікація – це універсальний науково-методологічний засіб для створення системи підпорядкованих понять (об'єктів, явищ тощо) за ознаками їхніх стійких властивостей з метою пізнання взаємозв'язків між ними і середовищем або умовами їхнього існування.

Із розвитком різних наук і практики нагальною стала потреба розроблення сутнісної класифікації систем. Найважливіша вимога до наукової класифікації систем – обґрунтованість її підстав, які повинні мати концептуальну аргументацію. Самá найзагальніша класифікація, як окрема інтелектуальна система, повинна задовольняти вимоги достатності підстав і охоплення сукупності наявних і можливих систем. Ефективна класифікація повинна допомагати передбачити існування невідомих досі систем. Найважливіше призначення класифікації – опис властивостей її класифікаційних рангів, який дає змогу використовувати її для ідентифікації та субординації конкретних систем, із котрими мають справу дослідники чи управлінці в тих або інших сферах діяльності.

Наведемо кілька прикладів класифікацій систем. В. Афанасьєв (1980) поділив системи на чотири класи:

- 1) системи, що існують в об'єктивній дійсності, неживій і живій природі, суспільстві;
- 2) системи концептуальні, ідеальні, котрі інколи називають абстрактними;
- 3) системи штучні, що створені людиною;

4) системи змішані, до яких належать системи й елементи всіх попередніх систем.

Л. Петрушенко (1975) групував системи: за походженням – природні та штучні; за змістом – матеріальні й ідеальні, стосовно причинно-наслідкового зв'язку – детерміновані й імовірнісні; щодо навколишнього середовища – відкриті та закриті.

М. Лесенко (2002), намагаючись узагальнити наявні класифікації, групує системи: за походженням – природні, штучні та змішані системи; згідно з описом дії змінних на системи – з якісними змінними, із кількісними змінними й системи зі змішаними змінними; за типами операторів систем – "чорні скриньки", непараметричні, параметричні системи і "білі скриньки"; за способом керування – керовані, некеровані та системи з комбінованим керуванням.

Як бачимо, різні системи класифікацій мають неоднакову цільову основу і ніхто особливо не заглиблюється у їх таксономічну структуру. Вона в усіх галузевих науках різна, але традиційно охоплює діапазон від найбільшого рангу до найменшого елементарного (у біології – це від царства рослин, тварин до виду, різновиду (форми, раси тощо). У системології такої типізації і класифікації досі немає (Gnoli, 2017).

Першим *дев'ятирівневу класифікацію систем* – як звичайних (фізико-хімічних і техногенних), так і живих, запропонував саме Л. фон Берталанфі (табл. 3.1). Типовий приклад систем першого рівня – кристали. Відомо, що кристал – це тверде тіло, атоми або молекули якого утворюють періодичну структуру (кристалічні ґратки). При рівноважних умовах утворення структура кристалів має форму правильних симетричних багатогранників. Основна ознака кристалічного стану речовини – кристалічні ґратки. Іншим прикладом, що належать до *систем першого рівня*, може служити анатомічний опис молекулярної будови тканин тіла людини. У системному аналізі зафіксовану, фізично реалізовану і спостережувану в просторі сукупність ланок системи прийнято називати морфологією. Неважко відзначити, що загальна характерна ознака систем першого рівня – статичність, тобто, незмінність у часі.

До *систем другого рівня*, які описують законами класичної механіки та спеціальної теорії відносності, зараховують макроскопічні системи різного роду: механічні пристрої та машини, що формують світ сучасної техніки, а також планети, космічні тіла. Загальною і визначальною ознакою систем другого рівня є те, що їх переміщення в часі і просторі абсолютно детерміноване (передбачуване). Варто зазначити, що сучасна нелінійна динаміка вносить поправки у традиційне уявлення про детермінованість динаміки макрооб'єктів цього рівня. Приклад системи другого рівня – механічний протез кінцівки.

Табл. 3.1. Дев'ятирівнева класифікація систем Л. фон Берталанфі (1962)

Рівень	Система	Опис	Теорія і модель
1	Статичні структури	Атоми, молекули, кристали, біологічні структури, спостережувані за допомогою електронного мікроскопа, томографа, що відносяться до мікрорівня	Структурні та хімічні форми, кристалографічні моделі, анатомічний опис
2	Макроскопічні системи різного роду	Годинники, механічні прилади та пристрої, двигуни, сонячна система. Природні явища, що володіють періодичністю	Загальна фізика, у т.ч. низка класичних законів механіки (закони Ньютона), спеціальна теорія відносності Ейнштейна
3	Контрольні механізми (регулятори)	Термостат, кондиціонер, автопілот, гомеостатична підсистема	Теорія управління, теорія зворотного зв'язку, теорія інформації
4	Відкриті системи	Полум'я, клітина, організм тварини і людини	Перенесення фізичних теорій на системи, самопідтримувані в потоці речовини та енергії (метаболізм). Зберігання інформації в генетичному коді (ДНК)
5	Нижчі організми	Рослини, найпростіші (інфузорії)	Теорія і моделі практично відсутні
6	Тварини (вікові зміни, передача інформації)	Розвиток рецепторів нервової системи, здатність до навчання, початки свідомості	Теорія кінцевих автоматів, теорія керування (зворотного зв'язку), теорія автономної поведінки
7	Людина	Пам'ять, мовне спілкування	Семіотика
8	Соціокультурні системи	Культури, спільноти, соціум	Закони росту і розвитку людських спільнот (соціологія, економіка, історія)
9	Символьні системи	Мова, логіка, математика й інші науки, мистецтво, мораль	Символьні системи (математика, граматики), алгоритми, теорія композиції

Перехід на **системи третього рівня** означає появу такого елемента, як ланцюг зворотного зв'язку. Саме з третього рівня системи поділяють на

динамічні (виконавчі, силові, енергетичні) та інформаційні (контрольні, керівні) підсистеми. Види технічних пристроїв, що належать до третього рівня, дуже численні і різноманітні – це всі типи пристроїв автоматичного регулювання. Приклад системи зі зворотними зв'язками – мініробот для розмінування, який забезпечений апаратурою для візуального спостереження. У системі є візуальний, тактильний і силовий зворотній зв'язок з постом оператора, де здійснюється обробка інформації та формування керівних сигналів.

До *систем четвертого рівня* належать біооб'єкти, що є відкритими системами, відмінною ознакою яких є енерго- і масообмін з навколишнім середовищем. У відкритих системах можливе виникнення структур і саморозвиток, спрямований в бік ускладнення внутрішньої організації (самоорганізації).

На *п'ятому рівні систем* є нижчі організми, які представляють одну клітину або колонію клітин. Нижчі організми об'єднують в класи: саркодові, джгутикові, споровики, інфузорії. У добу Берталанфі теорія і моделі для цих систем були практично відсутні. Проте сьогодні запропоновані різні варіанти популяційних моделей, які описують особливості росту нижчих організмів.

На *шостому рівні систем* є тварини – біосистеми, для яких властиві адаптація, навчання і багатоцільові поведінкові реакції. Для систем шостого рівня притаманне самонавчання як пристосувальна реакція, спрямована на адаптацію до постійно мінливих умов навколишнього середовища. Самонавчанням називають здатність системи за зовнішнього впливу покращувати функціонування, відповідності до певного критерію. Вельми перспективний напрямок розвитку інтелектуальних технічних систем, що самонавчаються – створення нейронних мереж, які використовують, наприклад, в керуванні комплексами екомоніторингу.

Системи сьомого рівня відрізняються появою знакових (семіотичних) систем, заданих на множині об'єктів знаків. Кожному знаку відповідає певне значення, яке може бути як конкретним фізичним об'єктом, так і абстрактним поняттям. Ці системи застосовують для розроблення моделей поведінки складних біооб'єктів.

На *восьмому рівні систем* знаходяться соціокультурні системи, людські спільноти. Динаміку людських спільнот неможливо звести до динаміки біотичних популяцій, що становлять їх матеріальну основу. В опис систем восьмого рівня необхідно включати комунікативні функції, здійснювані через різноманітні інформаційні зв'язки. Кількісні моделі розвитку різного роду спільнот і соціокультурних систем почали розвиватися останнім часом ("історична механіка"). В основі таких моделей лежить математичний і понятійний апарат нелінійної динаміки.



До найвищого за класифікацією Л. фон Берталанфі *дев'ятого рівня* систем зараховують символні системи (наприклад, мови). У своїй фізіологічній основі мова виступає як функція другої сигнальної системи.

Мова – це знакова структура будь-якої фізичної природи, що виконує комунікативну та пізнавальну функції. Будучи формою існування і вираження мислення, мова визначає формування свідомості (у т.ч. самосвідомості). Знаки мови, як і знаки інших символних систем, будучи за своєю природою умовними відносно до того, що вони позначають, пов'язані з пізнанням реальної дійсності. Мова, як і інші символні системи, є засобом фіксування і збереження накопичених в соціумі знань і передачі їх від покоління до покоління.

Методологічна цінність впорядкування типів систем полягає у визначенні закономірностей послідовного переходу від технічних систем до живих систем. Проте, дев'ятирівнева класифікація систем за Л. фон Берталанфі має той недолік, що вона не надто деталізована.

В основу **змістовної класифікації** має лягти концепція, яка пояснює явища, котрі класифікують (Gnoli, 2017). Концептуальний підхід до класифікації робить її сутнісною. Для побудови **сутнісної класифікації** систем потрібно підходити за системною методологією. Згідно з баченням Ю. Р. Surmin (2003), варто брати до уваги насамперед те, що всім системам властиві чотири основні параметри: **субстанція, будова, функціонування і розвиток** (табл. 3.2). Під субстанцією автор має на увазі сутнісну властивість предмета як цілісності, основу і центр всіх його змін, активну їх причину і джерело функціонування. Будова системи передбачає наявність у ній елементів, зв'язків та організації. Функціонування трактоване як процес реалізації системою своїх функцій, а розвиток – як процес якісних змін системи. У такому вигляді система – це повний логічний обсяг поняття або структурно-функціональна субстанціональна цілісність, що розвивається.

Кожна з чотирьох складових сутнісного опису системи може бути представлена сукупностями засадничих параметрів, відповідно до їхньої природи. Так, субстанція може бути представлена природою систем, їхньою складністю, масштабами, детермінацією, походженням і способом буття. Для будови властиві елементи, зв'язки, організація, структура та складність. Функціонування виражають рівновагою, метою, результатом та ефективністю. Розвиткові властиві адаптивність, швидкість, відтворення, вектор і траєкторія. Класифікація систем (табл. 3.2) на субстанціональному рівні, рівнях будови, функціонування й розвитку може бути поглиблена за багатьма напрямками і критеріями.

Зокрема щодо екосистем, її можна розширити за найрізноманітнішими цільовими критеріями, залежно від мети класифікації: для вивчення, для дослідження, для відновлення, для оптимізації, для реставрації, для створення штучних тощо.

Класифікацію систем виконують, як правило, за ієрархічним принципом (Gnoli, 2020; Magee & de Weck, 2004). Він означає, що існує кілька рівнів класифікації і найвищий із них охоплює другий рівень, а той своєю чергою – третій, наступний і т.д. Наприклад, на першому рівні усі системи можна об'єднати у два класи: 1) матеріальні; 2) ідеальні (абстрактні). На другому доцільно окреслити вже три рівні систем: 1) штучні; 2) природні; 3) змішані, а далі групувати у нижчі за рангом таксони за вибраними сутнісними ознаками, властивостями тощо.

Табл. 3.2. Сутнісна класифікація систем

№	Критерій класифікації	Система	
		Вид	Властивість
1	2	3	4
I. <i>Субстанційний рівень</i>			
1	Спосіб існування	Матеріальна	Сукупність матеріальних тіл і явищ (речовина, енергія, простір, час)
		Абстрактна (ідеальна)	Єдність деяких символів або знаків (гіпотеза, теорія, система числення)
2	Субстанційна природа	Фізична	Сукупність фізичних елементів, інтегрованих на фізичних законах (сонячна система, земна атмосфера, озеро)
		Хімічна	Множина хімічних елементів, взаємопов'язаних хімічними зв'язками (молекула, хімічна сполука, полімерний матеріал)
		Біотична	Організми, популяції, угруповання, екосистеми, біосфера
		Соціальна	Суспільство або його складова, що розвивається як ціле (держава, економіка)
		Інтелектуальна	Наука, культура, духовність, релігія, мораль, етика, законність
		Технічна	Сукупність деталей, технічний пристрій (телевізор), множина взаємопов'язаних машин і об'єктів, здатних кібернетично опрацьовувати інформацією (автопілот+ЕОМ+мозок)
3	Спосіб детермінації	Детермінована (передбачувана)	Поведінка чітко зумовлена (рух планет, падіння предметів, течія води)
		Стохастична (імовірнісна)	Поведінка є імовірнісною, непередбачуваною (броунівський рух, спортивна гра)
4	Походження (керованість)	Природна (некерована)	Виникає і розвивається без втручання людини (еволюція біоти)
		Штучна (керована)	Виникає, розвивається та існує винятково завдяки діяльності людини (агрофітоценози)
		Змішана (напівкерована)	Виникає і розвивається природно та за втручання людини (пасовищна екосистема, ліс).
5	Масштаби	Мегасистема	Всесвіт, галактики, сонячна система
		Метасистема	Суспільство, планета, біологічний вид
		Макромасштабна	Материк, басейнова екосистема ріки, популяція
		Мікромасштабна	Прилади, машини й механізми, оранжерея, акваріум
II. <i>Рівень будови</i>			
1	Кількість елементів	Одновимірна	Планета Земля
		Бінарна	Містить два елементи (Земля–Місяць)
		Тривимірна	Охоплює три елементи (батько–мати–дитина)
		Багатоелементна	Складається із множини елементів (екосистеми)
2	Міра відкритості	Відкрита	Відкрита для дії зовнішнього середовища
		Закрита	Закрита для дії зовнішнього середовища



Продовження табл. 3.2

1	2	3	4
3	Спосіб взаємодії компонентів	Координаційна	Елементи рівноправні й рівновагомі
		Ієрархічна	Елементи підпорядковані (система керування)
		Координаційно-ієрархічна	Об'єднує рівноправні та нерівноправні елементи (суспільство)
4	Ступінь організованості	Слабо організована	Промислове підприємство одразу після техногенної катастрофи
		Сумативна	Нерозвинена взаємодія між елементами (толока з прибирання парку у День довілля)
		Організована	Організаційні структури (уряд, навчальний заклад)
		Саморганізована	Живі системи
5	Складність	Проста	Невелика кількість елементів, прості зв'язки
		Складна	Велика кількість простих підсистем і мережа зв'язків
		Надскладна	Велика кількість складних систем і зв'язків
6	Тип структури	Лінійна	Лінійна структура (ланцюг, мережа приток ріки)
		Стільникова	Розгалужені зв'язки (зв'язок через Інтернет)
		Ієрархічна	Супідрядність елементів (харчові ланцюги екосистеми, вертикаль державної влади)
		Змішана	Наявність всіх типів структури (с.-г. підприємство)
7	Наявність інформації про системи	"Чорна скринька"	З невідомою будовою
		"Сіра скринька"	З обмеженою інформацією про будову (організми)
		"Біла скринька"	З відомою будовою (годинник, ЕОМ, автомобіль)

III. Рівень функціонування

1	Спосіб відтворення	Відтворена довіллям	Наслідки будь-яких дій
		Відтворює собі подібних	Живі системи
2	Кількість функцій	Монофункціональна	Реалізація однієї функції (киснепостачальна функція гемоглобіну)
		Поліфункціональна	Реалізація водночасі кількох функцій (орган державної влади)
3	Спосіб розміщення	Площинна	Реалізується на площині (художнє полотно, килим)
		Тривимірно-просторова	Реалізується у тривимірному просторі
		Багатовимірна	Віртуальна технологія
4	Рівновага	Рівноважна	Система кругообігу води на Землі
		Нерівноважна	Зростання населення на планеті
5	Мета	Одноцільова	Одна мета
		Багатоцільова	Декілька цілей
6	Ефективність	Ефективна	Самодостатня (абсолютно стійка)
		Середньо-ефективна	Виражена ефективність (вразлива)
		Неефективна	Низька ефективність (нестійка без підтримки)
7	Поведінка	Реактивна	Функціонування визначається лише середовищем
		Активна	Вагоміша роль у функціонуванні внутрішніх властивостей
8	Енергетика	Ентропійна	Розсіює енергію (палаючий ліс)
		Негентропійна	Акумулює енергію (рослина, що росте)
		Змішана	Незмінний енергетичний статус (збалансований енергетичний потік у зрілому організмі)
9	Результат	Вагомо результативна	Синергізм – результат перевищує просту суму ефектів окремих факторів
		Результативна	Звичайний результат
		Нерезультативна	Немає результату

1	2	3	4
IV. Рівень розвитку			
1	Адаптивна здатність	Адаптивна	Здатна пристосовуватися без втрати своєї ідентичності (види-евріпотенти)
		Неадаптивна	Не володіє здатністю пристосовуватися (види-стенопотенти)
2	Вектор розвитку	Висхідна	Зростання показників розвитку з певною швидкістю
		Низхідна	Падіння показників розвитку з певною швидкістю
		Циклічна	Незмінність (повторюваність) показників
3	Етап розвитку	Зародкова	Виникнення
		Ювенільна	Становлення
		Молода	Досягнення зрілості
		Сформована	Відповідає всім параметрам зрілості
		Старіє	Падіння показників
		Перехідна	Перехід з одного стану в інший
		Деградаційна	Руїнування
4	Траєкторія розвитку	Лінійна	Лінійний розвиток
		Нелінійна	Нелінійний розвиток
5	Здатність до руху	Статична	Статичні, незмінні утвори
		Динамічна	Властива змінність

3.2. Матеріальні й абстрактні системи

У попередньому розділі загально описані фундаментальні *середовищеві* й *системотвірні субстанції*, які властиві фізичним, хімічним, біотичним, технічним, кібернетичним, соціальним та інтелектуальним видам систем. Далі зупинимося на принципово важливих розбіжностях у способах існування матеріальних та уявних систем.



Матеріальні системи від уявних, насамперед, відрізняє ознака вимірної фізичної присутності у просторі й часі – тобто вони можуть мати просторовий об'єм, фізичну масу або енергію, тривалість існування в часі й у різних формах.

Частину цих властивостей мають також уявні системи.

Досі тривають дискусії: чи думка є суто матеріальним явищем – продуктом надскладних фізико-хімічних процесів, чи чимось більшим. Існування думки чи свідомості, або їх транслокація, вірогідно, не можливі без відповідної матеріальної субстанції її відтворення. Водночас поширені дуалістичні переконання, що свідомість, дух, ідея існували, існують і будуть існувати завжди, незалежно від стану матеріального світу і форм руху (у метафізичному розумінні – *П.Г.* і *О.С.*) матерії.



Уявні (ідеальні) або **абстрактні системи** – це первинний продукт інтелектуальної "роботи" матеріальної системи, якою є людський мозок (рис. 3.1).

Створені людиною "інтелектуальні машини" можуть продукувати абстрактні системи, але вони завжди будуть вторинними. Наприклад, текст комп'ютерного перекладу із однієї мови на іншу є результатом функціонування відповідної програми, але програму цю створила не машина, а програміст, який досконало володіє різними мовами, у т.ч. програмування.

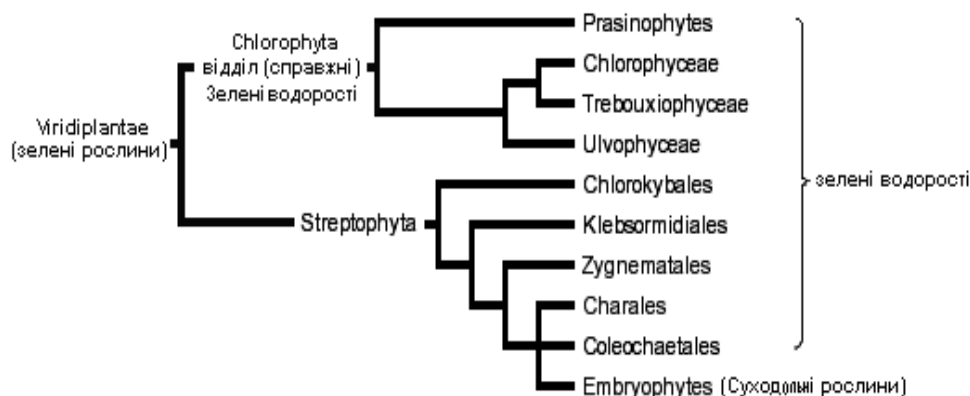


Рис. 3.1. **Класифікація зелених рослин** (абстрактна система у формі схеми)

Прикладом абстрактної системи може бути будь-яке слово, визначення, правило чи наукове трактування якого-небудь поняття, зокрема екології як науки. Визначення екології є елементарною ідеальною системою, що підпорядкована надсистемі науки екології, а сама ця наука є підсистемою загальної біології або науки про довкілля як частини сфери інтелектуальної й, у наш час, матеріальної діяльності людства. Наукова сфера, як і культурна, і духовна, своєю чергою є підсистемою у глобальній суспільній системі людства, де поступово інтегрується з матеріальними системами реального світу.

Прикладом найпростішої статичної та функціонально абсолютно стійкої абстрактної математичної системи є позначене символом π співвідношення двох геометричних параметрів кола – його довжини і діаметра, яке завжди дорівнює 3,14159...

Абстрактні системи є повсюдно матеріалізованими у вигляді слів, текстів, формул, схем, діаграм, рисунків, книг, картин, фільмів тощо для їх розповсюдження і зберігання. Якість, досконалість та ефективність абстрактних систем залежить винятково від глибини людських знань, рівня інтелекту, культури й духовності кожного члена суспільства. Особливою рисою науково-технічного прогресу є досконалі **інформаційні системи**, які є

сукупністю апаратних і програмних засобів, створених для вирішення практичних проблем збору, опрацювання й використання інформації.

3.3. Неживі й живі системи

Вирішальною функціональною властивістю матеріальних систем, яка вказує на рівень їхнього розвитку й перспективу, є спосіб відтворення (виникнення) або самовідтворення. За ним вони поділені на два види – живі й неживі системи. Переважна частина осяжного Всесвіту залишається надсистемою *неживих систем* і лише на Землі розвивалися відомі нам живі системи.

Відмінності живих і неживих систем, на перший погляд, очевидні. Проте коли наближаємося до пограничних станів, то виявляємо, що не все так однозначно. Наприклад, досі залишається проблемою визначення суті функції життя на межі перехідних станів систем "макромолекула-органод-вірус". Рівно така ж проблема спричиняє дискусію вчених про межі живого на переході систем "популяція-угруповання-екосистема".

Ознаки *живих (біотичних) систем*, це:

- складність системи, яка в сутності своїй є надсистемою живих і неживих систем;
- поєднання у собі вищих і нижчих форм руху матерії;
- багаторівневність і багат шаровість (ієрархічність) структури і функціональної будови;
- здатність системи саморозвиватися задля виживання та поліпшення життєдайних властивостей;
- властивість регенерувати втрачені органи або дегенерувати їх в ході еволюції;
- наявність механізмів відтворення самих себе сприяють самовдосконаленню форм і функцій у наступних поколіннях;
- наявність добре вираженої еволюції, яка є саморозвитком, самоорганізацією, самоврядністю, зміною структур, розширенням основ життєдіяльності;
- наявність керівних і саморегуляційних підсистем, які контролюють вигідну поведінку і розвиток цих систем;
- наявність і постійний розвиток механізмів взаємодії з мінливим довкіллям;
- вибір системою найкращих ситуацій, траєкторій поведінки.

Велика і складна активність органічних систем зумовлена не лише необхідністю задоволення їхніх внутрішніх потреб, але й прагненням відтворення. Ця цілеспрямована властивість живого є, та вірогідно, й залишиться нерозкритою людьми таємницею буття.

3.4. Ознаки та властивості простих і складних систем, їх ієрархія

За складністю будови системи є простими і складними. Прості системи є елементами складних і в такий спосіб світ має ієрархічну будову.



Проста система має мінімальне (щоб бути системою), або невелике число елементів і прості зв'язки між ними.



Складна система може мати або велику кількість простих систем, або надскладну функціональну структуру взаємодії між кількома відносно простими елементами.

Простою системою є вода як хімічна речовина, складною системою є ґрунт: тверда фаза ґрунту, його повітря й вода, біота ґрунту.

Надскладна система має багато складних елементів (підсистем), яким властиві численні перехресні взаємодії.

Наприклад, будь-яка екосистема є дуже складною системою, навіть якщо вона має два системотвірні елементи.

Системи, що мають у своїй структурній і функціональній будові менші, але теж складні системи, є ієрархічно вищими, а їхні інтегровані підсистеми – ієрархічно підпорядкованими. **Ієрархія**, породжена різною складністю й організованістю систем, властива усьому живому світові. Найскладнішими системами на Землі до виникнення людського суспільства були екосистеми, а вершиною складності була біосфера.

На початках системного аналізу і соціальні системи розглядали як біологічні. Біологічний підхід до людського соціуму застосовував Ф. Ніцше, а до його вульгаризованого практичного втілення бралися гітлерівці та їх поплічники. Протилежним за вектором, але подібним за наслідками виявився підхід леніністів-сталіністів, які абсолютизували роль поступу системи суспільної свідомості, ідеології та відносин між людьми.

Із другої половини XX ст. системний підхід до суспільства став однією з провідних методологічних парадигм. Тому виявилось, що тепер найскладнішою системою є саме людське суспільство, але не у відриві від природи довкілля і людської біологічної природи. Суспільні системи сповна задовольняють певні вимоги еволюційного поступу. Важливо звернути увагу на те, що за динамічності цього процесу суспільні системи найчастіше теж переходять до вищого рівня впорядкованості, залежно від поступу громадянської свідомості.



3.5. Некеровані, напівкеровані та керовані (штучні) системи

За субстанційною природою виникнення й розвитку, а також з урахуванням сучасної активної системотвірної ролі людини, системи бувають трьох видів: некеровані (природні), керовані (штучні), напівкеровані (природно-штучні). До *некерованих природних систем*, починаючи з біосфери (до виникнення людського суспільства від його первісних форм), належали всі її нативні складові. Антропогенний фактор спричинив появу напівкерованих, а згодом керованих (штучних) систем. До напівкерованих систем належать всі змінені найменшою господарською діяльністю екосистеми суходолу й гідросфери Землі. Природні системи ніким і нічим, окрім внутрішніх механізмів, не керовані, функціонують незалежно від волі людини й інших зовнішніх втручань. Такі системи за поведінкою класифікують як *активні* (вагомішу роль у їхньому функціонуванні відіграють внутрішні закони й властивості підсистем, певна мета системи, а дії середовища другорядні). Особливу групу утворюють системи, що розвиваються. З-поміж них виділяють системи, що *самоорганізуються* та *саморозвиваються*.

Напівкеровані системи залежать від зовнішньої дії та від втручання людини лише частково й не зникають і не виникають із суто внутрішніх причин. Прикладом може бути гідроекосистема штучного ставка, створеного лише встановленням греблі на потічку чи невеликій річці, у якому простим шлюзом регулюють лише рівень і площу водного дзеркала. Іншим прикладом може бути лука, яку використовують для випасання худоби і лише інтенсивність випасання (з усіма супутніми впливами) є єдиним *керівним чинником*, що відрізняється від суто природних зовнішніх діянь на цю екосистему. Напівкеровані екосистеми здатні до швидшого відновлення своїх природних властивостей, порівняно з територіями або ландшафтами, які були зайняті штучно створеними.

Керовані системи підпорядковані винятково зовнішньому середовищу, з-поміж іншого і людській діяльності, народжуються, функціонують і зникають лише з причин зовнішніх. Численні керовані штучні системи оточують нас повсюдно (від простого олівця до міжнародної космічної станції). Їх людина використовує для пізнання світу й навчання, виробництва й військових потреб, побуту, лікування та відпочинку тощо, але вони є об'єктами вивчення різних фахівців. За поведінкою такі системи визначені як *реактивні*.

Класифікація систем є складним завданням, але завжди можна досягнути успіху, якщо чітко окреслити наукову чи практичну мету класифікації. Типологія еко-, як і соцісистем є актуальною і надскладною пробле-



мою, оскільки освоєння природних ресурсів і простору сучасною людиною випереджує аналітичні й прогностичні можливості теперішньої науки, а розбалансування довкілля набуває загрозливих ознак. Вибір пріоритетів і поглиблення екологічних знань потребує удосконалення сутнісної класифікації й типізації нативних, напівштучних і штучних екосистем. Актуальними критеріями таких класифікацій є ступені автентичності природних екосистем для визначення заходів щодо їх збереження й охорони.

Для трансформованих екосистем важливі міра і способи їх перетворення, щоби можна було давати прогнози щодо їхньої подальшої перспективи. Штучні екосистеми потребують різного обсягу зовнішніх "дотацій" ресурсів та енергії, а також мають неоднакові рівні освоєних потенціалів на їх створення. Це важливо для оцінювання економічної перспективи їх подальшого використання або обсягів необхідної енергії та ресурсів для їх ліквідації з подальшою екореставацією спотвореного господарською діяльністю довкілля.



4.1. Компонентний склад і природа зв'язків

З огляду на розуміння, що система – це цілісна множина взаємопов'язаних елементів, важливо знати які саме елементи і в якій кількості належать до аналізованої системи, як вони між собою та із зовнішнім оточенням співвідносяться, яким чином організована ця сукупність.

Поєднання цілісної сукупності елементів (компонентів), як умовно неподільних одиниць на прийнятому рівні (або способі) її розчленовування, утворюють **склад системи**. Компоненти системи формують внутрішній порядок розташування, відношень, зв'язків, функціонування, наслідком чого є певна стала (або зрівноважена) структура системи. За таких обставин установлюється певна організація, як властивість об'єктів проявляти взаємозалежну поведінку в рамках сформованого складу системи.



Склад системи – це своєрідні запаси (Форрестер, 1971) та її основа. Їх можна побачити, відчути, кількісно оцінити або безпосередньо виміряти в будь-який момент часу.

Запас (або рівень) – це те, що є в певній кількості та накопичено системою з плином часу, надбано в матеріальній формі або у вигляді інформації.

Це може бути рівень води в озері, чисельність населення, обсяг біомаси й енергії в системі, обсяг інформації тощо. Запас не обов'язково має фізичне втілення. Запасом може бути навик, досвід, знання. Запаси (рівні) відображають хронологію змін потоків в системі.

Внутрішній устрій системи – це поєднання складу, структури й організації компонентів. Склад є вагомим чинником щодо її складності. Природа системи залежить від її компонентного складу, зміна якого спричинює зміни її властивостей. Наприклад, додаючи до злакового травостою екосистеми кормових угідь додатковий компонент – бобові трави, можна отримати потрійний ефект: збагатити її додатковим азотом з атмосфери; підвищити показники родючості ґрунту й отримати корми, багатші протеїнами.



На визначеному рівні **розчленовування системи** елемент – це умовно неподільна "цеглинка", що належить їй. Наявність зв'язків між елементами в цілісній системі зумовлює виникнення нових якостей або властивостей, притаманних їй, і не властивих жодному з елементів, окремо взятому. Виникає так звана емерджентність (Drack & Pouvreau, 2015). Тому поняття "елемент" спирається на поняття "простота", під якою сприймають властивість множини як цілісного елемента в іншій множині вищого рангу.

Проте зведення всіх систем до елементарних утворень має лише тимчасовий методологічний сенс. Щоразу встановлене і, здавалося б, непогнуте, елементарне виявлялося таким, що збудоване зі ще більше елементарного. Швидкі темпи розвитку ядерної фізики у другій половині ХХ ст. це добре ілюструють. Елементарність постійно прямує за принципом невичерпності матерії – одним із фундаментальних у світобудові.

Для компонентів системи притаманні певні властивості.



Властивість – це входження елемента в окреслений клас речей (явищ, об'єктів тощо), коли при його ідентифікації не утворюється новий предмет, або ж ознака, притаманна певним речам (явищам, об'єктам), яка могла би відрізнити або ототожнювати їх.

Усі складники системи володіють двома виразними видами властивостей. Перший – це **елементарність** (ступінь простоти) за певного способу розчленовування. Другий вид властивостей – це природні ознаки елементів. Наприклад, рослини в екосистемі – це автотрофи, тварини – гетеротрофи тощо, люди у соціумі – робітники, селяни, науковці, інженери, держслужбовці й ін.

Елементи формують системи, тому їхня природа, або методологічний підхід щодо їх виокремлення і визначають способи класифікації й типізації складових систем за аналогічними принципами, як і самих систем. Елементи в системі існують не самі собою, а пов'язані один з одним, тобто мають різного виду взаємовідношення. Зв'язок проявляється у вигляді якості, яка властива матерії та полягає в тому, що всі тіла і явища об'єктивної дійсності перебувають у нескінченно багатоманітній залежності та стосунках. **Зв'язок** – це певне взаємне обмеження об'єктів (робить передбачуваною їхню поведінку), залежність між ними, обмін між компонентами речовиною, енергією, інформацією. Зв'язки, які відіграють винятково важливу роль у системі, бувають **прямі** і **зворотні**. На них будується сутність системи.

Найважливіші зв'язки виконують у ній кілька функцій і головна з них – системотвірна. Зв'язки створюють основу архітекτονіки системи, забезпечують взаємодію елементів, їх взаємний вплив, участь у загально-

системних процесах. Таким є, наприклад, універсальний гравітаційний зв'язок усіх тіл і речовин у природних системах Землі. Об'єм акуратно насипаного з однієї точки піску чи дрібного щебеню утворює майже конічну фігуру, проте такий же об'єм очищеного насіння льону, насипаного аналогічним способом, утворить зовсім іншу просторову систему – зрізану частину еліпсоїда. Уся різниця лише у зв'язку між компонентами, який реалізується у геометричній формі через дію двох чинників – фізичного тертя і гравітації.

Наступна функція – специфікаційна, за якою зв'язки задають конкретні властивості системи, визначають її специфіку. Прикладом є лентичні гідроекосистеми, де вода, яка заповнює рельєфну впадину, та ґрунтове дно визначають їхню відмінність від проточних водних екосистем.

Життєдайна (вітальна) функція зв'язків забезпечує життєдіяльність системи, підтримує обмін системи з довкіллям. Зміни в цих зв'язках зумовлюють ознаки різних етапів розвитку системи. Таким зв'язком є енергетичний, що забезпечує функцію життя на Землі завдяки підтриманню потоку енергії від Сонця від продуцента до будь-якого організму-консумента.

Зв'язки є складним явищем, вони такі багатоманітні й різнорівневі, що їх вивчення потребує методологічних засобів різних наук. У змістовному підході щодо суті зв'язків їх поділяють на енергетичні (потік і передача енергії між елементами системи), матеріально-речові (міграція об'єктів, тіл, потоки речовин), інформаційні (потоки інформації).

4.2. Структури та суть організації систем

Важливими є такі дві фундаментальні властивості системи, як її структура й організація. Усі тканини живих організмів утворені з клітин, проте навіть однакові клітини, розташовані певним чином (наприклад стовбчаста і губчаста паренхіма листків), створюють різну функціональну якість цих тканин, бо вони по-різному організовані. Тому властивості системи не зводяться до властивостей її складових.



Структура – це впорядкованість відношень, що пов'язують елементи системи і котрі забезпечують її рівновагу, спосіб організації системи, типи зв'язків.

Структура конкретної системи, або її будова (порядок взаємовідношень між компонентами) – це сукупність стійких зв'язків між елементами, які забезпечують її цілісність та ідентичність. Структура завжди складніша за просту сукупність, бо склад дає відповідь на запитання – "Що має система?", а структура розкриває таємницю – "Як влаштована система?"

Структурність, як явище, має універсальні прояви, що генеруються первинною симетрією елементів і виражаються ізомерією форм від мінералів до організмів (Урманцев, 1974).

Структура системи вказує на спосіб розгортання елементів системи у просторі й часі. Актуальна структура дає уявлення про напрям розвитку системи у певний момент часу, вектор її руху. Будь-яку структуру можна описати за такими основними властивостями:

- ✓ загальною кількістю зв'язків, що зумовлюють складність системи;
- ✓ загальною кількістю взаємодій, які визначають стійкість системи;
- ✓ кількістю зв'язків кожного елемента, що свідчать про інтенсивність взаємодії елементів;
- ✓ кількістю внутрішніх зв'язків, які визначають внутрішній устрій системи;
- ✓ кількістю зовнішніх зв'язків, що свідчать про взаємодію системи із середовищем, її відкритість.

Важливою структурною властивістю системи є її **стійкість**. Вона складна й суперечлива. З одного боку, стійкість визначає здатність структури чинити спротив зовнішнім діям, тобто це властивість життєздатності системи. З іншого – найстійкіші структури властиві для детерміністських систем, які відрізняються примітивністю. Сучасне уявлення про структури використовує таке поняття, як хаотичність або дисипативність структури, що дає змогу пояснювати перехідні стани.

Прикладом надзвичайно складної стійкості систем за відсутності стохастичних впливів катастрофічної сили є нативні екосистеми (рис. 4.1). Структура екосистеми є множиною відношень між її підсистемами і між екосистемою та навколишнім середовищем. Новизна екологічного підходу В. Вернадського полягає у відкритті енергетичної та біогеохімічної основи стійкості екологічних відношень. Виникає завдання вивчення змісту екопроцесів утворення і розкладу органічної речовини і супровідних механізмів мінерального живлення рослин, трофічних взаємодій між організмами в харчових ланцю-



Рис. 4.1. Тимчасова організаційна просторова структура стада (каре), яку утворюють дорослі бізони для реалізації життєдайної функції популяційної екосистеми, спрямованої на захист молодняка від нападу хижаків і хуртовини (загалом, стійкості системи)

гах, а також специфічних біотичних взаємодій (конкуренція, коменсалізм, мутуалізм та ін.), у рамках цілісного біогеохімічного й енергетичного підходу. Отже, специфіка пізнання екологічних відношень полягає в розкритті енергетичних і біогеохімічних механізмів, через які здійснюються стійкі зв'язки між підсистемами екосистеми.

Екологічні відношення охоплюють різноманітні механічні, фізичні, хімічні й біотичні взаємодії, що традиційно становлять предмети відповідних спеціальних наук. Проте в екології всіх їх потрібно розглядати в єдності та взаємозв'язку, які зумовлюють цілісне функціонування екосистем. Цей *інтеграцізм*, що становить сутність екологічного підходу, якраз і є гарантований загальною біогеохімічною енергетичною основою.



Організація – це результат усталених взаємовідношень елементів і є властивістю всіх систем різного ієрархічного рівня, котра відповідає певній упорядкованості її змісту адекватно до дії системотвірних чинників.

На конкретному методологічному рівні розчленовування системи організація – це властивість складових проявляти взаємозалежну та взаємозумовлену поведінку у рамках цілого. Отже, це внутрішня упорядкованість елементів цілого, а також сукупність процесів, що зумовлюють установавлення взаємозв'язків між окремими частинами системи.

Організація, з одного боку, свідчить про положення елементів системи один відносно іншого в просторі й часі (рис. 4.2) на актуальному рівні її пізнання і частково віддзеркалює статику (структуру) системи.

З іншого боку, організація містить динамічний контекст, упорядковану ритмічну чи циклічну мінливість.

Під організацією також розуміють саме процес *упорядкування системи*, яка до цього мала інший рівень організаційної структури. У цьому сенсі під організацією часто розуміють безперервний і стійкий процес становлення і набуття системою нових властивостей з-поміж іншого і завдяки її глибшому дослідженню й оптимізації через свідоме й розумне втручання людини.

Організація формується зі структури, розташування й динаміки у просторі й часі та від розподілу функцій між елементами, а також оточенням. Її можна описувати як: просторову; тимчасову; структурну; цільову; функціональну (певна впорядкованість у функціонуванні елементів, що забезпечує функціонування власне системи).

Просторова організація залежить від просторових розмірів компонентів (молекула, клітина, організм, екосистема), від їх просторового розташування та узгодженості. Тимчасову організацію потрібно розглядати як тимчасову впорядкованість існування і функціонування елементів. В уза-



гальненому вигляді тимчасовим структурам систем властиві: тривалість, послідовність, ритми, тимчасові приналежності, швидкості руху.

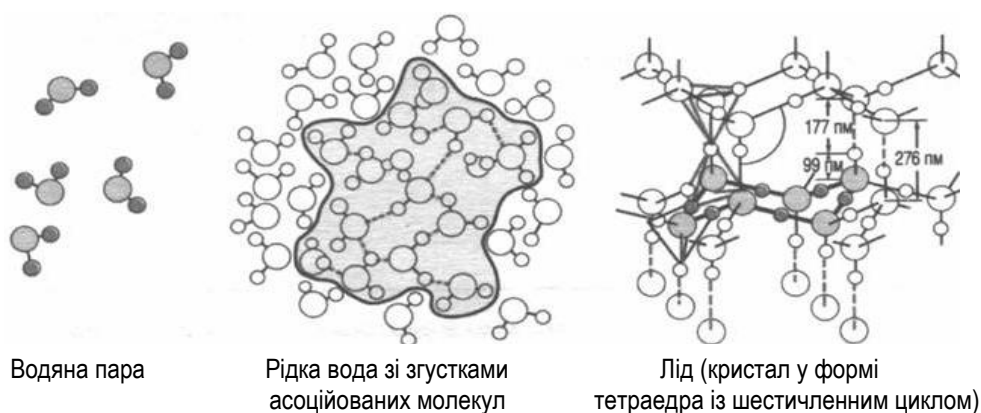


Рис. 4.2. Організаційні структури води у різних температурних умовах:
газ (пара) – понад 100°C; рідина – від 4 до 100;
кристал (лід) – менше як 4°C (Гайнріх і Гергт, 2001).

Тривалість означає плинність існування системи та її елементів. У будь-якій системі одночасно присутні елементи з різним періодом існування, що й визначає у ній такі явища, як пристосування й інтеграцію елементів. Немає нічого вічного у будь-яких системах. У них з'являються нові компоненти, їх покидають деякі складники. Тому система – динамічний утвір, якому властиві водночас тимчасова впорядкованість і різноманітність елементів.

На підставі ознак тимчасової організації системи, які можна розглядати як критерії, важливо окреслити такі типи систем (елементів). За тривалістю системи бувають довготривалі й короткочасні; за способом тимчасової упорядкованості – синхронні й асинхронні; за ознакою дотримання – паралельні та послідовні; за тимчасовою приналежністю – минулі, теперішні й майбутні; за наявністю ритму – ритмічні й неритмічні; за швидкістю – статичні та динамічні.

Складники системи можуть існувати в ній паралельно і послідовно. Послідовність елементів є алгоритмом їх руху. Важлива властивість системи – ритміка її станів. Під ритмом розуміють чергування певних елементів, що триває із певною послідовністю і частотою. Ритміку системам можуть задавати як внутрішні, так зовнішні хвилеві явища, що зумовлюють коливання складу й структури. Це можуть бути цикли сонячної активності, сезонні зміни клімату тощо. Вплив хвилевих процесів на систему може бути і максимальним, і незначним. Тому виділяють **ритмічні** та **неритмічні системи**. Особливість ритмічних систем полягає в тому, що вони в процесі руху з плином часу повторюють пройдені раніше траєкторії, і це робить їх частково передбачуваними.

Окрім синхронності, асинхронності й ритміки елементів у фізичному часі можна спостерігати процес незбігання часу "життя" для різних елементів. При цьому, в один і той же абсолютний час, в одній і тій же системі існують елементи минулого, теперішнього і майбутнього.

Ще одна ознака часу в системах – його наповненість змінами, що відбуваються. Вона може бути виражена швидкістю руху систем, під якою розуміють кількість руху системи за одиницю часу. Залежно від швидкості всі системи поділяють на **статичні** й **динамічні**. Динаміка, або динамізм – це стан руху, розвитку, зміни системи та її складових під впливом зовнішніх і внутрішніх чинників. Динамічна система є системою, що постійно змінюється.

Структурна організація системи відображає стійку схему взаємин і зв'язків між організованими елементами. Структура завжди певним чином організована. Лінійна структура передбачає передавання дії, інформації по ланцюжку від "сусіда до сусіда"; кільцева – по колу (два напрями обміну); стільникова – по розгалуженій мережі. Багатозв'язкова організація означає, що кожен елемент пов'язаний з кожним, всі зв'язки рівноцінні, швидкість і надійність у такій системі є максимальними. Ієрархічна організація передбачає виражені командні функції одних елементів відносно інших. Окремий випадок ієрархічної організації широко розповсюджений у державних установах, коли одна центральна позиція виконує командні функції щодо ієрархічно нижчих елементів системи (силові структури тощо).

Найскладнішою є змішана організація, що має всі, попередньо описані **форми зв'язків**. Вона традиційно притаманна живим природним системам різної складності.

Важливими властивостями організаційних структур є їхня оперативність, централізація, периферійність, живучість, обсяг їхніх компонентів. **Оптимізація організаційної структури** за розгляду цих показників є класичною проблемою системного аналізу.

4.3. Поняття мети, декомпозиції й агрегації

Важливою складовою частиною системного підходу є визначення мети утворення й існування системи, що висвітлює відповідний аспект її організації.



Мета системи – це ідеальне передбачення результату діяльності, її регулятор. У самому розумінні та визначенні мети присутній суб'єктивний фактор – людина. Мету формулює аналітик у процесі своєї дослідницької роботи. У теорії систем мету розглядають як у суб'єктивному, так і в об'єктивному сенсах.



У **суб'єктивному** сенсі мета виступає як мета людини, зайнятої дослідженням, конструюванням і керуванням системами. Вона представляється як те, на що спрямована діяльність людини стосовно систем.

В **об'єктивному** сенсі під метою розуміють той стан, до якого прагне система, заради чого вона існує. Таке розуміння мети найчастіше використовують у системному підході. Отже, мета зводиться до визначення аналітиком майбутнього стану системи, який може бути зумовлений найрізноманітнішими механізмами.

Наприклад, мета гемоглобіну – захоплення лише кисню в легенях і віддавання його у тканинах, а не метаболізації вуглекислоти, сечовини тощо, адже він існує спеціально для перенесення кисню і лише для цього.

Об'єктивно, жодна система не володіє свободою волі та не може задати сама собі мету. Мета диктується потребою чогось чимось (когось кимось – чотири комбінації), що перебуває поза системою. Отже, мету перед системою завжди ставить інша система чи оточення систем. Але також об'єктивно є системи і самодостатні, які ставлять перед собою цілі? Наприклад, ми, люди, можемо ставити перед собою мету. Отже, поява у реальному світі фактора свідомості (самоусвідомлення) означає виникнення незалежних самодостатніх систем. Чи це цілком так – з'ясуємо нижче.

У науковому світі панує дуалізм у трактуванні одного й того ж поняття "мета" – мета як фактор існування якоїсь системи, і мета як прагнення (бажання) цієї системи виконати цю задану мету. З одного боку, мета – це завдання як необхідність у певному заданому результаті для зовнішньої системи, яка дає завдання або установку для конкретної системи. З іншого, мета є прагненням (бажанням) здобуття певного результату дії конкретною системою, завжди рівного заданій установці.

Людина може ставити цілі перед собою, але завжди лише тоді, коли їй чогось бракує, коли вона прагне чогось. Бажання і страждання є двигунами еволюції. Коли ми виконуємо наше бажання – досягаємо мети. Якщо досягаємо мети, перестаємо діяти тому, що мета досягнута і бажання зникає. Якщо у нас є все, що лише можна придумати, то жодних цілей ми самі вже не будемо ставити перед собою тому, що нема чого бажати, все є!

Отже, навіть людина, при всій своїй складності та розвиненості, не може бути абсолютно незалежною від інших систем (від зовнішнього середовища). Наші цілі–завдання нам завжди ставить зовнішнє середовище і це пробуджує наше внутрішнє бажання (мета–прагнення), яке продиктоване нестачею чогось. Зовнішнє середовище змушує нас рухатися, а для руху потрібна енергія, яку витрачаємо зі своїх внутрішніх ресурсів. Унаслідок цього виникає дефіцит чогось і брак внутрішньої енергії, подолання яких стає нашою метою.

У зв'язку з цим виникає питання про цілеспрямованість Природи й Людини. На його трактуванні сформувалися дві протилежні позиції. Філософи з ідеалістичним світоглядом стверджують, що все від Бога, Світ упорядкований і призначений для розвитку людини. Матеріалісти-атеїсти переконані, що Бога немає, а є Природа, сліпа, випадкова, хаотична і нецілеспрямована.

Проте хаосу немає – в будь-якому куточку Всесвіту завжди панує ідеальний порядок, тому що скрізь працюють об'єктивні й жорсткі закони. Природа єдина і майже упорядкована. Майже, тому що, наприклад, на рівні квантових явищ, ймовірно, є деяка невизначеність і непередбачуваність, тобто, невідповідність явищ нашим знанням фізичних законів (зокрема, тунельні ефекти). Саме ця непередбачуваність є причиною випадковості й загадковості. Випадковість і цілеспрямованість взаємно виключають одне одного.

Досі не з'ясовано і триває дискусія чи непередбачуваність є результатом недосконалості технології проведення експериментів і браку знань, чи це – об'єктивна реальність. Але якщо визнати, що і природа цілеспрямована, тоді слова "Природа" і "Бог" стають синонімами, як це обґрунтовує пантеїзм.

Отже бачимо, що поняття мети неминує породжує питання: а хто, або що ставить цілі перед системою? Дотепер зрозумілим є лише одне – мету перед системою завжди ставить інша система, а самі системи, включаючи людину, свободою волі не володіють.

Природним нормальним станом системи є гомеостаз, тобто функціональна рівновага. Водночас система може бути спрямована й на інші стани. Такими станами можуть бути інтеграція, адаптація, агресія, руйнування, творення чого-небудь або спокій.



Із позиції значущості для системи мета буває **стратегічною**, що веде до якісних перетворень системи, найсильніших її дій на довкілля. Мета, пов'язана з локальними змінами системи і незначними діями на середовище, може бути **тактичною**.

Крім того, цілі бувають простими і складними. За дистанцією до результату їх доцільно ділити на кінцеві та проміжні; за терміном досягнення – на найближчі, віддалені й перспективні; за охопленням системи – на загальносистемні й часткові, тобто такі, що охоплюють не систему загалом, а окремі її підсистеми.



Мета системи є суцільною ієрархією простих позицій.

Послідовне розчленування мети на прості складові, або окремі часткові цілі називається **декомпозицією**.



Згідно з декомпозицією цілі мають кілька рівнів: цілі нижнього рівня ієрархії підпорядковані цілям верхнього; цілі верхнього рівня не можуть бути досягнуті, допоки не будуть досягнуті цілі найближчого нижнього; цілі неелементарні розпадаються, зрештою, на елементарні.



Протилежною до декомпозиції є операція під назвою **агрегація** – об'єднання кількох елементів у єдине ціле. Необхідність агрегації, наприклад цілей, потрібна, насамперед, для виявлення надмети системи.

Результат системного поєднання вибраних складових називають **агрегатом**.

Після виділення цілей і підпорядкованих цілей можна будувати "дерево цілей" (Rousseau, 2017). Термін "дерево" використовують для позначення окремого виду графа, який має ієрархічну структуру. "Дерево цілей" – це дерево, що ілюструє цільову структуру зі звислими гілками. Наступна фаза декомпозиції передбачає встановлення цілей. Згодом їм надають вагомість, яку розраховують за допомогою здійснення експертизи (експертних оцінок). Далі формують перелік ресурсів для реалізації цілей системи. Цільова характеристика системи може мати кілька варіантів: "дерева цілей", "куща цілей", "лісу цілей" і "суміш цілей".

4.4. Функціональна організація

Вирішальним функціональним "організатором" будь-якої екосистеми є постійний потік енергії через її структури.



Функціональна організація полягає в тому, що кожна система відрізняється своїм набором зовнішніх функцій, а їх реалізація змушує її елементи й підсистеми діяти певним чином у напрямі досягнення зовнішніх функцій системи як цілого.

Завдяки цьому між елементами виникають дієві зв'язки (рис. 4.3).

Отже, функціональний зв'язок виступає такою формою взаємодії між відповідними елементами цілого, за якої поведінка цих елементів взаємозумовлені, а ланцюг причин і наслідків замкнутий, зокрема, як в екосистемах. В автотрофних екосистемах рушійною силою функціональної організації і, одночасно її метою, є сонячна енергія, у гетеротрофних, зокрема рифтових, хімічна енергія різних речовин.

Головну функцію – засвоєння енергії, реалізують живі організми, вони ж її і розсіюють у довкіллі. Проте, каналізуючи енергію по ланках живлення, живі елементи системи можуть її нагромаджувати у формі хімічної енергії,

ОСНОВИ ТЕОРІЇ СИСТЕМ

котра стає ресурсом для інших живих організмів. Це вагома властивість первинних накопичувачів енергії – продуцентів, яка дає змогу консументам функціонально організовуватися й адаптуватися. Побічними, але зовсім не другорядними наслідками складної функціональної організації екосистем, є нагромадження мертвої органіки, зокрема гумусу ґрунтах.

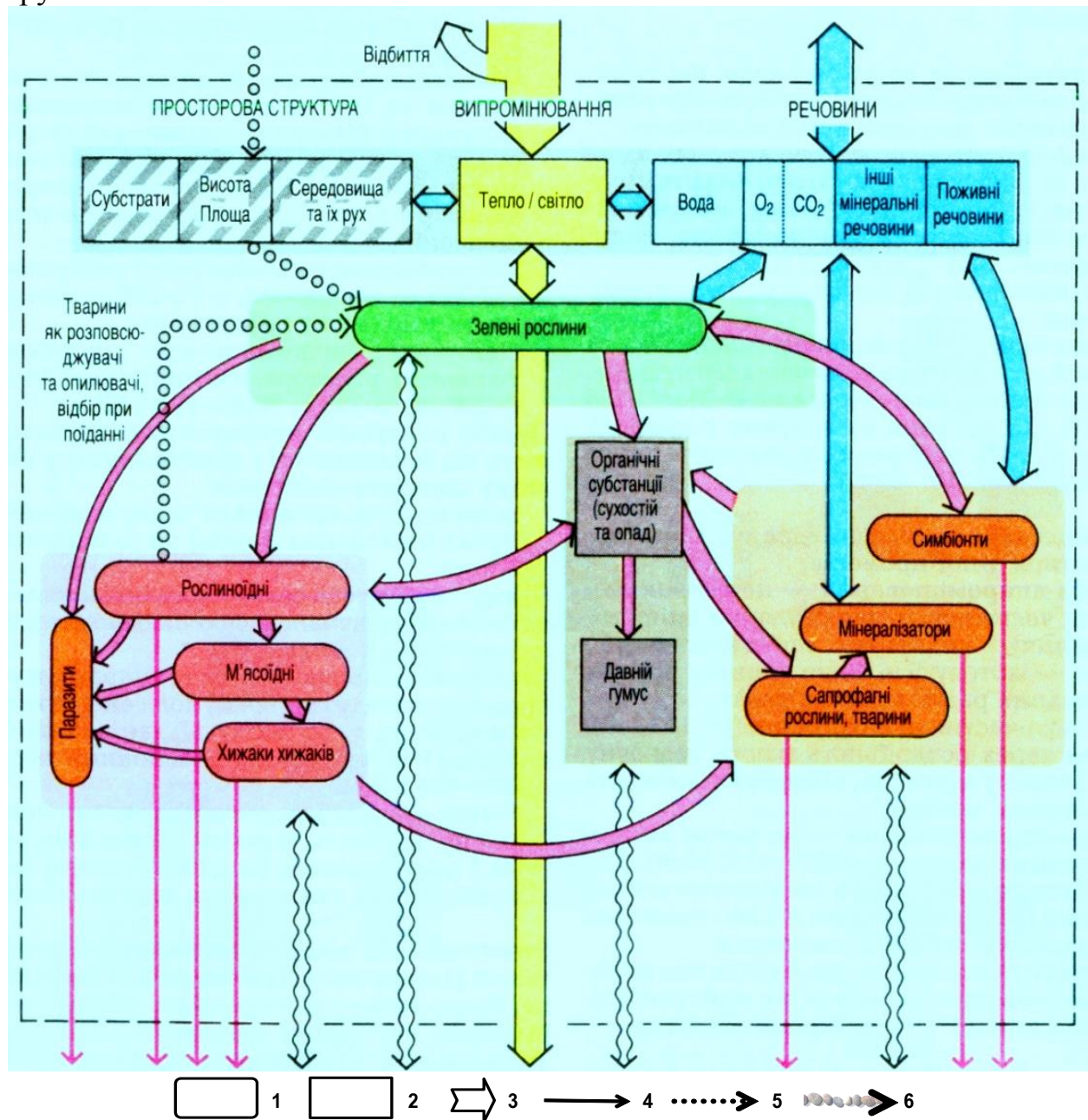


Рис. 4.3. Структурна і функціональна організація екосистеми
(Гайнріх і Гергт, 2001):

1 – живі компоненти (продуценти, редуценти, консументи); 2 – неживі компоненти й середовище (з-поміж іншого і мертва органіка); 3 – випромінювання, потоки і стоки; 4 – утрата енергії у процесі дихання; 5 – інші види впливу; 6 – переміщення на місцевості (від або до екосистеми)



Виразно збудована функціональна організація соціальних (зокрема воєнізованих) систем, в яких є чіткий розподіл таких функцій: керівна; командна; репресивна; інформаційна; зовнішня; технічна; господарська тощо.

Оперативні функції системи пов'язані з вибором способу діяльності, дії на довкілля. З-поміж них виділимо три **потенційні стратегії поведінки**. Перша, мінімаксна – це орієнтир на несприятливу ситуацію. Проте результат не може бути гіршим, ніж за задумом. Мінімаксна стратегія гарантує: краще – можливо, гірше – ні.

Друга стратегія: мінімум середнього ризику – перевага у високій ефективності в середньому. Основною її вадою є важкість визначення середнього ризику. Третя стратегія: припустимого ризику – допускається відносно високий ризик і йде пошук способу поведінки, за якого успіх буде максимальним. Основна вада третьої стратегії – складнощі у визначенні розміру припустимого ризику.



5.1. Типізація системних функцій

Діяльність системи визначається кількістю активних елементів. Якщо жоден із них не активний, тоді це стан спокою. Він буває за відсутності зовнішньої дії. Якщо всі елементи одночасно функціонують – це максимально активний функціональний стан системи, який виникає за максимально енергійної зовнішньої дії. Проте, навіть у стані спокою сила земного тяжіння спричинює функціонування частини наших м'язів. Отож, коли ми ніби перебуваємо у стані спокою, насправді знаходимося на одному з мінімальних рівнів функціонального стану організму, коли продовжується перетворення хімічної енергії як умова роботи м'язів для підтримання тіла.



Функція є властивістю системи чинити конкретні дії, для виконання яких її елементи здійснюють різні форми руху, а також взаємодією системи з її навколишнім середовищем у процесі досягнення мети або збереження рівноваги.

Функціонування – це дія системи із плином часу.

Функція – це виконання, здійснення або завершення, тобто дія системи, за якої зміни одних об'єктів призводять до змін інших. Проте цю дефініцію вживають настільки часто, що її змістовне навантаження дуже розмите.

Під функцією системи, зазвичай, розуміють:

- ✓ дію системи, її реакції на середовище;
- ✓ множину станів на виході системи (зовнішній результат, ефект, властивість, ознака тощо);
- ✓ в описовому (дескриптивному) підході до функції її розглядають як властивість системи, що розгортається в динаміці;
- ✓ процес досягнення мети системою;
- ✓ погоджені між елементами дії в аспекті реалізації системи як цілого;
- ✓ траєкторію руху системи, яка може бути описана математичною залежністю, формулою, що зв'язує залежні та незалежні змінні системи.



Функції виражають поведінку системи і вона є впорядкованою, закономірною й організованою. Тому функції є напрямками активності системи, яка взаємодіє із середовищем. Функції системи, як цілого, визначають функції, які виконує в системі кожен з її компонентів. Між структурою системи та її функціями існує закономірний взаємозв'язок. Функції, якою би не була їхня природа, можна реалізувати лише в структурі. Функції властиві системі і її компонентам, причому функції системи є інтегрований результат дії структурних системотвірних її компонентів.

Важливим є поняття про **функціональну залежність** у системі, яке зумовлює основні напрями функціонального аналізу. Функціональна залежність може бути: між окремими компонентами системи; між компонентами і системою загалом; між системою загалом та іншою, ширшою системою, або надсистемою, компонентом якої є ця система. Загалом, функціональний аналіз зводиться до визначення зазначених видів функціональних залежностей, які ілюструють і пояснюють активність системи.

За просторовими, темпоральними, результативними, кількісними й якісними ознаками функції системи можна класифікувати на типи й види. Природна різноманітність систем утруднює це завдання, оскільки зумовлює індивідуальну неповторність функцій. Виділимо найзагальніші **типи функцій**. Щодо системи вони бувають зовнішні та внутрішні; за своєю природою – прості та складні; за проявом – явні й латентні (приховані); за способом часової детермінації – тимчасові (епізодичні) й постійні.

За дією на зовнішнє середовище і способами взаємодії з іншими системами функції можна розділити на такі типи: пасивні; обслуговувальні; протидії; поглинання; перетворення; адаптивні.

Пасивна функція – це існування системи як матеріалу для інших систем. Обслуговування спрямоване на системи вищого порядку. Функція протидії реалізується як спротив іншим системам. Поглинання інших систем і захоплення середовища реалізується як агресія. Перетворення інших систем і середовища – важлива функція. У живому світі найвагомішою є функція пристосування системи до довкілля – адаптивна.

Проте незамінними також є типи функцій за наслідками для системи. Вони бувають позитивні, нейтральні і деструктивні. За відсутності у природі **дисфункцій** у живих системах еволюція була би неможливою. За іншими кількісними та якісними ознаками можна виділяти багато різноманітних типів функцій систем.

У збереженні здорового довкілля найважливішим є розуміння внутрішніх і зовнішніх функцій екосистем різного походження. Питання про взаємодію і взаємозумовленість цих функцій представляється також одним з наріжних положень загальної теорії систем. Адже воно концентрує в собі

практично всі основні проблеми не лише функціонування, але і розвитку систем, загального стану довкілля на планеті.



Зовнішні функції – це активні, спрямовані дії системи на довкілля для досягнення поставлених цілей. Зовнішні функції реалізують зовнішні результати системи. Вони є стійкими реакціями системи на середовище і стійким зв'язком системи з ним.

Тому для них властиві:

- ✓ стійкість і стабільність, коли система постійно проявляє себе;
- ✓ спрямованість, тобто функція обов'язково на щось зорієнтована, вона предметна;
- ✓ активність, бо функціонування – це прояв активності в досягненні мети;
- ✓ взаємодія із середовищем, оскільки функція не зводиться лише до дії на середовище.

Функція системи – це її властивість в динаміці, що веде до досягнення мети, тобто в процесі функціонування система змінює стани. Одночасно вона переходить з одного стану в інший або зберігає який-небудь стан.

Стани зображають у вигляді точок простору станів. Звідси функціонування системи представляється у вигляді деякої траєкторії в просторі станів. У біології це називають епігенезом, а повний цикл станів – онтогенезом.

Оптимальним називається функціонування системи, за якого вона задовольняє: по-перше, обмеження, що накладені зовнішнім середовищем; по-друге, критерії якості власне траєкторії.



Внутрішні функції системи визначаються тим, що виконання системою зовнішньої роботи неминуче спричинює мобілізацію системи. У ній відбуваються різні "узгодження" цілей, упорядкування речовин, енергії, засвоєння й використання інформації.

Налагодження обміну з довкіллям потребує постійного внутрішнього регулювання елементів, взаємозв'язків між ними тощо. Тому під внутрішньою функцією потрібно розуміти найважливішу умову зовнішнього функціонування, за якого прояв цілого забезпечується проявом та існуванням його частин, тобто це спосіб взаємодії частин усередині цілого.

Внутрішні функції можна поділити на такі види:

- ✓ розпорядча (закріплення за елементами і підсистемами певних дій);
- ✓ координації та узгодження (спільні дії елементів);
- ✓ субординації або супідрядності (розподіл між елементами координаційних або субординаційних відношень);

- ✓ контрольна (контроль відповідності дії певній еталонній нормі);
- ✓ цільова (визначає мету функціонування і розвитку системи).

Реалізуються внутрішні функції природними або інтелектуальними механізмами системи. Якщо це жива система, то відбувається її біотична внутрішня саморегуляція. Якщо це соціальна структура (заклад, орган, завод тощо), то в ній "працюють" цілі, мотиви, цінності й установки людей. Націлена роль внутрішніх функцій полягає у тому, що вони забезпечують необхідну для ефективного зовнішнього функціонування внутрішню динаміку системи.

5.2. Суть і механізми функціонування систем

Функціонування системи є складним явищем, яке можливе винятково за рахунок її цілісності, обмеженої автономності компонентів і дій, а також завдяки зовнішній або внутрішній активності. Система в процесі функціонування виступає як цілісний утвір, в якому між її структурою та функціями існує взаємозв'язок і взаємозумовленість. Функція може бути реалізована структурою і пояснена за допомогою цієї ж структури. Тоді відбувається сполучення активностей компонентів. Вони додаються (сумуються), але не арифметично, а значно загадковіше, під впливом системотвірних чинників. Функціонування є постійним відтворенням дієвого ефекту, який зводиться до здатності системи робити те, що за жодних обставин не зробить кожен її окремий елемент. Функціональний ефект – емерджентність, базується на спорідненості і відмінності властивостей елементів, на різноманітті взаємодій між ними, їх інтегрованості.

Система може мати будь-яку кількість дієвих елементів. Кожен з них може брати участь у досягненні мети, але їх самих чи їхньої енергії повинно вистачати для реалізації цієї мети. Щоб однозначно уявити собі **суть функціонування** системи розглянемо його на прикладі уявної системи–схованки для жука. Таку систему становлять паперові квадратики, що мають властивість утворювати тунельну схованку із будь-якою кількістю стінок (граней), проте не меншої як три. За такої кількості й відповідного розміщення вони утворюють тунель тригранної форми. Інші фігури чи форми, що фізично присутні в системі у такій же кількості – палички, кульки, колечка тощо, значення не мають, адже вони за своєю формою не здатні утворювати тунельну схованку (реалізувати мету системи). У такому разі вони є пасивними компонентами системи, тобто не системотвірними. За зменшення кількості квадратиків, що взаємодіють, із будь-якого числа до трьох, лише кількісно зменшується результат функції. Проте, за подальшого зменшення їх кількості до двох чи одного, система втрачає результативність, стається якісна зміна. Система як



така (у нашому прикладі – складається трьох елементів), що мала за мету виключно створення схованки для жука, зникає. Отже, така



мінімальна група елементів є простою системною **функціональною одиницею**, або мінімальною простою системою, яка має певну властивість (здатність чинити дію), котрої немає у будь-якого її компонента окремо.

Коли відбуваються будь-які перетворення у такій системі, що не зменшують кількості функціональних елементів менше, ніж до трьох – можна говорити про *більше* чи *менше істотні зміни*. Якщо ж мінімальна кількість (у нашому прикладі – трьох) системотвірних елементів буде втрачена – відбудуться **суттєві зміни** у системі.



Елементарна (мінімальна) системна функціональна одиниця – це **функціональне ядро** системи, тобто те, що стає основою системи, її головний системотвірний чинник, такий, що робить будь-яке явище системою.

Суттєве перетворення (або суттєва зміна) означає зникнення однієї системи та виникнення іншої, або кількох.

Будь-яка функціональна одиниця реагує на зовнішню дію згідно із законом "все або нічого". Цей закон виходить із встановлення простої функціональної одиниці (видалення будь-якого її активного елемента припиняє її функцію як системи) та із дискретності її складу. Будь-який із її елементів може або бути, або не бути у складі простої функціональної одиниці. А оскільки вона за визначенням складається із кінцевого й мінімального набору дієвих елементів, і всі вони мають бути у складі функціональної одиниці та діяти, то припинення функції будь-якого з них ліквідує функцію всієї функціональної одиниці як системи. За умови перевищення певного порогу дії її результат буде максимальним ("все"), якщо немає зовнішньої дії, то функціональна одиниця ніяк не проявляє себе ("нічого"). Прості системні функціональні одиниці, не зважаючи на таке визначення, можуть бути скільки завгодно складними – від простих мінімальних до максимально складних.

Молекула води утворена з трьох атомів двох хімічних елементів. Видалення будь-якого атома перетворює цю молекулу в щось зовсім інше, ніж вода. З іншого боку, кожен атом кисню є дуже складним утвором. Видалення одного його компонента, наприклад електрона з орбіти, перетворює його на іон, протона з ядра – на азот.

Інший приклад, агроном-технолог – найпростіша функціональна одиниця системи під назвою агрономічна служба підприємства. Такий



працівник – це особистість і здорове тіло з достатнім багажем агрономічних знань і повним техніко-аналітичним спорядженням. Водночас тіло людини – складний об'єкт і наявність лише самого здоров'я без глибоких знань робить його лише небезпечним функціонером. З іншого боку, знання та великий досвід без належних агрегатів і засобів не можуть бути застосовані на практиці, а результативність роботи агронома-технолога у такому разі буде мінімальною. Лише разом указані дієві компоненти можуть створювати умови для виконання функції, покладеної на функціонера, а значить утворювати дієву функціональну одиницю вищої системи – а.

У **механізмі функціонування** систем можна виділити кілька складових. Традиційно вони взаємодіють із середовищем. Першим поштовхом для функціонування системи зазвичай є дія на неї середовища. Часто середовище стає інформаційним подразником, виникає прагнення системи досягти панівного стану і це провокує її впливати на своє довкілля.

Взаємодія системи з середовищем створює проблемну ситуацію для самої себе, коли треба пристосуватися, підпорядкуватися середовищу або посилено його перетворювати на свою користь. Система виробляє алгоритм (порядок) взаємодії зі своїм середовищем. Цей алгоритм є типом взаємовідношень. Зазвичай зовнішні взаємодії системи передаються у її внутрішні структури. Наявність такого передавального механізму, врешті-решт, і робить сукупність елементів системою.

Часто завдяки внутрішнім функціям системи відбувається реорганізація її внутрішньої структури. Внутрішні функції змінюють будову й організацію системи, роблять її здатною виконувати зовнішні, часто нові задачі. Компоненти системи завжди функціонують узгоджено як ціле. Зазвичай відбувається перерозподіл навантаження між елементами, узгодження й доповнення їхніх дій.

Найдивнішими і найскладнішими є механізми перетворення системою свого довкілля завдяки перебудові самої себе. Відповідно до власної природи, будь-яка **зовнішня дія** (сигнал) досягає системи за допомогою незначної (тимчасової) її внутрішньої перебудови.

5.3. Поняття емерджентності й синергізму

Із будови природного чи штучного об'єкта, організації його внутрішніх складових виникає системність, універсальною ознакою якої є емерджентність (англ. *emergence* – виникнення, поява нового). Згідно з теорією систем:



Емерджентність – це наявність в будь-якої системи особливих властивостей, не притаманних її компонентам або підсистемам окремо, а також їх



сумативній сукупності, яка не сформована особливими системотвірними зв'язками. Іншими словами – це кількісне і якісне перевищення властивостей системи, порівняно із простою сумою властивостей її компонентів. Емерджентність інколи трактують як синонім до терміносполуки "**системний ефект**".

У біології й екології поняття емерджентності пояснює властивості біологічного виду або популяції не суто властивостями окремих особин (поняття народжуваності, смертності, життєвості). В еволюціоністиці емерджентність пояснює виникнення нових функціональних ознак системи, які не зводяться до простих перестановок елементів, що існували до цього. У ґрунтознавстві емерджентною властивістю ґрунтів є їхня родючість.

Важливим є те, що якісно нові, емерджентні властивості системи не можна передбачити, виходячи із властивостей її компонентів. Іншими словами, властивості цілого неможливо звести до суми властивостей його частин. Хоча дані, отримані при вивченні якого-небудь рівня, допомагають у вивченні наступного, але з їх допомогою ніколи не можна повністю пояснити явища, що відбуваються на цьому наступному рівні – він має бути вивчений безпосередньо.

Для ілюстрації емерджентності наведемо два приклади – один із хімії, інший з екології. Гази водень і кисень, сплучаючись у певному співвідношенні, утворюють воду – рідину, абсолютно не схожу за своїми властивостями на вихідні складові.

Група азотфіксувальних бактерій та бобові рослини утворюють симбіотичну систему (рис. 5.1). Виникає ефективний механізм кругообігу азоту, що дає змогу такій комбінованій системі підтримувати високу продуктивність на ґрунтах із низьким запасом азоту.

Втрата або виникнення емерджентності означає *суттєву зміну* в системах, всі інші кількісні та якісні коливання властивостей можуть бути *істотними* або *не істотними*.

За функціональною по-



Рис. 5.1. Rhizobium – гетерогенна група азотфіксувальних бактерій, які живуть у ґрунті, в корневих вузликах бобових рослин у симбіозі з ними і утворюють симбіотичну систему з унікальною емерджентною функцією.



ведінкою штучні й напівштучні системи традиційно належать до реактивних. Натомість природні, особливо живі системи, активні (вагомішу роль у функціонуванні таких систем відіграють внутрішні сили й мета, а дії середовища для них другорядні). Особливу групу з-поміж активних утворюють системи, що розвиваються. Найзагадковішими й найскладнішими є об'єкти, що самоорганізуються та саморозвиваються.



Процеси саморозвитку у складних системах досліджує загальнонаукова теорія самоорганізації – **синергетика**, яка має за мету пошук законів еволюції відкритих нерівноважних систем будь-якої природи.

Одне із її завдань – з'ясувати закони побудови організації та виникнення упорядкованості. Синергетика виникла як наука за дослідження таких взаємодії елементів системи, які призводять до виникнення просторових, тимчасових або просторово-часових функціональних структур, котрі володіють властивостями синергізму.



Синергізм (гр. – спільний; такий, що погоджено діє; співпраця; співдружність) – це явище колективної узгодженої поведінки елементів, яке зумовлює загальний результат процесу, що перевершує суму окремих ефектів, котрі входять у цей результат.

Синергетичний ефект і породжує нову, часто несподівану властивість системи, яку називають емерджентністю.

5.4. Проблеми ефективного функціонування систем

У функціонуванні систем виникають різнобічні проблеми. Власне саме функціонування і є виявом проблемних ситуацій та їх вирішенням. Виділяють такі з них, як найскладніші. **Реактивність** для будь-якої системи важлива. Вона означає, наскільки система здатна фіксувати дію свого довкілля, реакції-відповіді своїх елементів, а також виробляти на них власні реакції (внутрішні дії) як цілого. **Збереження меж** – постійна проблема, бо функціонування системи є процесом перманентного порушення і відновлення її границь. Системам властива пластичність, динаміка границь, а часто і їх розмитість, що дозволяє їм краще адаптуватися, досягати своїх цілей.

Функціонування завжди передбачає використання деяких ресурсів системи, яке може зумовити їх вичерпання. Система, виведена з рівноваги діями довкілля, може віддати настільки значний ресурс, що втратить баланс із оточенням, потрапить у стан руйнування структури і втрати

функцій. Тому проблема **збереження рівноваги, збалансованості, стабільності** системи є питанням її подальшого існування.

Режими функціонування системи відповідають її "викликам", докiллiю i дiї на неї. Тому процес функціонування багатоваріантний. Можливі такі режими системи: рівноважний (система перебуває в одному й тому ж стані) і періодичний (система через рівні проміжки часу проходить одні й ті ж стани). Якщо система є в рівноважному або періодичному режимі, то вважається, що це сталий або стаціонарний режим; перехідний – рух системи між двома періодами часу, в кожному з яких система буде в стаціонарному режимі; аперіодичний – система проходить деяку множину станів, проте закономірність їх проходження складніша; ергодичний – система проходить весь **простір станів**. Отже, що з часом проходить скільки завгодно близько до будь-якого заданого стану. Сенс проблеми режимів функціонування систем у дослідницькій діяльності полягає в їх ідентифікації та діагностиці, а на практиці зводиться до правильного вибору режиму функціонування системи керування.

Проблемою є **збереження** або **поліпшення динаміки** системи. Стан системи є сукупністю значень її показників. Усі можливі стани системи утворюють їх множину. Якщо в цій множині є визначенням поняття близькості елементів, то його називають простором станів. Рух (поведінка) системи – це процес переходу системи з одного стану в інший, із нього в третій і так далі. Динамізм є ознакою руху, розвитку, зміни системи і її складових під впливом зовнішніх і внутрішніх чинників.



Оптимальність функціонування системи, тобто здатність системи вибрати і реалізувати найкращу траєкторію із простору функцій є дуже важливою проблемою, оскільки означає "економію" ресурсів і часу.

Оптимізація – це пошук найкращої альтернативи, яка забезпечує максимальну або мінімальну активність чи інтенсивність функцій системи.

З позиції людини, як зовнішнього чинника стосовно системи, **спосіб уявлення про функціонування** її є вирішальною проблемою. Адже оптимізація системи, ефективне керування нею багато в чому залежать від того, як ми уявляємо собі систему. Звичайно, природа системи сама по собі від наших знань не зміниться, а ось модель, яку використовуємо на практиці, виявиться вирішальною для подальших кроків.

Особливо необхідне правильне визначення системи при управлінні екологічними, економічними й соціальними об'єктами, оскільки помилки в їх системних поданнях можуть призвести до значних утрат.

5.5. Функціонування агроєкосистем

Специфіка екологічних взаємовідношень спонукає до визнання складності законів функціонування екосистем як законів перебігу взаємопов'язаних процесів руху речовин та енергії в них. Найважливішими із цих процесів є створення основної маси органічної речовини планети та фотосинтетичної акумуляції у ній сонячної енергії (рис. 5.2). Вони супроводжуються пов'язаними процесами розкладу органічних решток і біотичного кругообігу поживних елементів та відбуваються на тлі геоматичних, водотрансформаційних, геохімічних і метеоатмосферних процесів на земній поверхні (Banerjee, Crossman & de Groot, 2013).



Функціонування аграрних екосистем розуміють, як сукупність екологічних процесів, що відбуваються завдяки дії зовнішньої (переважно сонячної) та дотаційної (антропогенної) енергії, яка підтримує продукційний процес біоти (головно культурних рослин): засвоєння вуглекислоти, поживних речовин і води для утворення біомаси і насіння з метою розмноження.

Функціонування екосистем спричинює колообіг речовини та енергії, воно зв'язане мережею трофічних ланцюгів у біотичному кругообізі. Колообіг речовини та потік енергії через екосистему – це повторюване явище. Для екосистем має значення геоматичний колообіг планетарного виміру і біотичний, який відбувається між організмами і середовищем існування, тобто в межах екосистем. Разом з геоматичним рухом води переміщуються величезні маси розчинених у ній хімічних речовин, частина яких осідає на дно суходільних, а частина океанічних аквасистем у вигляді делювіальних відкладів.

Функція екосистеми є інтегральним поняттям для вираження сукупності законів цілісної взаємодії підсистем, сполучених у надсистему, під впливом навколишнього середовища. У такому розумінні функція екосистеми об'єднує всі закони, які управляють змінами цих аспектів системи.



Різноманітні процеси (підфункції та функції за В. Вернадським) екосистеми описують усі аспекти її біогеохімічної роботи. З них основними є такі **екофункції**: 1) енерготрансформаційна; 2) синтезу і розкладання речовин; 3) газообміну; 4) окиснення й відновлення; 5) локалізації (концентрування) хімічних елементів; 6) водотрансформаційна; 7) захисна; 8) середовищевірна й ін.

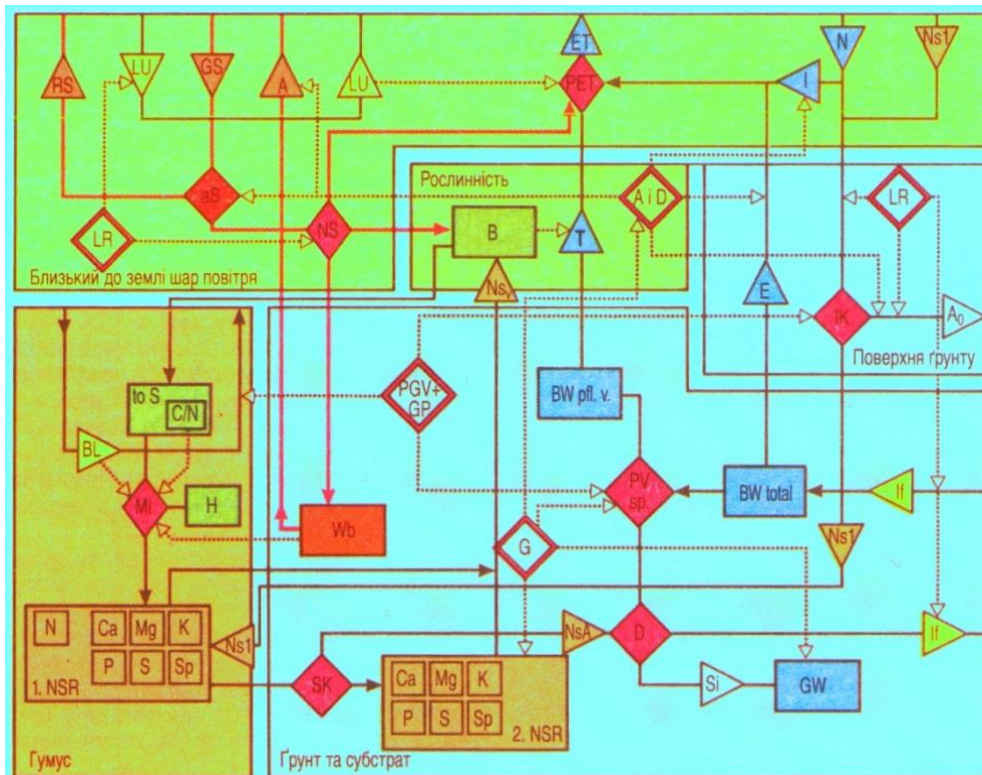


Рис. 5.2. Схема функціонування екосистеми (Гайнріх і Гергт, 2001):

◆ Регулятор структури	■ Нагромаджувач	→ Процеси
LR – становище в рельєфі;	BW total – загальний запас ґрунтових вод;	N – опади;
G – ґрунтовка;	BW pfl.v. – ґрунтова вода для рослин;	I – втрати через інтерцепцію;
PGV+GP – класифікація пор за розміром і загальний об'єм пор;	GW – запас ґрунтової води на місцевості;	E – випаровування;
A і D – тип та густота рослинності.	B – біомаса;	T – транспірація;
◆ Регулятор потужності	to S – мертва орг. субстанція;	ET – евапотранспірація;
IK – потужність інфільтрації;	W _B – тепло ґрунту;	A ₀ – стікання з поверхні;
D – проникність;	1 NSR – резерв гумусових поживних речовин;	Si – вода, що просочується;
PVsp. – об'єм пор, здатний до накопичення;	2 NSR резерв ґрунтових поживних речовин;	GS – глобальне випромінювання;
SK – потужність сорбції;	Sp – мікроелементи.	RS – частка відбитого випромінювання;
aS – абсорбція випромінювання.		A – випромінювання;
◆ Регулятор інтенсивності		LU – загальний обмін повітряних мас;
NS – чисте випромінювання;		If – поверхневе стікання;
PET – потенційна евапотранспірація;		BL – обіг повітря ґрунту;
Mi – мінералізація.		Ns 1 – вхід поживн. речовин;
		NsA – вимивання поживних речовин.
		Ns _y – вбирання поживних речовин рослинами.
→ Потік енергії та обіг речовин.	→ Відношення впливу.	



Завдання пізнання функцій екосистеми виступають як засоби досягнення головної мети її вивчення, оскільки саме у функціонуванні виявляються особливості різних типів екосистем (тундрових, лісових, степових, пустельних, гірських і водних, а також штучних) та їхньої реакції на різні види людської діяльності.

Досі різні аспекти функціонування екосистем вивчені до різної глибини в якісному і кількісному відношенні. Так, якщо основний процес функціонування екосистем – **продукування органічної речовини**, детально вивчений з якісного боку, то в кількісному відношенні він досліджений набагато менше.

Поняття складу, структури і функції екосистеми дають змогу краще розкрити її як об'єкт системного підходу й показати, що екосистемі властиві такі тривіальні системні риси, як висока складність, ієрархічність будови, цілісність, динамічність та унікальна здатність до саморегулювання й адаптації.





6

СИСТЕМА І СЕРЕДОВИЩЕ

6.1. Внутрішнє, навколишнє середовище та межі систем

Розуміння суті середовища в системології важливе для комплексного дослідження й системного аналізу будови й функціонування природних і штучних об'єктів. Адже рівень розчленування систем на елементи, опис функцій, декомпозиція мети тощо неможливі без категоризації компонентів природи на середовищні й системні. Що ж є середовищем, а що є самою системою? – дуже складні методологічні питання.



Середовище внутрішнє – це сукупність об'єктів, явищ у межах системи, які впливають на її поведінку, але не належать їй ні структурно, ні функціонально.

Якщо із зовнішнім середовищем все відносно зрозуміло, бо воно не входить в сукупність системотвірних елементів, то з внутрішнім середовищем складніше: воно належить системі просторово і формує її будову. В будь-якій системі внутрішнє середовище охоплює дві складові. Перша – це елементи, стосунки, зв'язки, що впливають на систему і на її компоненти, друга – внутрішнє середовище самих елементів, яке визначає вже їхню поведінку. Виразних границь між внутрішнім і зовнішнім середовищами системи і її підсистем, як правило, не буває.



Середовище навколишнє – це зовнішнє середовище системи, або сукупність об'єктів і явищ, які є за межами системи, їй не належать ні структурно, ні функціонально, але впливають на неї.

У найспрощенішому розумінні середовище є тим, що утворює певне оточення системи. За глибшого підходу, середовищем системи буде більша система, або низка систем, що охоплюють елементи, які не належать меншій. У системології важливо, що зовнішнє середовище – це не просто фізичне оточення системи, а ті компоненти з цього оточення, що впливають на її внутрішні елементи чи взаємодіють із системою.



Система і середовище функціонально пов'язані і їх не можна зрозуміти у відриві одне від одного. Система починається там, де проходить відмежування її від довкілля.



Межі системи – це сукупність об'єктів, за допомогою яких вона відмежовує себе від свого довкілля. На межі системи можуть існувати границі поширення її структур і функцій та кордони, якщо система є державою (або іншою закритою системою), що регулює пересування людей, речей, коштів, інформації).

При цьому потрібно застерегти, що межі системи і середовища найчастіше хиткі й розмиті. Це пояснюють тим, що кожна функція системи може задавати свої кордони. Тому система відокремлена від довкілля не чітко визначеною лінією, а пограничним простором, який є мереживом зв'язків системи, що утворюються в ході реалізації нею тих чи інших функцій (рис. 6.1).

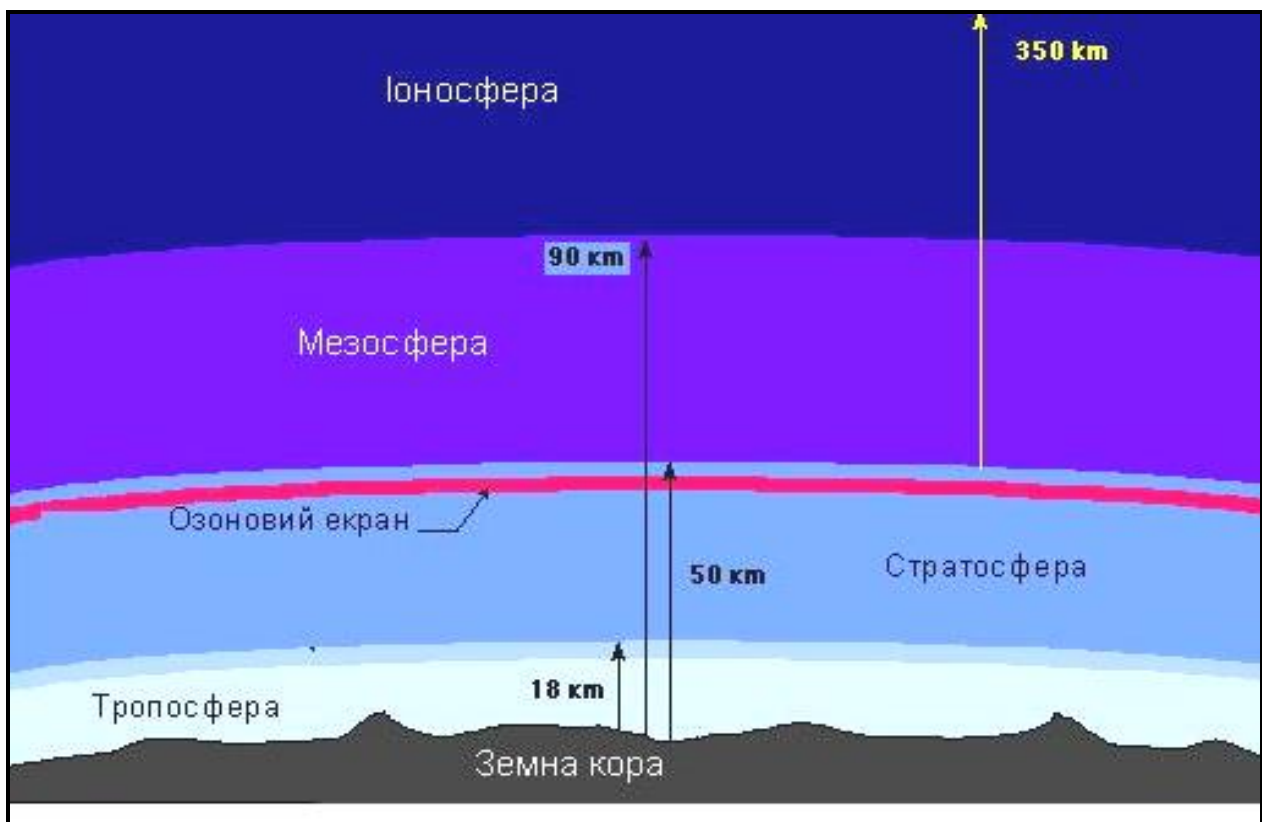


Рис. 6.1. Навколишнє фізичне середовище планети Земля (межа – іоносфера) та глобальної екосистеми – біосфери (верхня межа – озоновий екран, нижня межа – мертва літосфера)

В екології прикладом просторового пограниччя є **екотони**, котрі у суходільних біогеоценозних екосистемах можна охопити візуально. Їх ще називають природними континуумами. Зазвичай, у багатьох провінці-

альних, ландшафтних чи біогеоценозних екосистемах континуальні переходи просторово розтягнуті.

Проблема меж особливо складна тоді, коли виникає принципово нова система. Щоб знайти границі системи і побудувати її план, необхідно прикласти до кожного об'єкта системи своєрідне мірило – системотвірний чинник.

Побудову просторової моделі системи з визначенням її меж вивчає спеціальна галузь знання – **топологія систем**.

Середовище – явище перманентне і повсюдне як усередині системи, так і за її межами. Зовнішнє середовище є простором локалізації та існування системи, а внутрішнє – простором її життя. Із зовнішнього середовища система отримує життєві ресурси, а внутрішнє є полем функціонування системотвірних елементів. Внутрішнє і зовнішнє середовища системи є взаємозалежними і взаємозумовленими.

Середовище пов'язане із системою складними мінливими процесами, а для відкритих систем воно є необхідною умовою їхнього існування. Енергія, інформація та речовини потрапляють у систему з її навколишнього середовища.

Традиційно середовище є певною сукупністю систем різного рівня, що мають свої стратегії й алгоритми поведінки.

Типи середовища багатоманітні: фізичне, екосередовище, соціальне, економічне, інформаційне, культурне, релігійне, політичне тощо. Середовище може бути нейтральним, пасивним або активним, і навіть агресивним.

Середовище має певні властивості, які можуть впливати на систему як **екзогенні чинники**. В аспекті будови воно представляє певну сукупність організованих систем і хаотичних утворів. Організовані системи надають середовищу властивості передбачуваності й організованості, а хаотичні утвори – створюють непередбачуваність, випадковість, стохастичність. Дії на середовище, які за природою своєю є внутрішньосистемними, називають **ендогенними чинниками**.

Структурно не всі об'єкти, які є навколо системи, належать до її середовища, а лише ті, що мають відношення до її життєдіяльності, або які потрапляють у сферу "зацікавленості" системи. Може бути і навпаки, що в сферу "інтересів" компонентів середовища потрапляє сама система. Лише люди, носії свідомості й елементи системи соціуму мають між собою відносини.

Система впливає на середовище за допомогою своїх функцій. При цьому, зовнішні функції організаційно впливають на довкілля, а внутрішні – на внутрішнє середовище. Система завжди використовує середовище як джерело, сховище і засіб перероблення ресурсів, продуктів життєдіяльності. Вона постійно змінює свої межі щодо середовищ. У цьому виявля-

ється динамізм системи. Вона може отримувати або захоплювати з довкілля елементи і робити їх своїми, а також вводити у своє внутрішнє середовище.

6.2. Системне розуміння взаємодії і протидії, конкуренції й боротьби

Середовище видимо або невидимо, тепер або пізніше обов'язково впливає на систему. Сама система є сукупністю середовищ. Стосовно ролі середовища в житті об'єкта можна виділити дві групи систем. Перша група спирається на внутрішні джерела розвитку, а друга – на зовнішні. Між середовищами і системою існують двобічні взаємодії, тобто вектор може бути спрямований від середовища до системи і від системи – до середовища.

Принципово важливою властивістю систем вважають відкритість і закритість. Під відкритістю системи розуміють кілька складових.



Відкритість – це відсутність пограничної проблеми між системою та довкіллям, тобто відкрита система не має жорстких меж. Відкритість асоціюється зі свободою елементів системи. Ця свобода зводиться до можливості й реальності вибору, рухів елементів у різних напрямках.

Відкритість системи реалізується через зовнішні функції *взаємодій*, які можуть бути кількох видів.

Перетворювальні функції властиві для активних систем, які змінюють своє довкілля, приводять його у відповідність до своєї природи. Пасивні функції традиційно тимчасові, інколи короткочасні, найчастіше пов'язані з кризами системи. Проте пасивна система все-таки функціональна, оскільки віддає себе хаосу (безладу), довколишнім системам. Споживчі функції властиві для систем, які отримують з довкілля речовину, енергію, інформацію. Крайнім проявом цієї функції є *поглинання* – захоплення інших систем і середовища. Цей варіант функції властивий системі, яка не просто перебуває у стані спонтанної взаємодії із середовищем, а досягла максимальної потужності й активно поглинає з довкілля системи та їхні елементи.

Надзвичайно цікавою і важливою є *адаптивна функція*, притаманна великому колу адаптивних систем, що володіють здатністю пристосовуватися. Вони забезпечують узгодження системи з її оточенням, взаємну зміну поведінки. Природа й механізми адаптації залежать винятково від сутнісної природи самих систем і їхнього довкілля. Функції обслугову-



вання є властивостями адаптивних систем, які є допоміжними для взаємодії і підтримання систем вищого порядку.

Різноманітний вплив середовища перманентно "відчувають" екосистеми, тому вони повинні постійно пристосовуватися. **Нативні** (лат. *nativus* – природжений, природний) екосистеми є самоорганізованими та саморегульованими. **Біотичні системи** є обмежено відкритими і ступінь відкритості залежить від рівня їхньої організації. Вхідні канали, якими вони пов'язані із зовнішнім середовищем, спеціалізовані та є під контролем самих біотичних систем. Їх розглядають як шляхи інформування про зовнішнє середовище і його **флуктуації**. Це й робить можливими адаптивне реагування і регуляції всієї структури – власне системи та її довкілля. Усі регуляторні процеси можливі лише за рахунок механізмів, що діють усередині системи: метаболізму під впливом нуклеопротейдів ядра і комплексу ферментів у клітині, фізіологічних і формотвірних взаємодій у тілі особини, взаємодії особин у популяції і виживання популяцій конкретного виду, а також виживання видів у біоценозі, припасування біоценозів у екосистемах, гармонізація екосистем у ландшафтах, аж до збалансування всіх екосистем у біосфері.

Біотичні системи – клітина, багатоклітинний організм, вид, популяція, екосистема – утворюють єдиний ряд взаємопов'язаних, ієрархічно підлеглих одиниць. Історичні зміни цих систем тому завжди взаємозумовлені. Хоча біоценоз, як і популяція, володіє внутрішнім механізмом саморегуляції та підтримки постійності своєї структури в певних умовах існування, це, звичайно, не означає обов'язкове збереження цієї структури незмінною при коливанні життєвих умов. Навпаки, разом зі зміною умов існування і біоценоз є в стані перманентної перебудови. Проте і в історичних перетвореннях виявляється дія тих же кібернетичних механізмів і сама еволюція виявляється регульованим процесом безперервної адаптації.

Роз'яснимо суть **кібернетичної саморегуляції** системи живого організму за принципом зворотного зв'язку. Система (рис. 6.1), сприйнявши зовнішню (2) дію (якщо це не нищівне стихійне явище – 1), скеровує (3) отриману інформацію до "регулятора" (Р), який "виробляє (4) відповідь" на неї. Саморегуляція починається за надходження (5) "опрацьованої" інформації від внутрішнього адаптаційно-генетичного апарата (регулятора Р) знову до "збудженої" системи (ЗС). Завдяки їй система здійснює корекцію власних структурних і функціональних властивостей відповідно до своєї первинної природи – первісного (еталонного стану – ЕС). Первісний стан є оптимальним – упродовж мільйонів років оптимізованим варіантом будови й роботи системи. Він найкраще відповідає певним усередненим умовам її існування за відсутності потужних стохастичних (стихійних) дій. Саморегуляція "гарантована" наявністю зворотного зв'язку (канал 3) між "збудженою" системою й адаптаційно-генетичним регулятором,

через який від неї постійно надходить до цього регулятора інформація про її стан, роботу, динаміку, реакції на різноманітні зовнішні дестабілізаційні впливи. На підставі цього адаптаційно-генетичний апарат може змінювати свої управлінські команди щодо цілісної системи. У керованих людиною екосистемах, як в кібернетичних системах, значну частину регуляторних функцій беруть на себе фахівці, втручаючись у канал 5.

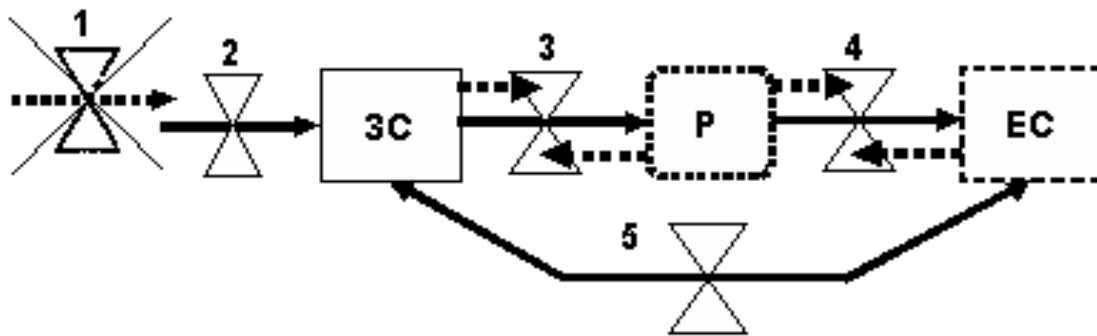


Рис. 6.1. Принцип зворотного зв'язку в саморегульованій системі
(за Л. фон Берталанфі, 1961; Вінером, 1983):

ЗС – "збуджена" система; Р – регулятор; ЕС – еталонний стан (норма); 1 – імовірна стохастична дія (відсутня); 2 – збудження системи; 3 – внутрішній вихід "збудженої" системи на регулятор; 4 – порівняння "збудженої" системи з еталонним станом; 5 – консолідована реакція-відповідь системи (адаптація)

Приклад кібернетичної саморегуляції еволюційного процесу можна знайти в І. Шмальгаузена (1968), у якому загальний регуляційний механізм еволюції популяції розглянутий як складний тривалий цикл.

1. Конкуренція завжди присутня усередині біогеоценозу. Дія біогеоценозу на популяцію реалізується шляхом прямої і непрямой елімінації її особин (вхідний канал зв'язку).

2. Постійно триває "порівняльна оцінка" варіантів, тобто фенотипів, за елімінації (зникнення) неадаптивних особин і розмноження пристосованих. Спостерігаємо виживання окремих фенотипів усередині популяції (перетворення популяції, а отже, і її спадкової структури).

3. Відбувається спарювання і розмноження конкурентних особин, започатковується концентрування конкурентних генів у популяції (передавання і посилення прямої, тобто спадкової інформації).

4. Виникає індивідуальний розвиток за успадкованою програмою із прямою регуляцією. Реалізуються нові фенотипи (перетворення спадкової інформації у зворотну, фенотипну).

5. Дія популяції на біогеоценоз відбувається шляхом захоплення життєвих засобів (вихідний канал зв'язку із середовищем, що несе інформацію про стан популяції через активну життєдіяльність її особин). Популяції

конкурують усередині біогеоценозу, який здійснює внутрішній контроль (повертаємося до п. 1).

Описаний цикл підтверджує, що регуляція еволюційного процесу реалізується усередині системи популяції шляхом природної конкуренції варіантів (сигналів) на підставі їх порівняльної оцінки в біогеоценозі. Це означає наявність вхідного зв'язку із середовищем. Результат регуляції передається через сигнали спадкового коду статевих клітин, посилюється у процесі розмноження і перетворюється в сигнали зворотної інформації (фенотипи), що надходять у біогеоценоз по вихідному каналу зв'язку для контролю виконання (фенотипів).

Будь-який мінімальний зовнішній вплив, що "вимагає" додаткової активної дії, задає новий рівень функціонального стану, якщо лише резерв елементів не вичерпаний. Коли нова дія встановлюється на новому незмінному (стаціонарному) рівні, то і функціональний стан системи урівноважується на новому незмінному (стаціонарному) функціональному рівні.



Механізмом гомеорезу відкрита система підтримує свій **гомеостаз** – динамічну рівновагу у межах мети її функціонування. Отже, **гомеорез** – еволюційний стабілізований потік станів динамічної рівноваги (гомеостазів) у відкритих (живих) системах організмів (Уоддингтон, 1970).



Волтер Кеннон
(1871–1945)

Згідно з теорією Волтера Кеннона (1932), гомеостаз є сукупністю органічних регуляцій для підтримання стійкого стану організму, причому дія регуляційних механізмів може відбуватися не в одному і тому ж, а часто в різних і навіть протилежних напрямках – відповідно до певних зовнішніх змін, які підвладні фізичним законам. Простим прикладом гомеостазу є гомеотермія. У фізичній хімії, за правилом Я. Вант-Гоффа, зменшення температури спричинює сповільнення хімічних реакцій. Саме так відбувається у звичайних фізико-хімічних системах, а також у холоднокровних тварин. Проте у теплокровних пониження температури спричинює протилежну дію, а саме: збільшення швидкості метаболізму, внаслідок чого підтримується постійна температура тіла на рівні коло 37°C. Це зумовлено дією механізму зворотного зв'язку. Пониження температури стимулює термогенічні центри в таламусі мозку, які "вмикають" теплотвірні механізми тіла.

Деякі риси відкритих, на відміну від закритих, систем проявляються в тому, що за відповідних умов відкрита система досягає стану рухливої



рівноваги, в якій її структура залишається постійною, але в протилежність звичайній рівновазі ця постійність зберігається в процесі безперервного обміну й руху складових речовин. **Рухлива рівновага** відкритих систем має унікальну властивість **еквіфінальності** (лат. – рівнозначний результат). Це означає, що на відміну від положень рівноваги в закритих системах, повністю детермінованих початковими умовами, відкрита система може досягати незалежного від часу стану, який не залежить від її вихідних умов і визначається винятково параметрами системи.

Прикладом може бути хворобливий стан людського організму, як перебіг патологічного процесу – це динамічне явище руйнування системних функціональних елементів під дією несприятливих умов середовища в певних системах живого організму. Результатом цього процесу є поява й нагромадження дефектів. Якщо дефекти накопичуються постійно, то це означає, що відбувається постійне зменшення кількості системних функціональних елементів (резервів організму), зниження можливостей адекватно реагувати на зовнішні дії. Зрештою це призведе до того, що хворий організм не зможе адекватно реагувати на все більші навантаження (зовнішні дії) і, врешті-решт, навіть стан спокою буде для нього непосильним навантаженням. А це вже не сумісно з життям.

Зміну патології оздоровленням потрібно розглядати як процес, який після певних несприятливих сукцесій, спричинених зовнішнім середовищем, чи внутрішніх порушень функціонування організму, спрямовує систему до відновлення нормального стану. При цьому система нашого організму спирається на звичну еквіфінальність біотичних систем і використовує кваліфіковану допомогу лікаря (коли є така потреба). Якщо прямувати цією дорогою, то ***vis medicatrix naturae*** предків звільняється від її метафізичного духу, це більше не загадкова віталістична сила, а вираження динаміки живих систем, що підтримує і поновлює, наскільки це можливо, їхній стан рухливої рівноваги.

Важливою функціональною ознакою відкритих систем є те, що у них виявляються термодинамічні закономірності, які здаються парадоксальними і суперечать другому закону термодинаміки (рис. 6.2).



Відповідно до **другого закону** загальний перебіг фізичних подій у закритих системах відбувається у напрямі **збільшення ентропії** – втрати придатної до використання нею енергії, елімінації відмінностей (спрощення) і досягнення стану максимальної невпорядкованості – хаосу, або стану функціональної неврегульованості, який зумовлює руйнування старої або виникнення нових систем.

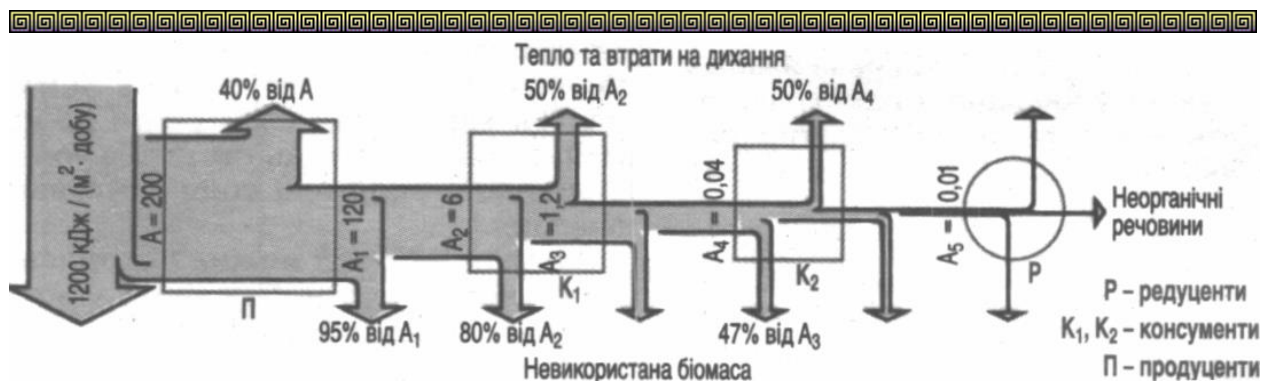


Рис. 6.2. Потік і розсіювання енергії у відкритій екосистемі
(Гайнріх і Гергт, 2001)



Водночас у відкритих системах, в яких відбувається перенесення речовини, цілком можливе **підвищення негентропії**, яка означає зростання упорядкованості у системі, збільшення у ній внутрішньої енергії і зменшення невизначеності.

Тому подібні системи можуть зберігати свій високий рівень і навіть розвиватися у бік збільшення порядку і складності, що дійсно є однією з найважливіших особливостей життєвих процесів.

Загадковим явищем залишається інформаційна взаємодія системи зі своїм внутрішнім і зовнішнім середовищем. Відомі факти свідчать, що первинна органічна поведінка, наприклад перші рухи утробного плода, не є рефлексною відповіддю системи організму на зовнішні стимул-реакції, а швидше мимовільною функцією, концентрованою дією всього ембріона або навіть ширших органічних структур.

Вірогідно, перші рухи малюка в утробі матері також є функціональною реакцією на істотні зміни різнобічних якостей внутрішнього середовища організму, що стрімко росте й розвивається.

Багато авторів робили спроби обґрунтувати поняття потоків інформації в екосистемах і обмін інформацією між екосистемою і навколишнім середовищем. Наприклад, Б. Петтен (1959) застосував ідеї Е. Шредінгера (1944) і Л. Бріллюєна (1956) про "живлення" біотичних організмів негативною ентропією (негентропією) до екосистеми загалом. Він розглядав екосистему як "ентропійну помпу", яка використовує енергію навколишнього середовища для пониження своєї ентропії та підтримання внутрішньої упорядкованості.

Огляд проблеми "термодинамічного інформаційного обміну екосистем" можна знайти в книзі Б. Штургена (1974). Відомі дослідження застосування поняття про екоінформацію як міру видової різноманітності біоценозу екосистеми (Маргалеф, 1956) та інформації ландшафту як міри різноманітності його геохімічного складу (Перельман, 1972). Проте досі у



вивченні екосистем плідним виявилось тільки поняття про обмін генетичною інформацією між екосистемами, коли, наприклад, в неї проникають особини із багатшим генетично зумовленим еволюційним потенціалом, ніж у "місцевих" представників виду (Тимофеев-Ресовский и др., 1973).

Закриті системи існують у виразній ізольованості від навколишнього середовища і мають сталу поведінку *протидії* своїх елементів стосовно нього. Вони функціонують згідно другого закону термодинаміки і прямують до абсолютної невпорядкованості, адже через власну закритість не отримують від свого середовища існування ні нової енергії, ні речовини.



Закритість – це повна ізольованість системи від її зовнішнього середовища і жорстка детермінована поведінка (максимальна протидія) усіх елементів, що належать до неї.

Але поняття закритості відносне. За стабільного стану навколишнього середовища явище закритості залишається сталим. І можна навести багато прикладів закритих систем у теперішньому світі: інертні гази; молекули води й газоподібного азоту; пилок рослин; цисти бактерій; спори грибів; яйця плазунів і птахів, які можуть відносно довго (залежно від своєї природи) залишатися закритими системами за збереження сталих параметрів середовища їхнього існування.

Відносність закритості проявляється тоді, коли, наприклад, інертні гази за надвисокої (20 000°C) температури перетворюються у плазму – гарячу суміш "голих" ядер та електронів; вода й азот при каталітичних реакціях у специфічних умовах розщеплюються на складові атоми або іони; у яйцях птахів під дією "потрібної" сталої температури (40–42°C) розвиваються живі організми. Для виведення закритих систем із рівноваги довіклля, або надсистема має "втрутитися" у їхню структуру дією адекватної потужності, яка може бути у вигляді відповідної енергетичної чи речовинної ін'єкції. Наприклад, уламок льоду (води у кристалічному стані – див. рис. 4.2) може скільки завгодно зберігатися у товщі антарктичного материкового льодяного панциру (температура якого ніколи не підвищується до рівня плавлення льоду +4°C). Проте, в наш час, коли спостерігаємо глобальне потепління, прибережні краї антарктичного льодового щита нагріваються і відколюються в океан. За зміни зовнішніх температурних умов кристалева конструкція шматка льоду як замкнута система, отримує ін'єкцію зовнішньої енергії для свого руйнування й утворення нової системи – рідини.

Відносна закритість багатьох природних систем у стабільному середовищі є умовою й запорукою існування навколишнього світу, його еволюції та відносної передбачуваності. Знання її природи дає змогу людині створювати штучні системи, які теж скільки завгодно можуть залишатися

закритими, але функціональними за спланованого керівного втручання у них.

У природі завжди тривала взаємодія і конкуренція між системами, її елементами й навколишнім середовищем, а з виникненням життя ці форми функціональних відношень поширилися на біотичні системи (мутуалізм, паразитизм, протокооперація тощо). З виникненням людських соціальних систем (від стада, племені до етносу, держави, військового блоку) з'явився новий спосіб взаємовідношень між системами, якого не було в природі – боротьба за виживання, за ресурси, за панування. Природні взаємовідношення: взаємодія, протидія та конкуренція систем і середовища на вищому щаблі розвитку живої **форми руху матерії** – суспільної, коли виникла і стала системною функцією свідомість, перетворилися у **взаємовідносини**: запеклу, іноді криваву й смертельну боротьбу.

У Вікторіанську епоху в умовах бурхливого розвитку "дикого" капіталізму та соціально-економічної ейфорії, колонізаторської експансії розвинених націй, панівну в людських стосунках, філософських концепціях та у суспільній практиці, ідею боротьби за виживання й переваги сильнішого, Ч. Дарвін, як син свого часу, механічно екстраполював на закони розвитку живої природи. У праці "*On the Origin of Species...*" (1859) він спробував обґрунтувати механізм еволюції біоти на основі "боротьби" видів за виживання.

Критики дарвінізму наполягають, що в дикій природі немає жодної боротьби, панують різні **форми ековзаємодії** і взаємовідношень різних видів, біотичних систем тощо (Кропоткин, 1902; Берг, 1977; Лима-де-Фариа, 1988; Корочкин, 1991; Назаров, 2007). Прилаштування до функціональних властивостей природних екосистем антропосоціального явища – боротьби, не сприяло прогресу у розумінні розвитку біоти, зате значно ускладнило і тривалий час гальмувало поступ біології й еволюційної теорії.



У дикій природі **конкуренція** (лат. *concurrere* – суперництво) – це взаємовідношення між системами, результатом яких є приєднання потужнішою з них ресурсів або довкілля, що можуть належати іншим, слабкішим системам, або таким, що розпадаються онтогенетично чи еволюційно.

Праці Г. Вольтерри, А. Лоткі, Г. Гаузе й ін. (Бертуланфі, 1962) у вивченні динаміки популяцій уперше продемонстрували можливість розвитку концептуальних статистичних моделей для такого процесу, як конкуренція, які можуть бути емпірично перевірені. Потрібно особливо підкреслити, що і в динаміці популяцій, і в біотичній конкуренції, і в економетрії, і в дослідженні змагання озброєнь тощо – використані однакові за математичною сутністю рівняння. Системне порівняння і дослі-

дження цих паралелізмів є цікавим і корисним, оскільки можна, наприклад, припустити, що закони, які управляють циклами економічного життя, і закони коливань популяції (за Вольтеррою) породжені подібними умовами конкуренції і взаємодії у системі.



Взаємодія, як одна із форм **взаємовідношень**, поряд із протидією та конкуренцією систем, є в природі несвідомою і спонтанною (тварини, рослини, мікроорганізми тощо) і свідомою у стосунках між людьми і людськими соціумами.

Як писав Ernst Haeckel (1866), як органічні (біотичні – **П.Г.** і **О.С.**) умови існування він розглядав всі відносини організму з усіма іншими організмами, з якими він вступає в контакт і які найбільше сприяють або його користі, або шкоді. Кожен організм має серед інших організмів своїх друзів і ворогів, тих, які сприяють його існуванню, і тих, які йому шкодять. Організми, які служать органічною їжею для інших або живуть на них як паразити, також належать тих, які вступають у взаємовідношення (біотичні – **П.Г.** і **О.С.**).

Отже, системне розуміння спільної природи зовнішніх взаємодій дає змогу чітко розрізнити поняття антропосоціальної (свідомої) боротьби і природної (несвідомої) конкуренції.

6.3. Суть розвитку й саморозвитку

Розвиток є загадковим явищем Всесвіту. Філософія трактує розвиток як саморух від простого до складного й нового, або зміни матеріальних та ідеальних систем, які означають виникнення нової якості. За діалектикою, розвиток – це єдність еволюцій і революцій (у природі – катастроф). Еволюційний і революційний прогрес у природі неминучий і всюдисущий, у науці й мистецтві – бажаний. Але поєднання обох складових, із катастрофічною включно, у процесі розвитку людського довкілля й економіки – це небажане явище. Водночас, загальноновживаним є поняття еволюції як процесу поступового розвитку (на противагу революції – стрибкоподібного розвитку).



Розвиток, як загальнонаукове поняття, означає всеосяжний процес кількісних і якісних змін у матерії і свідомості. Розвиток, як зміни в системі – це кількісне її зростання, просторове переміщення чи розгортання, збільшення масштабів, збільшення складності, якісні зміни, прогрес або регрес, поліпшення пристосованості тощо.

Варіанти розвитку можуть призвести до появи нових елементів, нових функцій, диференціації систем.

Будь-який розвиток повинен мати джерело (зовнішні або внутрішні причини) і механізм розвитку. Як тривалий у часі процес, розвиток має певні шаблі (етапи, стадії, періоди), котрі загалом реалізуються **життєвим циклом**:

- 1) появу, виникнення нового, на початку прихованого в надрах старого, а потім явного;
- 2) відрізок інтенсивного кількісного зростання;
- 3) час якісного перетворення;
- 4) зріле функціонування;
- 5) настання регресивних змін;
- 6) розладнання системи та її зникнення (рис. 6.3).

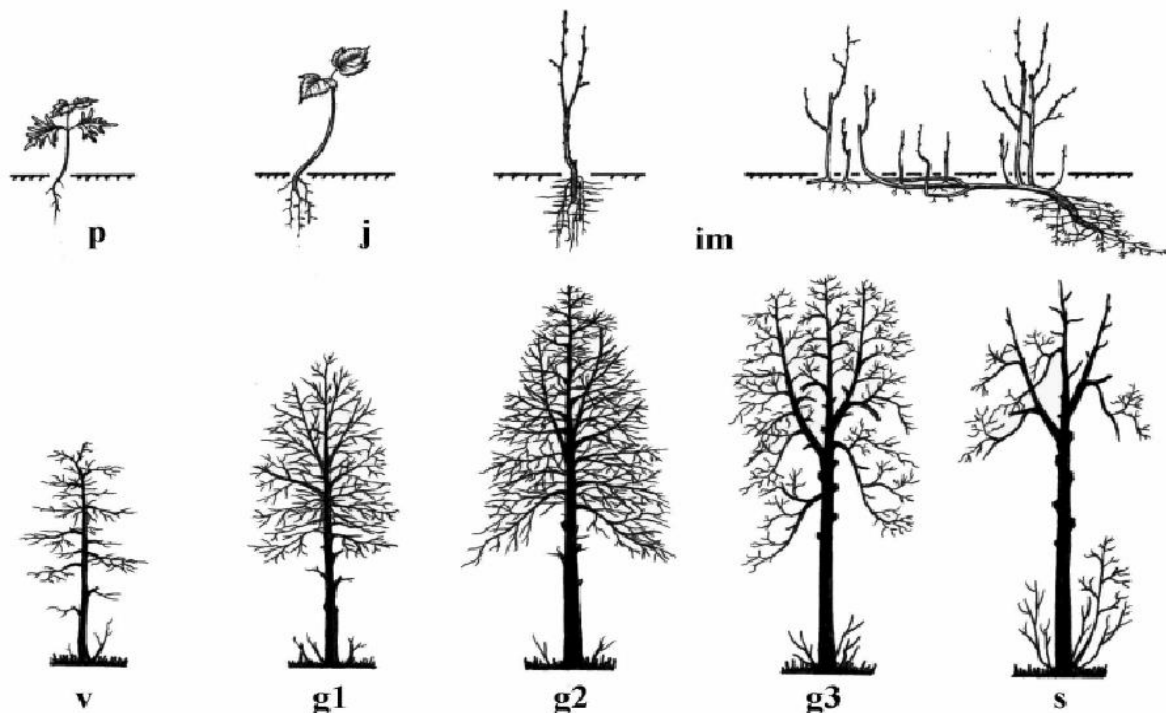


Рис. 6.3. Схема онтогенетичного розвитку (життєвого циклу) липи серцелистої (Tilia cordata Mill.).

Фази розвитку: *p* – проросток; *j* – ювенільна; *im* – імагурна; *v* – віргінільна; *g1, g2, g3* – генеративна; *s* – сінільна

Розвиток системи має початок і кінець, але загальний процес розвитку має спіралеподібну форму. Адже будь-яка система не щезає нікуди, а переходить у формі своїх колишніх елементів у нову систему. Розвиток – іманентне (внутрішньоприродне) явище, тому що кожній матеріальній системі властиві задатки до її кількісних і якісних змін.



Розвиток плине нерівномірно й гетерохронно (асинхронність фаз розвитку окремих елементів і функцій системи), може бути стійким і нестійким, кумулятивним, дивергентним або конвергентним.

Процес розвитку Всесвіту, як цілого або його частин, триває переважно еволюційним шляхом. Виняток становили епізодичні космогенні й геологічні катастрофи на Землі, що спричиняли стрибкоподібні зміни у земних системах. У біології еволюція означає зміни спадкових якостей популяцій організмів упродовж кількох поколінь завдяки двом властивостям живого – мінливості й спадковості, а також доборові в процесі конкурування. Біотична еволюція мала найбільші хвилі якраз у періоди згаданих потужних геокосмічних змін на Землі та найповільніше триває у періоди відносного спокою. У сучасній теорії систем завдяки стрімкому поступу біології велику увагу приділяють саморозвитку систем.



Саморозвиток – це явище розгортання кількісних і якісних змін системи за рахунок внутрішніх власних ресурсів і властивостей, відповідно до власної природи. Він реалізується завдяки власним механізмам: 1) спрямування (націлення), 2) самоорганізація, 3) саморегуляція.

6.4. Системна криза, зникнення системи й хаос

Старіння і кризу розглядають як закономірні відтинки розвитку системи, які формуються ще на попередніх його етапах.



Криза є ослабленням життєвих сил системи, її не здатністю далі зберігати стан рівноваги, досягати поставлених раніше цілей. Коли система стає недієздатною, вона зникає.

Окремі її підсистеми і елементи відхиляються від мети, вибирають свої цілі або живуть безцільно, спричиняючи безлад, втрачають роль природної опори для системи. Смерть людини настає тоді, коли безповоротно втрачає свою функціональну здатність її центральна система керування організмом – мозок. Тоді зникає самоусвідомлення і втрачається свідомість (стан коми). До цього відмова жодних інших систем чи органів не може означати загибель організму. Адже навіть у здоровому тілі смерть присутня постійно, це – і відмирання органел (наприклад, мітохондрій) у клітинах, і цілих клітин (еритроцитів та ін.), і тканин (епідермісу).

Аналогічну системну природу мають і екокризи, і соціальні кризи.

Екокриза має як локальні, так і глобальні ознаки. Повсюдно зруйновані природні ландшафти, знищена природна рослинність і тваринний світ, освоєні та подекуди виснажені родючі ґрунти, забруднені світовий океан, материкові води, повітря і харчові продукти. Можна було би це все якось виправдати, якщо б у світі панували добробут, ситість і процвітання, але маємо зворотній ефект. До зубожіння, голоду, хвороб та агресивності додалися проблеми стрімкого погіршення якості довкілля і загальнопланетні аномальні коливання погоди (явище Ель-Ніньйо тощо), тенденція глобального потепління.

Соціальні кризи теж не виникають із нічого, а системно зароджуються у суспільному організмі цивілізації. Спочатку на рівні індивідуумів виникають особисті проблеми (збагачення, моралі, психології, культури тощо), згодом це переноситься на сім'ї, на колективи, трансформується в економічні й соціальні проблеми на компанії, установи, заклади, органи і, зрештою, на все суспільство й держави. Наприклад, апатія та інертність працівників, відсутність інноваційного мислення персоналу фірми неминуче призводить до падіння результативності в роботі, до помилок в управлінні системою, до структурних порушень, економічних втрат і, врешті-решт, до ланцюгової реакції банкрутств, яка передається по висхідній. Апатія та інертність громадянського суспільства створює умови для заволодіння владою маргінальних політичних партій, кланів, релігійних течій.

Суспільство в стані кризи може зазнати змін і революційного змісту, коли розвалюються нефункціональні суспільні інституції, моральні й духовні принципи його існування, системи економічного й політичного керування. Передреволюційна криза й революційні зміни можуть призвести до громадянської війни (як це сталося 1917 року в Російській імперії) і тривати дуже довго, доки суспільство не віднайде стабілізаційну (системотвірну) мету для переходу на поступальний розвиток. У радянському суспільстві це тривало від 1917 до 1991 року. Проте, суверенна Українська Держава, як елемент зруйнованої надсистеми Радянського Союзу, все українське суспільство і досі перебуває у фазі болючого становлення, запровадження системотвірних моральних і духовних принципів, національної ідеї та розвитку громадянського суспільства.

Стосовно соціальних систем Міжнародною комісією ООН із довкілля і розвитку був запропонований термін "**сталий розвиток**". Насправді, це є категорія загальної теорії систем, яка стосується систем будь-якої природи.

Стійкість і нестійкість є двома сторонами процесу розвитку. Будь-який розвиток – це чергування і взаємодія стійкості й нестійкості. Чим вища та складніша мета, яка визначена для системи, тим вірогідніше виникнення ситуацій її залежності від чинників довкілля. У такому разі система постійно переживає втрату поступовості, вона віддаляється від вихідної точки рівноваги, прагнучи знайти нову точку рівноваги.



Для суспільних явищ все-таки бажанішими є уникнення поєднання обох складових розвитку – еволюційної та революційної, із катастрофічною включно стосовно довкілля й економіки. Людству потрібна лише прогресотвірна еволюційна складова, безпечна екоеволюція. Саме екоеволюційні складові розвитку, а не пропагований і невизначений за сутністю сталий розвиток, мають бути суспільно підтриманими у середовищі життєдіяльності людини на Землі (Пашенко, 2005). Оскільки розвиток є безповоротним, спрямованим закономірним переходом певної системи з одного стану в інший, що відрізняється від попереднього збільшеннями або зменшеннями деяких параметрів, то стійкий розвиток є результатом стійкості системи і стійкості її процесів у змінному довкіллі. При цьому стійкість системи поєднує її структурно-організаційну і функціональну стійкості.



Стійкість системи – здатність її повертатися у стан рівноваги, який є найсприятливішим для виконання системою функцій після дії на неї яких-небудь зовнішніх чинників. Стійкість процесу – це властивість функції так використовувати зовнішні чинники впливу, що система повертається у своєму відхиленні від траєкторії на ту ж траєкторію.



Стійкість розвитку необхідно розглядати як послідовну прогнозовану, з високою мірою вірогідності, зміну станів системи, її здатність протидіяти несприятливим зовнішнім впливам.

Фінальним явищем у процесі розвитку є руйнування системи, зниження впорядкованості й організованості аж до виникнення хаосу – **сутнісного безладу**. **Хаос** – це не втрата об'єкта, а балансування на грані між буттям і небуттям.

Хаос створює розкутість жорстких структур, отримання елементами системи більшої, можливо й максимальної свободи, що зрештою є головною умовою природного започаткування нової якості. Отже хаос – це одночасно і стан, і процес.

Як стверджує Д. Медоуз (2011), якщо систему зруйновано доценту, але рушійна сила, яка створила її, нікуди не зникла, то ця сила знову створить ще одну таку ж систему. Якщо в результаті революції уряд скинуто, але громадська думка і структури, що привели його до влади, залишилися колишніми, то історія неминує повторитися (Медоуз, 2011). Як вважав Р. Ейкофф (1979), особи, які приймають рішення, мають справу не з окре-



ними, незалежними одна від іншої проблемами, а з мінливою ситуацією, в якій складні поєднання проблем змінюються, взаємодіють і впливають одна на одну. Це і є безлад за сутністю.



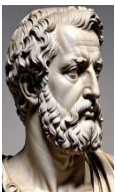
Очільники, які приймають розумне рішення, не створюючи якісно нової та ефективнішої системи, не вирішують проблеми, вони лише намагаються керувати безладом.

Значний доробок у розуміння безладу вніс І. Пригожин (2003), який обґрунтував оригінальну концепцію хаосу на прикладі аналізу організації фізико-хімічних систем.



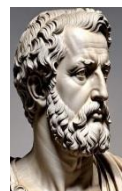
7.1. Чинники й механізми еволюційної самоорганізації живих систем

На сучасному світоглядному рівні співіснують дві основні філософські позиції щодо виникнення, розвитку й майбутнього Всесвіту. Найраніше сформувалося ідеалістичне світосприйняття і трактування походження всього сущого.



Ідеалізм (гр. ἰδέα – ідея) – категорія філософського дискурсу, що характеризує світогляд, який або отожднює світ в цілому зі змістом свідомості суб'єкта, котрий пізнає (суб'єктивний ідеалізм), або стверджує існування ідеального, духовного начала поза і незалежно від людської свідомості (об'єктивний ідеалізм), а зовнішній світ вважає проявом духовного буття, універсальної свідомості, абсолюту.

Послідовний об'єктивний ідеалізм бачить в цьому початку первинне по відношенню до світу і речей. Існує багато теорій із різними уявленнями про час акту творіння та неоднозначним ставленням до сучасних наукових поглядів на космічну, геоматичну й біотичну еволюцію. Такі погляди загалом об'єднують в одну концепцію:



Креаціонізм – світосприймання та вчення, згідно з якими Світ, різні форми життя на Землі й сама людина створені вищою, надприродною силою.

Відповідно до релігійних та етнокультурних традицій у різних людських спільнот є власні бачення способів завершення того чи іншого "буття" – загального й індивідуального земного.

Пошук першопочатку тривав упродовж усієї історії людства. Поштовхом до нього було притаманне людині бажання шукати причину всього, що творилося навколо неї, зрозуміти свою долю та долю світу.

Мінлива дійсність, її плинність і нестабільність породжували думки про існування іншої реальності – сталої, самодостатньої, базової стосовно видимого світу. Так виникло *матеріалістичне світосприйняття*.



Матеріалізм (лат. *materialis* – речовий) – один із двох головних філософських напрямів, який вирішує основне питання філософії на користь первинності матерії, природи, буття, фізичного, об'єктивного і розглядає свідомість і мислення як властивість матерії.

Теорія "великого вибуху" у матеріалістичному світобаченні слугує відправним пунктом у побудові інших наукових моделей: походження галактик, народження й життя зірок, утворення планетних систем тощо. Водночас, підстав вважати, що ніби *нежива матерія* колись спонтанно ускладнювалася, немає.

Загальновідомою й універсальною є протилежна тенденція до спрощення – це другий закон термодинаміки, з якого слідує, що панує спрямованість до ентропії, а з іншого боку – очевидне незбільшення упорядкованості у замкнених системах. Якщо ж припускати, що матерія до певного часу ускладнювалася, то виникає запитання: чому потім вона почала спрощуватися? Вірогідно, ускладнення призводило до нових емерджентних властивостей спочатку нових надсистем, а потім – до критичного стану метасистеми.

Виникає також інше питання: чи хаос може породити порядок?

Причинно-наслідковий ланцюжок ускладнення світу можна пояснити внутрішньою природою простих елементів, яка спонукає їх до "згуртування", "взаємодії" й утворення складніших систем. І тут мимоволі й матеріалісти наштовхуються на таємну природну "першопричину", завершеного наукового пояснення якій досі немає.

Чому немає? Тому, що на сьогодні є лише такий, а не глибший рівень знань про світ. Завтра він буде вже інший, як і наш Всесвіт.

Отож, чи можна говорити про Всесвіт як про непередбачуване утворення? Невже настільки складні структури виникають самі собою, довільно? Науковці-матеріалісти відповідають на це запитання ствердно. Вірогідно, що наш Всесвіт – не єдиний. У просторі, судячи з уявлень сучасної космології, панує вакуум великої, можливо, безкінечної розмірності. У ньому, можливо, виникають найрізноманітніші світи з різними розмірностями, наборами взаємодій між частками, різними числовими значеннями фундаментальних констант.

7.2. Чинники й алгоритм самозбирання систем

Загалом визнано, що самозбирання складних систем вірогідне, але важливо уявляти собі конкретну міру певної можливості для конкретної системи. Імовірність самозбирання стрімко зменшується зі збільшенням рівня складності системи, а також нестабільності зовнішнього для них середовища. То ж для оцінки *механізмів самозбирання* Всесвіту від еукаріота до екосистеми з'ясуємо рівень його складності.

Властивість самоорганізовуватися у систему виявлена вже на рівні найменших, відомих людині *елементарних частинок*, із яких утворені більші частинки й атоми. Із пари "кварк–антикварк" виникають мезони, далі відбувається самозбирання протонів, нейтронів та електронів із утворенням атомів. Стійкі системи – *атоми* мають властивість до самозбирання у стійкі структури, зокрема, при формуванні *кристалів* за допомогою зв'язків чотирьох основних типів: іонних, ковалентних, металічних і міжмолекулярних.

Отже, самозбирання детерміноване внутрішньою природою матеріальних тіл і відбувається самочинно. Амінокислотний ланцюг – це всього лиш велика органічна молекула і ще не біологічно активний білок. Полінуклеотидний ланцюг також ще не є хромосомою. Утворення з лінійної амінокислотної послідовності тривимірної структури – активного білка, відбувається завдяки закладеній у самому поліпептидному ланцюзі потенційній енергії, яка реалізується у здатності до функціональної самоорганізації. Це є зумовлений і автоматичний результат прагнення довколишніх молекул води (що просторово "прив'язані" до макромолекули – *П.Г.* і *О.С.*) до стану з максимальною ентропією і прагнення поліпептидного ланцюга до стану з мінімальною вільною енергією. Така зміна конформації не залежить від якої-небудь зовнішньої дії, якщо вона, звичайно, не цілеспрямована на руйнування процесу.

Тож самозбирання – детермінований і самочинний механізм. Причини цього явища – у фізико-хімічних властивостях компонентів макромолекул і клітинної води. Тому й органічні системи будують самі себе із середини, використовуючи зовнішній матеріал і стабільні умови. Термін "самозбирання" запропонували вперше саме біохіміки для опису *здатності макромолекул до спонтанної асоціації*. Спочатку було встановлено, що інформація, закладена в амінокислотній послідовності поліпептидного ланцюга, може перетворюватися в стереохімічну інформацію про третинну структуру; перетворення відбувається шляхом згортання ланцюга з утворенням глобулярної біологічно активної конформації. Це перетворення зумовлене фізико-хімічними властивостями самих молекул. Неза-

баром з'ясувалося, що здатність до самозбирання властива й іншим макромолекулам і цілим клітинним органелам.

Серед макромолекул найдокладніше самозбирання вивчене на білках, особливо на ферментах. Фермент аспартаттранскарбамоїлаза з *Escherichia coli* збудований із шести каталітичних і шести регуляторних поліпептидних ланцюгів. Для спостереження за процесом самозбирання здійснюють дисоціацію молекули на ці дванадцять ланцюгів. Після початку досліду реконструкція ферменту з цих ланок відбувається упродовж кількох секунд.

Білок актин поширений в еукаріот. Його ідентифікували в клітинах найпростіших, дріжджів, плісневих грибів, рослин, тварин, включаючи й людину. Первинна структура актину в еволюційному сенсі дуже консервативна. Він асоціюється у нитки, що є в складі м'язових волокон. Його самозбирання відбувається у присутності Mg^{++} і АТФ при фізіологічних значеннях іонної сили. У цих умовах глобулярні мономер актину утворюють специфічні спіральні нитки фібрилярного полімерного актину. Збірка, що ініціюється у специфічних центрах, дає впорядковані структури, певним чином розташовані в клітині. До самозбирання здатний і міозин, що володіє ферментативною активністю, основний білок скоротливої системи м'язів. У відповідних умовах молекули міозину спонтанно асоціюються в упорядковані ниткоподібні структури (Marth et al., 2015).

Вчені передбачали можливість **самозбирання вірусних організмів** з їхніх компонентів – нуклеїнових кислот і білків. Згодом удалося змоделювати в лабораторії таке самозбирання вірусу тютюнової мозаїки. Воно починалося відразу після змішування виділених РНК та білка за відповідного *pH* і утворені вірусні частки були повністю інфекційні й автентичні до вихідного вірусу. Самозбирання в розчині відбулося спонтанно, жодних додаткових молекулярних компонентів не було потрібно. Такі ж результати були отримані в дослідях зі самозбирання інших вірусів, наприклад бактеріофагів.

Шляхом самозбирання були **реконструйовані нуклеосоми** – основні складові хромосом еукаріот. Ці сферичні частки можна отримати *in vitro* з їх компонентів – очищеної ДНК і виділених чотирьох гістонів, причому незалежно від клітинного походження ДНК й гістонів. Стереохімічна інформація про просторове розташування, яка необхідна для взаємодій "гістон–гістон" і "гістон–ДНК", міститься у самих гістонах і ДНК. Отже, цей дуже важливий компонент еукаріотичної хромосоми має фізико-хімічну інформацію, що детермінує її самозбирання. Це свідчить про автокаталізацію явища, властиву структурі хромосоми.

З усіх клітинних органел найдетальніше вивчене **самозбирання рибосом** (Pilla et al., 2019). Виділені РНК всіх трьох видів та очищена більшість білків. Із суміші очищених молекулярних компонентів може здійснитися самозбирання функціонально активних рибосом бактерій. Уся інформація



про цей процес міститься у структурі молекул компонентів. Збірка білків іде в певній послідовності, додавання якого-небудь одного білка прискорює включення наступного, тобто має місце молекулярний каскадний ефект.

Встановлено, що амінокислоти здатні самовільно з'єднуватися у поліпептидні ланцюги із закономірною послідовністю. Це відкриття, яке має вирішальне значення для розуміння механізму виникнення впорядкованих реакцій, показує, що в еволюції існує самообмеження. Для функціональної протеїноїдної протоклітини не потрібні ні нуклеїнові кислоти, ні фосфоліпіди. Протеїноїди, багаті основними амінокислотами, здатні за відсутності ферментів каталізувати синтез пептидів, використовуючи енергію АТФ і пірофосфату. Вони каталізують також синтез полінуклеотидів. Поліпептиди з молярною масою 10 тис. і більше можна отримати за допомогою термічної полімеризації. Протеїноїдні мікросфери утворюються в астрономічних кількостях із дивною легкістю і відразу виявляють багато несподіваних властивостей.

Протоклітини, що складаються з основних і кислих протеїноідів, володіють каталітичною активністю. Термічні пептиди, багаті основними амінокислотами, каталізують деякі реакції синтезу, а також здатні до спонтанної збірки, тобто мають структурні і молекулярні пристосування, що дають змогу їм упізнавати один одного й асоціюватися специфічним чином. Процес самозбирання клітин, як і молекул, у принципі виключає хаотичність при відповідних взаємодіях.

У результаті накопичення емерджентних властивостей щоразу нових складних систем субклітинного й клітинного рівня виникають зовсім не хаотичні, а строго впорядковані й відлагоджені **механізми формування органів** у рослин і тварин (Ober, Lemaigre, 2018).

Міжклітинне самозбирання охоплює подальші процеси: 1) міжклітинну комунікацію; 2) взаємне розпізнавання клітин; 3) клітинну адгезію (рух на зближення).

Як же встановлюється міжклітинна комунікація?

У деяких видів амеб існують дві фази життя – фаза окремих самостійних клітин і фаза, в якій вони агрегують, утворюючи слизоподібну масу на кшталт багатоклітинного організму. Ця друга фаза пов'язана з дефіцитом корму – бактерій, якими вони харчуються. У цих умовах амеби секретують речовину – акразин, рецептори якої є на їхній поверхні (Soll, 1987). Акразин у *Dictyosfelium* – це циклічний аденозинмонофосфат (АМФ), а в *Polysphondylium* – дипептид глутамінової кислоти й орнітину. Дифундуючи від однієї клітини або від групи клітин, ці прості сполуки інформують інші клітини й орієнтують їх по дифузійному градієнту концентрації. Цей сигнал проковує амеби пересуватися й агрегувати. Індукує появу початкових форм ніжки і спороносного тіла в *Dictyostelium* складний гексанон, що належить до нового класу хімічних посередників і функціонує у

сполученні із циклічним АМФ (Morris et al., 1987). Цей комплекс бере участь у багатьох реакціях передачі сигналів – гормональних і нервових, з-поміж іншого і в організмі людини. Функції медіаторів у нервовій системі виконують невеликі пептиди (Bonner, 1983). Отже, для міжклітинної комунікації і в найпростіших, і в людини певним чином використовуються ідентичні або подібні молекули. Це вказує на універсальність явища первинного міжклітинного самозбирання.

Мозок людини утворений кількома мільярдами нервових клітин. Клітинне розпізнавання є необхідним механізмом, що дає змогу окремим ембріональним нейронам знаходити й упізнавати один одного з тим, щоби з'єднуючись, утворити специфічну структуру нервової мережі. Ембріональні нервові волокна мають конус росту, від якого відходять філоподії. Вони можуть витягуватися, втягуватися і вступати в контакти з сусідніми нейронами. За допомогою барвників і молекулярних міток встановлено, що ниткоподібні філоподії, які виходять із кінчика конуса росту, вступають у контакт лише з нейронами певного типу, уникаючи інших. При цьому філоподії можуть обстежувати поверхні приблизно ста нервових клітин різних типів, але з'єднуються лише з одним із них. Вибірковість процесу розпізнавання простежена і на прикладі амеб. Якщо змішати особини, що належать до двох різних родів, то агрегувати організми будуть не хаотично, а лише із представниками свого роду, не реагуючи на інших.

Вагому роль у самоорганізації органічних біотичних структур (формуванні або мофогенезі) має клітинна адгезія, яка відбувається завдяки їхньому індивідуальному переміщенню, регульованому, своєю чергою, специфічними й активними у різні фази розвитку, білковими молекулами.

Про єдину природу самоорганізації свідчить і **міжклітинне самозбирання**, в результаті якого утворюються тканини, оскільки і це явище подібне на осадження кристалів із розчину. Лише наприкінці ХХ ст. учені зуміли дисоціювати тканини на окремі клітинки шляхом дезінтеграції в'язкої цементувальної "основної" речовини, що зв'язує тваринні клітини. Цей міжклітинний "клей" розчинили дією трипсину у присутності кальційзв'язувального реагента. З іншого боку, були зроблені спроби здійснити зворотній процес – реконструювати тканини з окремих клітин.

В умовах, сприятливих для відновлення тканини з ізольованих ембріональних клітин нирки курки, цей процес **самозбирання тканинної системи** описаний вже давно (Moscona, 1959) і проходить через такі етапи:

- 1) активний рух клітин;
- 2) утворення плівки з позаклітинного клейкого матеріалу;
- 3) поступове збирання клітин у групи;
- 4) утворення сполучних містків;



5) за допомогою сполучних містків формуються більші агрегати зі специфічною структурою – тканини;

6) самоорганізуються ниркові каналці зі секреторною активністю.

Отже, індивідуальні клітини здатні до самозбирання і, не отримуючи жодної інформації ззовні, реконструюють тканинну систему із вихідною її організацією і функцією. Як вказує А. Москона, клітини агрегують у згустки тканини "подібно до кристалів, що випадають в осад з розчину". Так само і клітини печінки збираються в структури, ідентичні часточкам нормальної печінки, які здатні акумулювати глікоген. Агрегують і клітини серцевого м'яза, утворюючи тканину, яка ритмічно скорочується. Клітини з різних органів і організмів, знаходячись у суміші, здатні розпізнавати одна одну й організовуватися в окремі органи. У суміші клітин хряща миші та нирок курки клітини групуються так, що з клітин миші відновлюється хрящ, а з клітин курки – ниркові каналці. Клітини в суміші, як і атоми, не дезорієнтовані. Завдяки своїй молекулярній специфічності вони відтворюють лише властиву для них стійку системну структуру.

Для впорядкування взаємодій між компонентами у живій природі активно задіяна міжклітинна хімічна сигналізація (Ventura et al. 2024). Еволюція багатоклітинних організмів визначалася здатністю клітин до взаємного обміну інформацією. Міжклітинна комунікація необхідна для того, щоби регулювати розвиток клітин, їх організацію в тканині, їхній ріст і ділення, щоби координувати різні типи активності. Хімічна сигналізація є основним процесом в еволюції, тому що без неї неможливе існування багатоклітинних організмів. Це означає, що значною мірою спрямовували еволюційні зміни саме ті хімічні агенти, які виконують функцію сигналів.

Перетворення, які мали місце в ході еволюції, частково стали наслідком змін і самих сигнальних речовин: їх конформації, їх клітин-мішеней, здатності їхньої взаємодії із внутрішньоклітинними механізмами. Переважно сигнальні молекули не є великими білками. Деякі з них – невеликі білки (наприклад, соматостатин, що складений усього з 14 амінокислотних залишків), або малі пептиди (наприклад, енкефалін, 5 амінокислотних залишків); інші є невеликими стероїдами.

Хімічні агенти, що забезпечують міжклітинні контакти, називають першими посередниками. Вони належать до однієї з трьох груп:

1) локальні хімічні медіатори, які діють на клітини, що безпосередньо оточують джерело сигналів;

2) гормони, які секретують спеціалізовані ендокринні клітини і котрі поширюються по кровоносних судинах; вони взаємодіють із клітинами-мішенями, розподіленими по всьому тілу;

3) нейротрансмітери, які секретують нервові клітини; вони є близькодійсними хімічними медіаторами, адресованими лише сусідній клітині-мішені.

У рослин немає нервових клітин, але удосталь містяться речовини, які служать нейротрансмітерами у тварин. В апельсинах знайдений норадреналін, а в бананах – серотонін. Клітини організму реагують на екстраклітинні сигнали за допомогою особливих білків – рецепторів, що зв'язують сигнальні молекули.

Чинники росту, гормони, нейротрансмітери зв'язуються на поверхні клітин-мішеней із спеціалізованими рецепторними білками, які при цьому змінюють свою конформацію. У результаті цієї зміни генерується внутрішньоклітинний молекулярний так званий другий посередник – нова або така, що звільняється молекула. Основними другими посередниками є циклічний АМФ та іон кальцію. Внутрішньоклітинним рецептором іонів кальцію є білок кальмодулін, поширений у тварин (від простих до ссавців) і рослин, нижчих і вищих. Аналіз амінокислотної послідовності свідчить про його філогенетичну консервативність. Згідно з численними даними, іон кальцію за всіма показниками відповідає функції універсального другого посередника як у тварин, так і в рослин та відіграє навіть важливішу роль, ніж циклічний АМФ.

Найзагадковішим залишається найскладніше для вивчення явище – **самозбирання органів та організмів** (Ober and Lemaigre, 2018). Сучасні дані про механізми утворення органів та організмів свідчать, що самозбирання відбувається строго визначеними шляхами, які задаються реакціями міжмолекулярного розпізнавання елементів майбутніх органів і тканин. Експерименти для виявлення цих шляхів виконували вже від початку ХХ ст., проте їх досі описують як процес аглютинації, ніяк не пов'язуючи з питанням еволюції живого. Лише тепер відновлення організму гідри, губки або венозних судин людини із їх складових клітин почали розглядати як наступний – органний рівень явища самозбирання, яке ґрунтується на універсальному атомному і молекулярному саморозпізнаваннях.

Відомі незаперечні приклади самозбирання органів і організмів. Морська губка отримує інформацію про структурну будову власного організму зі своїх же клітин. Розрізнені й перемішані до хаотичного стану після того, як тіло продавлене через тонке сито, ці ж клітини й використовують заховані в них ідентифікаційні сигнали для самозбирання. Клітини осідають на дно посудини і починають агрегувати, здійснюючи амебоїдні рухи. Через чотири дні формується цілісна губка із каналами і жгутиковими камерами. Вдалося виділити "відповідальну" за самозбирання речовину з молярною масою 23 000. Вона видоспецифічна, як і в амеб (Muller et al., 1976).

Яскравим прикладом самозбирання розрізнених клітин у цілісний організм є досліди з гідрою. Тіло цих тварин легко дезагрегувати, кілька



разів переносячи його в концентрований сольовий розчин, а потім, пропустивши через фільтри, отримати окремі клітини. У відповідному середовищі самовільно починається розпізнавання і самозбирання цих же клітин, і на другу добу формуються гідри зі щупальцями – абсолютно повноцінні особини. Кожен організм складається приблизно зі 100 тис. клітин, причому деякі з них високодиференційовані. Жалкі клітини (з їх допомогою гідра атакує й убиває здобич) вважають одними із найскладніших зі всіх відомих біологам. Отже, тварина з її нервовою системою і складними органами може повністю відновитися із розрізнених клітин шляхом самоорганізації.

Аналогічне за сутністю явище самозбирання спостерігаємо й на органах ссавців. Із гонад новонароджених щурів за допомогою дезагрегації отримували суспензію окремих клітин, і у відповідних умовах клітини сім'яника і яєчника знову самоорганізовувалися у відповідні структури (Zenzes et al., 1978; Ohno et al., 1978). Клітини з культур ендотелію капілярів людини, що перевиваються, також здатні *in vitro* збиратися у мережу трубчастих структур, майже ідентичних (під світловим та електронним мікроскопами) щодо судинного русла капілярів *in vivo* (Folkman & Haudenschild, 1980). Шляхом самозбирання ізольованих клітин вже отримана тканина шкіри людини (Dubertret et al., 1987).

Очевидно, що інформація, потрібна для формування або зміни органу й організму, міститься переважно в молекулярній структурі окремо взятих клітин. Процес організації йде під дією специфічних хімічних речовин, які виділяють самі клітини і за допомогою молекул, що забезпечують спонтанну строго специфічну адгезію.

Отже, якщо у фізиці давно відома спонтанна властивість елементарних частинок з'єднуватися та утворювати інші частинки й атоми, а об'єднання протонів, нейтронів і електронів в атоми є звичним природним процесом, у біології це стає очевидним лише сьогодні. Адже те ж саме, вірогідно, властиво й організмам і угрупованням. Спонтанну асоціацію клітин і формування організму раніше описували як явище "клітинної агрегації". Утім, ще й досі біологи неохоче погоджуються з тим, що тварини самі збираються в угруповання за допомогою фізичних і хімічних інформаційних сигналів. Є така наукова гіпотеза, що і людською суспільною поведінкою керують універсальні хімічні сигнали. Очевидним стає всюдиусуще явище самозбирання менших систем у більші на основні глибинних базових властивостей складників цих систем на всіх рівнях, від елементарних часток до людської спільноти. Тому енергодетермінований феномен схильності до самозбирання (Hemsley et al., 1994; Korlepara et al. 2019) поширюється на всі рівні організації – від первинної матерії до людських систем.

Проте підсумуємо, що все-таки



термін "**самозбирання**" був запропонований біохіміками для опису здатності макромолекул до спонтанної асоціації. Спочатку вчені встановили, що інформація, закладена в амінокислотній послідовності поліпептидного ланцюга, може перетворюватися у стереохімічну інформацію про третинну структуру. Перетворення відбувається шляхом згортання ланцюга з утворенням глобулярної біоактивної конформації. Це перетворення зумовлене суто фізико-хімічними властивостями самих молекул. Лише згодом з'ясувалося, що здатність до самозбирання властива й іншим макромолекулам, цілим клітинним органелам і т.д., аж до цілісного організму чи колонії.

Такий докладний аналіз фундаментальних біотичних процесів підтверджує, що в живій природі всі явища відбуваються системно, а значить і впорядковано. У живій природі немає місця випадковості й хаосу, вони лише можуть вважатися таким у наслідок нашого нерозуміння певної системи, або браку знань про системні процеси. Досі загадковими залишаються системна природа явищ видоутворення, виникнення свідомості, соціальних людських спільнот.

Проте, футуристичні прогнози розвитку науки і технологій сьогодні передбачають, що різниця між віртуальною реальністю і тим, що тепер називають "реальним світом", до 2050 року повністю зітреться. Розвиток технічних систем "доповненої реальності" дозволить практично всі фізичні об'єкти перевести в режим керованого виконання самозбірки або самозміни своїх властивостей. У цьому немає нічого несподіваного, адже лише навчаючись у живої природи способом самоорганізації людина може "вписатися" в еволюційний шлях свого розвитку без катаклізмів, криз і катастроф.

7.3. Організація і складність екосистем та аграрних продукційних систем

В екосистемі живі організми, їхнє живе оточення і неживе (абіотичне) середовище пов'язані між собою та перебувають у постійній взаємодії.

Е. Геккель (1866) писав, що



... Фізіологія значною мірою знехтувала зв'язками організму з навколишнім середовищем, місцем, яке кожен організм займає в лоні природи, в економіці природи...



Біотичною частиною системи є біоценоз, або біотичне угруповання, тобто сукупність живих організмів, що мешкають на одній території (акваторії), пов'язаних між собою трофічними й іншими зв'язками, і беруть участь у загальних процесах самовідтворення. Зокрема, розрізняють "фітоценоз" (угруповання рослин), "зооценоз" (угруповання тварин) і "мікробоценоз" (угруповання мікроорганізмів). Всі вони є підпорядкованими складовими підсистемами екосистеми.

Термін "біоценоз" застосовують також для штучних угруповань живих організмів, наприклад, одноклітинних, таких, що вирощує людина з метою виробництва біомаси (дріжджі) або продуктів життєдіяльності цих організмів (пеніцилін) у спеціальних культиваторах. Сукупність культурних рослин в агроекосистемах – це агрофітоценози, поголів'я тварин – агрозооценози, у водному середовищі гідробіоценози – марікультура й аквакультура водоростей, молюсків, риб та інших організмів. Мета їх культивування – отримання білкової й іншої харчової продукції.



Біогеоценоз – це екосистема, якою є ділянка суходолу або донної земної поверхні водойми, де тривалий період біоценоз (фітоценоз, зооценоз, мікробоценоз – біо-) та освоєні частини атмосфери, літосфери, гідросфери і педосфери (**-гео-**), залишаються однорідними, постійно зв'язаними між собою однотипними взаємовідношеннями, тому сукупно створюють єдиний, внутрішньо зумовлений комплекс (**-ценоз**).

Клімату та атмосферним умовам у системі належить не лише роль джерела енергії (світла, тепла) і речовин (повітряної вологи, вуглецю тощо), але й роль інформаційного чинника, який частково керує процесом (D'Odorico, Laio & Ridolfi, 2006). Відомо, наприклад, наскільки істотно впливає на весь хід розвитку рослин і тварин періодична зміна інтенсивності світла і температури (фото- і термоперіодизм), тривалості добового світлового періоду.

Біотична частина екосистеми з позиції трофічних відношень має два рівні: 1) автотрофний компонент (**продуценти**), до якого належать фото- і хемосинтетики і 2) гетеротрофний, що живиться органічними речовинами, створеними автотрофами. У наземних екосистемах основну частину продукувального блоку становлять зелені рослини, а у водних екосистемах – одноклітинні (фітопланктон) і багатоклітинні водорості. На автотрофному рівні відбувається фіксація світлової енергії та перетворення простих неорганічних речовин у складні органічні сполуки.

До гетеротрофної частини біоценозів належать макроконсументи (або просто консументи) – хижаки різного рівня. Вони харчуються за рахунок консументів нижчого рівня й мікроконсументів. **Редуценти** – гетеро-

трофні організми, що харчуються відмерлими залишками і продуцентів, і консументів. Редуценти в ході своєї життєдіяльності розкладають високомолекулярні органічні речовини (білки, жири, целюлозу тощо) і вивільняють мінеральні поживні сполуки, які можуть бути знову використані продуцентами. Так замикається кругообіг речовин у біогеосфері.

Природні екосистеми значною мірою перебувають під впливом кліматичних і погодних чинників. Разом із людською діяльністю саме тип клімату, а також гідрологічні й ландшафтні особливості визначають видовий склад і структуру біогеоценозів. Основними кліматичними чинниками є сумарна сонячна радіація і температурний режим, який окрім безпосереднього зв'язку з радіацією, що надходить до земної поверхні, визначається ще морськими течіями і великомасштабними переміщеннями повітряних мас, а також водним режимом, пов'язаним із кількістю опадів і їх розподілом по наземних екосистемах упродовж року.

Під впливом ґрунтово-кліматичних умов на земній поверхні історично виникли й еволюціонували різні рослинні формації (фітоценози). Залежно від антропогенної активності на суходолі досі подекуди залишилися ліси, степи, і водночас збільшилися площі сільськогосподарських угідь, пустель. Змінилася рослинність і тваринний світ океанів і прісноводних водойм.

Сукупно із тваринами (консументами), грибами і бактеріями (редуцентами), які населяють суходіл, рослинний покрив формує мозаїку різноманітних екосистем – від консорцій до біомів, які розрізняють за просторовою структурою і видовим складом, за масштабами, особливостями і швидкостями процесів створення й розкладу органічної речовини, обсягами кругообігу мінеральних сполук.

7.4. Адаптивність агроекосистем та їхніх продукційних живих підсистем

На рівень розвитку, стійкість і перспективу також вказує адаптивність систем. Адаптація має загальнонаукове трактування і вживається для означення різноманітних функцій систем



Адаптивна здатність, за загальною теорією – це можливість системи пристосовуватися у довкіллі без утрати своєї ідентичності. Неадаптивна система не володіє здатністю пристосовуватися і зникає або поглинається адаптивною надсистемою, інтегруючись у неї як новий елемент.

Адаптація у біології, як пристосування будь-якого організму до умов середовища, у науковій літературі має численні визначення із різним

розумінням її сутності, глибини й вагомості. Явища адаптації як форми, й адаптації як функції, на нашу думку, досі не мають завершеного теоретичного обґрунтування. Це спричинено певними суперечностями між дарвіністами, неодарвіністами й автоеволюціоністами у розумінні загальних чинників і наслідків еволюції та розвитку біології як науки загалом у силу історичних причин. Окрім того, лише у не багатьох класиків біології (Пианка, 1981) знаходимо належний акцент на пристосуваннях як предметі дослідження в екології, що свідчить про поступ у системному розумінні процесів.

Зміни організму, зумовлені факторами зовнішнього середовища, є масовими, тобто визначеними для виду загалом у рамках *норми реакції*, тому І. Шмальгаузен назвав їх модифікаціями (1969). Здатність до модифікаційних адаптацій – цілком спадкова, хоча самі модифікації ніяким чином не передаються. Уся сутність і цінність адаптивних модифікацій до змінних факторів середовища – у їх оборотності, тобто якщо б цього не було, то не було б індивідуального пристосування. Такі пристосування виникають у відповідь на зміни середовища, але за відновлення його стану в організмі відбуваються необхідні біохімічні зміни, що призводять до стабілізації функцій на попередньому рівні.

Численні модифікації організмів досі не є науково класифіковані. Зокрема, модифікації, спричинені середовищем життя, можна об'єднати у шість груп:

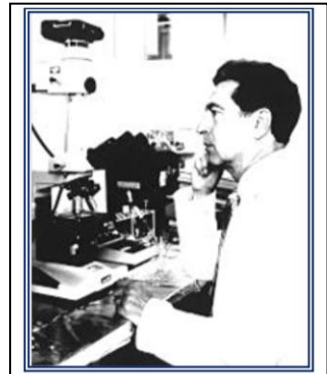
- 1) пов'язані з середовищем (гравітропізм, геліотропізм тощо);
- 2) непов'язані з середовищем (сам механізм фотосинтезу ніяк не залежить від середовища);
- 3) пов'язані з організацією генотипу (добавка хімічних речовин у *поживне середовище* спричиняє ампліфікацію генів у рослинних клітинах);
- 4) непов'язані з організацією генотипу (фізичні й хімічні фактори зумовлюють мутації різних типів, проте зв'язку між їхніми типами не виявлено, хоча мутування – процес упорядкований);
- 5) не спричиняють перманентної модифікації генотипу (фенотипічні модифікації будови організму і його функцій здебільшого не передаються потомству через статеве розмноження);
- 6) зумовлюють модифікацію генотипу (немає цілковитої розмежованості між сомою і клітинами зародкової лінії, що дає змогу генноінженерними маніпуляціями вводити чужі гени в клітини зародкової лінії).

І. Doebley (1993) під адаптаціями розуміють спеціалізовані генетично детерміновані пристосування, що забезпечують нормальний розвиток живих систем в умовах мінливого середовища.

А. Ліма-де-Фарія (1988) запропонував своє трактування сутності адаптогенезу загалом і пояснює його внутрішньою консервативною упоряд-

кованістю живої системи, акцентуючи, що пристосування ще не мають гідного наукового трактування в теорії еволюції (Уоддінгтон, 1970).

Дослідження А. Ліма-де-Фарія (2004), в яких отримана остання молекулярна інформація, розкривають кардинально іншу картину, в якій навіть хромосома виглядає як незалежна молекулярна структура, яка адаптується своїм власним шляхом. Вона не підкоряється випадковості, відбору, гравітації чи магнетизму. Закріплюючи суперечливу поведінку хромосоми на молекулярних процесах, керованих самозбіркою атомів, автор розширює новий погляд на хромосому з несподіваними наслідками для генетики, еволюції та фізики. Доктор *honoris causa* Університету Порту А. Ліма-де-Фарія прожив 102 роки. 1988 року дослідник запропонував враховувати чотири базових положення, щоб правильно розуміти взаємовідношення організму з довкіллям, що його оточує:



Антоніо Ліма-де-Фарія
(1921-2023)

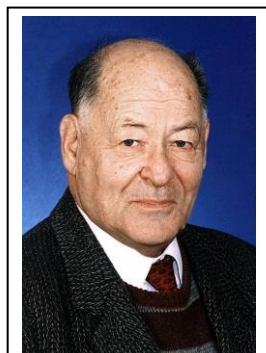
1) організми збудовані з хімічних сполук, що є в середовищі, тому розвиваються шляхом їх еволюції (таке походження організмів створило імпринт, котрий зумовив їхню велику подібність до середовища);

2) незалежність від середовища – певна самодостатність;

3) протидія середовищу (*pH*-буфери, термо- і теплорегуляція);

4) вплив середовища (фізичні й хімічні інформаційні сигнали до перебудови організму).

Слід акцентувати, що в середині самого організму, як надскладної системи, постійно тривають субадаптації її компонентів. Часто не зовнішня потреба виступає рушієм адаптації, а нез'ясовані внутрішні процеси в живій системі, хоча, вірогідно, й пов'язані із зовнішнім середовищем.



Дмитро Гродзинський
(1929–2016)

Пластичність структур і функцій та подальше вироблення їх пристосувальних властивостей традиційно розглядають як основну стратегію життя. У такому визначенні поєднується і результат, і процес. Вважається, що адаптивність – це висока пластичність, постадаптація – це пристосованість до тих умов, котрі мали місце у попередні етапи еволюції, преадаптація – онтогенетична здатність до пристосування, що ніколи раніше не була задіяна в ході еволюції. За Е. Піанка (1981) кожен вид організму володіє адаптаційним комплексом (або коадаптаціями) – тобто сумою адаптацій (фізіологічної, морфологічної, поведінкової тощо). Здатність організму витримувати коливання в навколишньому середовищі визначена його екопотенцією або адаптивним потенціалом (Либєрт, 1982).



Для рослинних організмів Д. Гродзинський (1983) роз'яснює, що порівняно короткочасна, але достатньо сильна зміна параметрів середовища спричинює первинну стрес-реакцію, згодом – адаптацію, а потім – виснаження ресурсів надійності й загибель. Адаптація у цій теорії потрактована як здатність організму зберігати достатній рівень функціонування у зміненому середовищі шляхом регулювання внутрішніх процесів.

Повертаючись до витоків філогенезу й узагальнюючи сучасні дослідження, можна виділити чотири еволюційні причинно-наслідкові явища взаємовідношень живих систем із середовищем:

1) організми будували себе із тих же елементів різних систем, із яких збудоване навколишнє **природне середовище**;

2) з плином розвитку залежність організму від середовища були послаблені (адаптованість зростала);

3) розвинулася така здатність до протидії середовищу, яка стабілізувала клітинну організацію;

4) живі системи отримали змогу спрямовано адаптуватися до середовища, набуваючи здатності оцінювати якісно й кількісно зміни своїх внутрішніх параметрів з допомогою фізико-хімічних рецепторів і здійснювати відповідні корекції.



Еволюційна екологія – новітній розділ екології, виокремлений для вивчення екологічних механізмів еволюції, шляхів і форм еволюційного становлення індивідуальних і популяційних адаптацій та еволюції структур і функцій біогеоценотичних систем усіх рівнів (Радченко, 1994 і 2009; Еськов, 2009).

Найбільшу адаптивність до космогенних впливів та антропогенної "активності" має, звичайно, цілісна біосфера, згодом нижчі за рангом екосистеми, потім комплекси популяції тощо, і найменш адаптивним, найнезахищенішим, або іншими словами, приреченим є самотній організм, котрий позбавлений свого природного, звично екосистемного середовища, яким би він складним і потужним не був.



8.1. Становлення вчення про агроєкосистеми

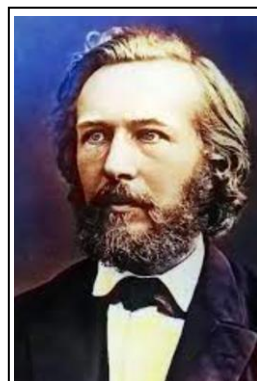
Переїнявши надзвичайно різноманітні натуралістичні наукові надбання А. фон Гумбольдта, який своїми основними завданнями вважав пізнання таємниць "... збагнення природи, як цілого, та збір свідчень про взаємодію природних сил", А. Геккель уперше сформулював (Haeckel, 1866) визначення, об'єкт і предмет нової науки.



Під **екологією** ми розуміємо, як писав А. Геккель, науку про зв'язки організму з навколишнім середовищем, включаючи всі умови існування. Вони частково органічні, частково неорганічні за своєю природою, мають найбільше значення для форми організмів, оскільки вони змушують їх пристосовуватися.

Під екологією Е. Геккель ще мав на увазі сукупність знань, що стосуються економіки природи – дослідження загальних взаємовідношень тварин як з неорганічним, так і з органічним середовищем; включаючи, перш за все, його дружні та ворожі стосунки з тими організмами, з якими він прямо чи опосередковано контактує. Простіше, екологія – це наука про всі ті складні взаємозв'язки, які Ч. Дарвін називав умовами боротьби за існування.

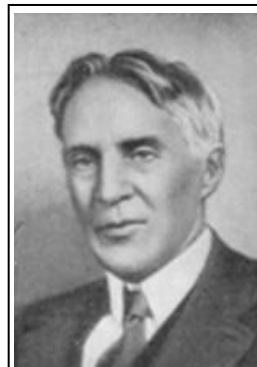
Уперше в наукову лексику поняття "єкосистема" увів англійський геоботанік Артур Тенслі, опублікувавши 1935 року (Tansley, 1935) свою фундаментальну працю "Правильне і неправильне використання фітоценологічних концепцій і термінів". У ній він, зокрема зазначив, що "... Хоча організми можуть претендувати на те, щоб ми приділяли їм основну увагу, проте коли ми глибше вникаємо у спосіб їхнього існування, то не можемо відокремити їх від їхнього навколишнього середовища, разом з яким вони становлять єдину фізичну систему. Саме такі системи є, з погляду еколога, основними одиницями природи на земній поверхні... Ці



Ернст Геккель
(1834-1919)

екосистеми, як ми їх називаємо, є найрізноманітніших типів і розмірів. Вони утворюють одну категорію з-поміж різноманіття фізичних систем, яке починається від Всесвіту й завершується атомом" (на той час найменша, відома людині частка матеріального світу – **П.Г.** і **О.С.**).

Отже звертаємо увагу, що А. Тенслі перший ствердно заявив: екосистеми – це цілісні підсистеми природи, "...які є результатом інтеграції всіх живих і неживих чинників середовища...". Провідним живим компонентом наземної екосистеми виступає рослинне угруповання з його певними просторовими межами. Проте А. Тенслі не мав на увазі системи тільки одного певного рівня організації, який із позиції геоботаніки відповідає рівню конкретних рослинних угруповань (фітоценозів), а й інші рівні – як популяцій і нижче, так і рівня ландшафтів і вище.



Артур Тенслі
(1871–1955)

У сучасній літературі доводиться бачити розширене тлумаченням і використання терміну "екосистема". При цьому іноді є посилання на вищенаведене визначення А. Тенслі, а саме: на твердження, що "...екосистеми бувають найрізноманітніших типів і розмірів...", а далі цитату цими словами обриваючи, автори опускають важливу наступну пропозицію вченого, яка типізує екосистеми за одним конкретним специфічним рівнем організації природи. Насправді, говорячи про різні типи і розміри екосистем, А. Тенслі мав на увазі лише добре відомі йому на той час відмінності в типах і розмірах фітоценозів цих екосистем, зараховуючи проте всі екосистеми до однієї категорії, до одного – "екосистемного" рівня організації природи.



Володимир
Станчинський
(1882–1942)

Незалежно і в один час із А. Тенслі український учений-натураліст Володимир Станчинський опублікував свою наукову працю "До розуміння біоценозу" (1933) (Василюк і Пархоменко, 2024), яка стала класикою дослідження системної організації зв'язків між організмами та їхнім середовищем життя.

Лише через 12 років московський геоботанік В. Сукачов (1944) запропонував поняття "біогеоценоз", долучивши природні до розуміння підсистеми: атмосферу, гірську породу, гідросистеми, рослинність, тваринний світ, мікроорганізми і ґрунт. В основу вивчення біогеоценозів були покладені біогеохімічний і енергетичний підходи.

Лісознавець та еколог Петро Погребняк (1950) упорядкував і поглибив учення про такі складні й різноманітні екосистеми, як ліси, що є єдністю рослин, тварин, ґрунту й атмосфери. Цим український учений вагомо

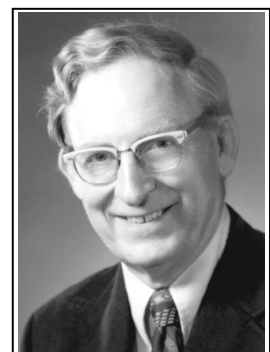


П. Погребняк
(1900–1976)

змістив у практичну площину екосистемне бачення організації природи та розумне господарське використання такого підходу в лісовій галузі багатьох країн і збереженні лісових екосистем.

Думку про можливість розширення сфери застосування терміну "екосистема" порівняно з його "вузьким" розумінням у А. Тенслі вперше розвинув 1956 року Ф. Еванс (*концепція екосистеми Еванса*). У своїй статті "Екосистема як основна одиниця екології" він писав, що А. Тенслі (цит. за Гильмановым, 1978) "...застосовував термін (екосистема – *П.Г.* і *О.С.*) специфічно до рівня біологічної організації, який представлений такими одиницями, як угруповання і біом. Я вважаю, що логічно і бажано розширити сферу застосування цієї концепції і терміну, щоб охопити інші рівні організації, відмінні від рівня угруповання. ... Незалежно від рівня, на якому вивчається життя, можливе застосування концепції екосистеми. ... У будь-якому конкретному випадку специфічний рівень, на якому вивчається екосистема, може бути вказаний якісними прикметниками – наприклад, ценозна екосистема (екосистема на рівні спільноти), екосистема популяції тощо. ... Дійсно, поняття екосистеми може бути кориснішим, коли воно вживане стосовно угруповання, ніж до популяції або особини, оскільки на цьому рівні її (екосистеми – *П.Г.* і *О.С.*) межі можуть бути легше визначені. Проте його застосування здається цілком виправданим на всіх рівнях" (Evans, 1956). Таким чином відображаючи потребу, що дійсно відчувалася в початковий період розвитку екології, у системному терміні із широким тлумаченням, Ф. Еванс запропонував для цієї мети "екосистему" А. Тенслі.

Після Ф. Еванса дефініцію "екосистема" популісти від екології поширили практично на всі природні об'єкти – геологічні, гідрологічні і т.д., що були лише певною цілісною сукупністю тіл і явищ. Таким широким та універсальним терміном у сучасній науці є, власне, термін "система". Проте, в середині 50-х років на Заході системне мислення тільки починало проникати у свідомість природодослідників (разом із виходом у світ праць Л. фон Берталанфі (1950, 1956) із загальної теорії систем). Дефініція "система", яка якраз і покликана була служити універсальним системним поняттям, ще не увійшла тоді до лексикону вчених самотійною, без характерних для сучасності приставок типу "еко-", "біо-", "гео-" тощо. У той час "ініціатива" Ф. Еванса знайшла підтримку у багатьох західних екологів, унаслідок чого за інерцією екосистемами почали називати системи будь-якого рівня, від калюжі або пня – до океану й біосфери. Загалом, це призвело до профанації ідеї А. Тенслі про



Юджин. Одум
(1913–2002)



екосистеми як "...основної одиниці живої природи на земній поверхні...".

На розширенні тлумачення терміну "екосистема" наполягали Ю. Одум, (1953, 1959), Г. Гансон (1962), П. Давінью і М. Тангі (1967), Г. Елленберг (1973) та ін. У результаті в екологічній літературі 60-х років минулого століття існувало двовладдя: терміни "екосистема" і "біогеоценоз" застосовували як синоніми для позначення елементарних біохорологічних одиниць біосфери в трактуванні А. Тенслі й В. Сукачова. Проте, найважливіше зазначити, що з того часу термін "екосистема" використовують і в метафоричному сенсі для позначення екосистем та інших систем навколишнього середовища різного рангу.

Достатньо глибоко опрацьованим і відомим на той час уже був розділ екології біосферологія – учення про біогеосферу (Будыко, 1977). Основним її завданням є вивчення історії формування, генезису, еволюції, структури й механізмів функціонування (цілісної – **П.Г.** і **О.С.**) глобальної екосистеми. М. Будико називає цей розділ знань глобальною екологією, об'єктом дослідження якої є глобальна екосистема (як цілісна єдність – **П.Г.** і **О.С.**), а завданнями – вивчення її компонентного складу, обміну речовиною та енергією на всій планеті. Саме підхід і положення цієї науки, її світоглядні засади лягли в основу розроблення Програми дій. "Порядок денний на ХХІ сторіччя" (Agenda-21). У **біогеосферному контексті** "екологічні проблеми", "екологічна ситуація", "екологічний підхід" є коректними та плідними, оскільки тут вживання означення "екологічний" стосується найбільшої екосистеми – бігеосфери.

Проте, численні недолугі переклади прийнятих документів, а також їхні некваліфіковані коментарі, які були швидко поширені по усьому світу після Конференції Ріо-92, екстраполювали термін "екологія" та "екологічний" на всі рівні вжитку – від глобальної екосистеми (де це доречно – **П.Г.** і **О.С.**) до ставка-відстійника, пенька й калюжі (де це не має сенсу – **П.Г.** і **О.С.**). Проблеми навколишнього середовища (*environmental problems*) стали екологічними проблемами. Всі невирішені проблеми промислової безпеки і комунальної гігієни, хімізованого сільського господарства і, навіть, засміченого уламками зруйнованих орбітальних апаратів навколоземного космічного простору зі сфери знань **науки про довкілля** (*Environmental Science*), водночас стали "екологічними" проблемами. Застарілі й нерозв'язані проблеми захисту навколишнього природного та соціального середовища були названі екологічними, хоча екосистеми до повсюдного нагромадження кризових ситуацій не мають жодного відношення. Навпаки, саме екосистеми спочатку найнижчого рангу, згодом ландшафтні й біомні стали найуразливішими "жертвами" нерозумного, подекуди варварського природокористування, почали деградувати під натиском надекосистемних (зовнішніх) чинників трансформації навколишнього середовища.

Тому, коли приймаємо, що система – цілісна множина природно або штучно взаємопов'язаних елементів, яка у взаємовідносинах з навколишнім середовищем поводить себе як особлива (емерджентна) єдність, є елементом у надсистемі вищого порядку, а елементи системи своєю чергою є підсистемами нижчого рівня, можемо сформулювати універсальне визначення екосистеми. Отже:



Екосистемою є особлива множина природних і штучних компонентів, центральним з яких є жива підсистема (на рівнях організації від окремого організму до цілісної біоти Землі), з якою ця екосистема у взаємовідносинах із навколишнім середовищем проявляє себе як емерджентна єдність, є відносно стійким і самопідтримуваним структурно-функціональним елементом в екосистемі вищого рангу (до біогеосфери) та надсистемою для екосистем нижчого рангу (до консорції) (Гнатів, 2014).

Виходячи з такого трактування екосистеми і залежно від рівня організації живих систем,



Екосистеми бувають: аутоекологічні, (організові екосистеми – **аутекоекосистеми**), демаекологічні (популяційні екосистеми – **демаекосистеми**), синекологічні (**синекосистеми**) і глобальна екосистема – **біогеосфера** (Гнатів і Хірівський, 2010).

8.2. Рівні організації екосистем

Екосистеми, за образним висловом українського ученого В. Вернадського – це елементарні фрагменти "...плівки живої речовини на поверхні Землі...", які творять мозаїку екосистем у **глобальній екосистемі – біогеосфері**. У ній, насамперед, найвиразніше виділяють субстратні екосистеми – **океани й материки**. Ці екосистеми чітко відрізняють за складом найвагоміших середовищевірних компонентів – води й суходолу, а також за відмінними біогеохімічними режимами їхнього внутрішнього середовища. Земна куля на 71% укрита водами океану та лише 29% займає суходіл. Відповідно і за об'ємом океанічні екосистеми є істотно більшими, але за різноманітністю живого світу, за різними припущеннями, поступаються суходільним.

Екосистемний рівень організації охоплює системи різних розмірів, які мають виразну специфіку будови, роботи й ролі в підтриманні цілісності й

стабільності екосистем більших розмірів і вищих рангів. Більші системи фактично збудовані з екосистем нижчих ступенів організації.

У межах суходолу виділяють наступний нижчий ранг екосистем – біоми. Фактично це фізико-географічні зони, що вирізняються властивими максимальними і мінімальними температурами, кількістю опадів та їх видами, сезонністю і змінами тривалості дня, специфікою біоти, головно рослинного покриву тощо. У визначенні Ю. Одума:



Біом – це велика регіональна або субконтинентальна екосистема, що має певний основний тип рослинності або інші особливості ландшафтів. Взаємодія кліматичних чинників сприяє утворенню в біомі особливої рослинності (переважно деревної, чагарникової чи трав'яної), яка у свою чергу стає середовищем життя певних тваринних угруповань і мікробіоти.

Основними на суходолі вважають дев'ять біомів, проте, часто їх по-різному називають, Зокрема, це – біоми: тундровий, тайговий, листопадних лісів, чапараль і рідколісся, степовий, пустельний, саванний, гірський, тропічних дощових лісів (рис. 8.1).

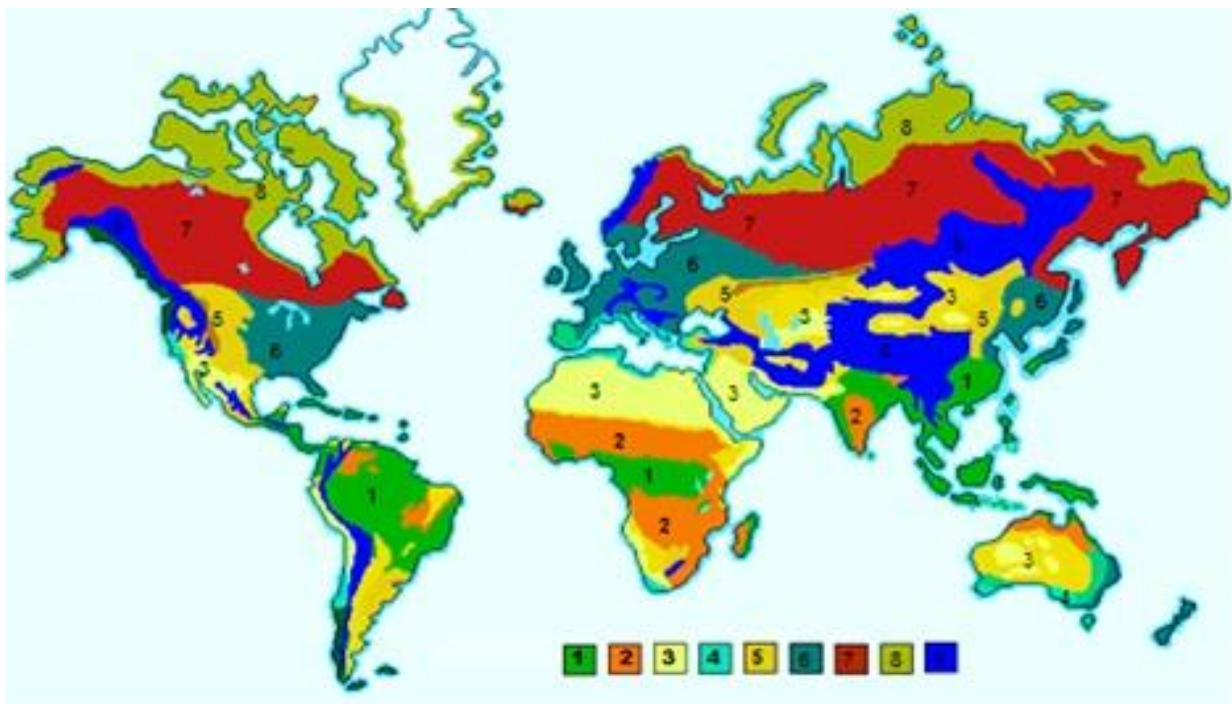


Рис. 8.1. Біоми Землі – ландшафтні екосистеми суходолу (www.blueplanetbiomes.org/):

1 – тропічні вологі ліси; 2 – мішані ліси; 3 – чапараль і рідколісся; 4 – степи і прерії; 5 – тундра; 6 – савани і тропічні сезонно-вологі ліси; 7 – напівпустелі й пустелі; 8 – хвойні ліси (тайга); 9 – альпійське високогір'я.

Як фізико-географічні зони поділені на провінції, так і біоми традиційно ділять на **провінційні екосистеми**. Вони відрізняються геологічною та геоморфологічною будовою, ступенем континентальності клімату, видовим складом біоти і співвідношенням площ плакорних екосистем, структурою ґрунтового покриву тощо. Цим територіям суходільних біомів відповідають біогеохімічні області. В їхніх межах біогеохімічні процеси протікають на тлі певних кліматичних умов за участі специфічного рослинного і тваринного населення, ґрунтового покриву, тому відрізняються якісною відмінністю. В Україні виділені 12 провінційних екосистем: Поліська, Західноукраїнська, Дністровсько-Дніпровська й Лівобережно-Дніпровська лісостепові й ін.

Провінційні екосистеми, як великі території вищого рангу, мають ще детальнішу мозаїчну будову. Вони становлять сукупність **ландшафтних екосистем**, які сформовані з елементарних геохімічних ландшафтів – комплексів геоморфологічних елементів земної поверхні, що перебувають у геохімічному зв'язку, а також різноманітних гідроекосистем і генетично пов'язаних біогеоценозів.

Ландшафтна екосистема має не менше як два чітко відмінних біогеоценози і не виходить за межі фізико-географічного округу. Прикладами ландшафтних екосистем на Заході України є Східно-Бескидська аграрно-лісова чи Малополіська лісо-аграрна, на сході – Донецька промислово-урбаністична ландшафтна екосистема й ін.

Найдетальніше вивченим є ієрархічний рівень **біогеоценозної екосистеми**, яка, будучи структурною одиницею ландшафтної екосистеми, далі поділена на менші складові – парцелярні екосистеми. Під **біогеоценозною парцелюю** розуміють горизонтальну частину біогеоценозу, яка відрізняється за складом і властивостями компонентів – рослинами, тваринами, ґрунтовою відміною, а також специфікою взаємозв'язків і речовинно-енергетичним обміном, що пронизує всю його вертикальну товщу.

Парцелярні екосистеми є сукупністю найменших та останніх у ієрархічному поділі одиниць – консорційних екосистем.



Консорційна екосистема – це сукупність біонтів, у якій панує особина одного автотрофного або гетеротрофного виду, а решта видів пов'язані з нею та між собою топічними, трофічними, фабричними або форичними зв'язками, і в цій сукупності триває постійний речовинно-енергетичний та інформаційний обміни і формується власне специфічне внутрішнє середовище.



Отже, консорції за М. Голубцем (2000) – це найнижчий, елементарний за системологічними законами, рівень екосистемної організації живої природи (рис. 8.2).

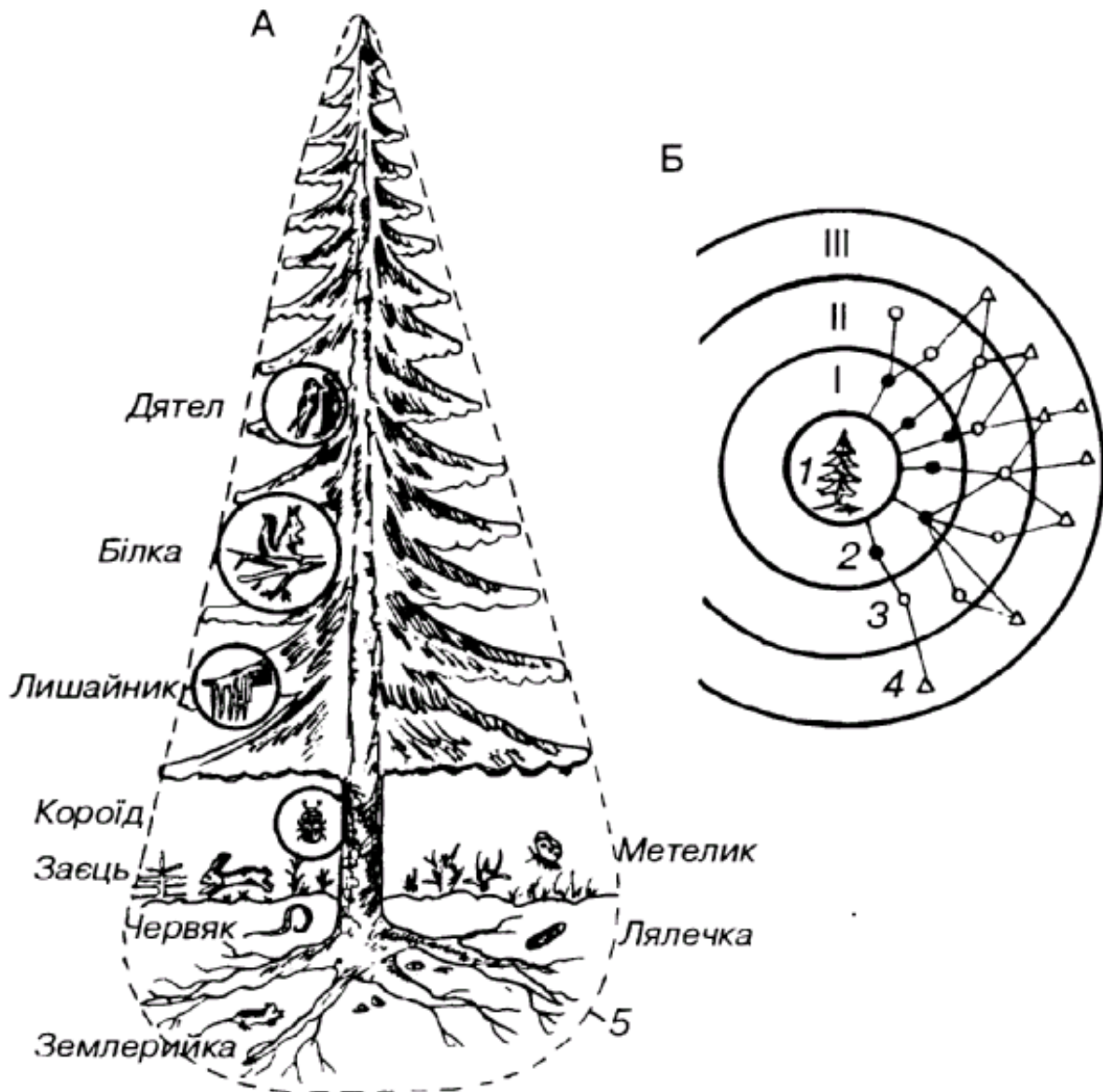


Рис. 8.2. *Обсяг і будова автотрофної деревної консорції* (за Голубцем, 2000):

А – просторова будова, яка охоплює ядро консорції, усі облігатні консорти і середовище їх існування;

Б – схематична структура: 1 – ядро (детермінант) консорції, I, II, III – концентри, 2 – консорти першого концентру, 3 – консорти другого концентру, 4 – консорти третього концентру

У консорційній екосистемі різні види організмів спільно виживають і розмножуються. Її базовим структурним компонентом є центральний організм (ядро консорції), за рахунок речовинно-енергетичних ресурсів котрого існують інші компоненти екосистеми – **облігатні консорти** першого, дру-

гого й наступних концентрів. Останні в структурно-функціональному плані відповідають трофічним рівням екосистеми. До першого концентру автотрофної консорції (ядро – зелена рослина) належать рослиноїдні тварини, до другого – хижаки першого порядку (поїдають фітофагів), до третього – хижаки другого порядку (поїдають переважно хижаків першого порядку, або існують за рахунок накопиченої ними енергії) і т.д.

Структура **автотрофних консорцій** істотно залежить від присутності **факультативних консортів**, головним чином першого концентру – фітофагів. Адже вони живляться фітомасою не лише особин виду, до якого належить ядро консорції, але й десятками інших видів (заєць, дика свиня, польова миша тощо). Автотрофна консорція повним складом компонентів належить до парцелярної й далі до біогеоценозної екосистеми.

Автотрофній консорції властиві всі **екофункції** – поглинання й трансформація сонячної енергії, кругообіг хімічних елементів, продукування біомаси, саморегуляція тощо. Функціональні показники консорційної екосистеми залежать від збалансованості й організованості її структури, тобто взаємовідношень між просторовими і функціональними підсистемами.

Наприклад, добре розвинена зелена маса листків дерева є кормом для листоїдів, але надмірне розмноження останніх призводить до руйнування асиміляційного апарата і зменшення продуктивності фотосинтезу. Збіднення сапротрофного блоку внаслідок перезволоження або забруднення ґрунту пестицидами чи важкими металами послаблює процес деструкції, вивільнення поживних елементів із мортмаси та їх надходження у новий біогеохімічний цикл.

Консорційні екосистеми динамічні в часі, змінюються під впливом різних екочинників. Їхня структура залежить від віку, фізіологічного стану і стадій розвитку ядра консорції та її аутекологічних особливостей консортів. Консорти першого і другого концентрів займають свої просторові й функціональні екологічні ніші (рис. 8.3).

Повну інформацію про структурно-функціональну організацію автотрофної

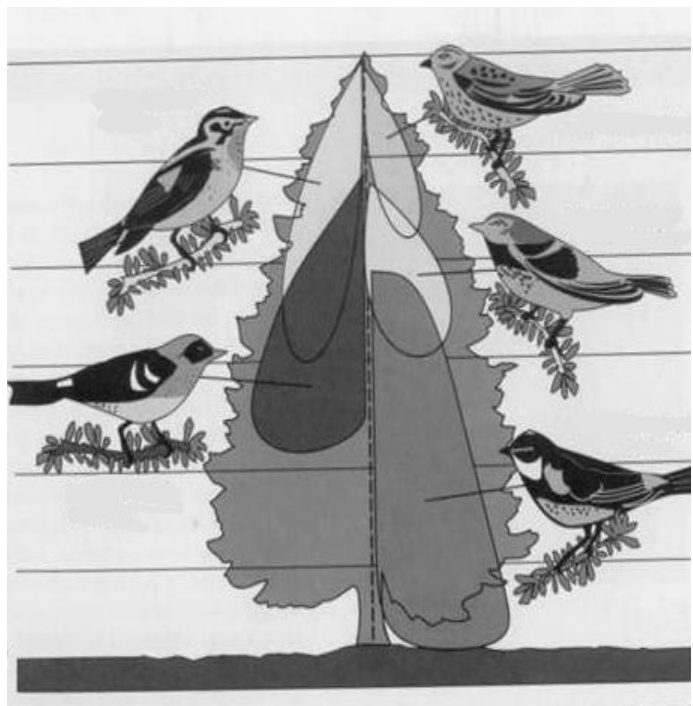


Рис. 8.3. Розподіл життєвого середовища (еконіші) між різними видами лісових птахів (консрти першого і другого концентрів) у консорціях лісових дерев

консорції багаторічного деревного виду можна зібрати лише на підставі тривалих системних досліджень. Вони повинні бути приурочені до вікових станів ядра, його онтогенезу. Потрібно врахувати умови різних ековпливів (посух, повеней, інвазій хвороб і шкідників). Внутрішнє "життя" консорцій як системи дуже складне.

Звичними способами взаємовідношень між організмами в межах консорції є мутуалізм, протокооперація, коменсалізм, хижацтво (поїдання), паразитизм, аменсалізм, конкуренція та нейтралізм. У межах однієї консорції всі вони можуть проявлятися одночасно.

Специфічними структурно-функціональними властивостями вирізняються **гетеротрофні консорції**, ядрами або детермінантами яких є тваринні організми (рис. 8.4), а також людина, як біоорганізм. Вони переважно неповночленні, зокрема ті, детермінанти яких ведуть міграційний спосіб життя (звірі, птахи, безхребетні) і не мають у своєму складі вагомого автотрофного і деструкційного блоків. Це фактично рухомі консорційні комплекси, що мігрують від однієї до іншої автономних автотрофних консорцій, ставлячи тимчасово їх факультативними консортами. У пошуках корму різні види мігрують разом, як японські макаки (*Macaca fuscata* Blyth) верхи на плямистих оленях (*Cervus nippon* Temminck), що спільно харчуються однаковими деревними плодами, тільки одні у кронах, інші під наметом. У пошуках сприятливих умов розмноження і зимівлі вони можуть мігрувати навіть між провінційними, біомними або й материковими екосистемами (зокрема, перелітні птахи). Концентри таких гетеротрофних консорцій представлені, головним чином, паразитичними, мутуалістичними чи протокоопераційними облігатними безхребетними тваринами, бактеріями й мікроскопічними грибами, зрідка автотрофними водоростями, а також факультативними хижаками.

Між особинами й популяціями поширені різноманітні консортивні (системні) зв'язки. Наприклад, відомі такі інтерспецифічні, як **пробіоз (на-ройкія)** – підселення; **епіойкія** – використання поверхні тіла як місця посе-



Рис. 8.4. Гетеротрофна консорція африканського буйвола (ядро консорції), підшкірними паразитами (облігатні консорти першого концентру) якого живляться птахи (факультативні консорти другого концентру)

лення; **синойкія** – квартиранство; **ентойкія** – поселення в середині тіла господаря), і взаємовигідні (симбіотичні) відношення, **форезія** (для поширення організмів), **парабіоз** (харчова залежність), **метабіоз** (повна взаємозалежність).

Загалом, існує актуальна потреба глибокого пізнання структурно-функціональної організації консорцій як екосистеми, з урахуванням необхідності збереження біотичної різноманітності видів, оскільки вони є фактором стабільності довкілля, та відіграють визначальну організаційну функцію в парцелярних і біогеоценозних екосистемах.



Навколишнім (зовнішнім) **середовищем** для кожного типу екосистем, починаючи від консорційної, є внутрішнє середовище екосистеми вищого ієрархічного рівня.

Лише **біогеосфера – глобальна екосистема**, оточена практично мертвим (не екологічним, а суто фізичним) навколишнім середовищем, яким є міжпланетний космос.

Суходільні екосистеми оточені таким специфічним зовнішнім середовищем, як води океану, атмосферою й літосферою. Біоми межують з біомами й водами, а провінційні екосистеми розмежовані між собою певними фізико-географічними бар'єрами. Ландшафти розділяють більш-менш виразні геоморфологічні границі й рослинність, або рукотворні об'єкти. Ще менш виразна границя між біогеоценозними й меншими за рангом екосистемами.

Важливо зауважити, що кожен вищий ступінь організації екосистем є сприятливим довкіллям і захистом для систем нижчого рівня. Це природно за збереження надекосистемних, зовнішніх стосовно екосистем, фізико-хімічних та інших властивостей атмосфери й літосфери як їхніх верхньої та нижньої фізичних границь. Така природна особливість будови й організації біогеосфери зумовлює її надзвичайну стійкість і, як показали дослідження з палеоклімату і палеоекології, незнищенність.

8.3. Агороекосистеми та середовища: критерії класифікації

Мозаїчність біосфери легко пояснити, з одного боку, різноманітністю розподілу абіотичних властивостей **морфотопів** – просторових основ розташування екосистем, а з іншого – відмінностями у шляхах еволюції організмів та їх угруповань на генетично розділених біогеографічних територіях. Ці чинники пов'язані з наявністю на земній поверхні й у товщі літосфери та гідросфери природних меж – бар'єрів, поверхонь або суціль-



них перехідних шарів, на яких відбувається виразна зміна властивостей морфотопів (особливості місця, ухил поверхні, експозиція), **едафотопів** (освоєних і перетворених екосистемою ґрунтових профілів), **кліматопів** (вологість, температура, вітряність тощо), а також складу літогенної породи, тобто формуються вагомі градієнти цих властивостей. Такі природні **горизонтальні межі** відокремлюють одну від одної ділянки земної поверхні, у границях яких екоумови або **властивості екотопів** є достатньо однорідними. Як правило, екотопи, як інтеграція умов, бувають зайняті одним біоценозом, тобто утворюють одну екосистему цього рівня.

Біогеоценозна екосистема займає певний об'єм тривимірного простору, обмежений поверхнею або шаром, які мають підвищені градієнти абіотичних (і, відповідно, біотичних) властивостей. Деякі з цих градієнтів, наприклад, температури, концентрації, зміни гранулометричного складу й зволоженості ґрунтів, створюють по межах екосистеми силові поля різної природи, здатні спричинити потоки речовин або енергії через кордони екосистеми. Проте фактичні розміри цих потоків визначають не тільки градієнти, але і провідні властивості граничного шару екосистеми. В результаті, межі екосистеми можуть відрізнятися як максимальними, так і мінімальними потоками речовин або енергії. Наприклад, верхня межа біогеоценозної екосистеми відповідає максимальній висоті шару рослинності й на ній максимальними є потоки сонячної енергії, рідких і твердих опадів, що надходять із атмосфери. На нижній **вертикальній межі**, яка співпадає з поверхнею першого водопору за близького залягання ґрунтових вод або проходить на глибині максимального проникнення атмосферної вологи й, відповідно коріння рослин, вертикальний потік вологи навпаки є мінімальний.

Чітке розуміння просторових меж створює передумови для вивчення екосистем математичним інструментарієм, оскільки це зрозуміло надає можливість постановки крайового завдання опису потоків речовин усередині екосистеми за заданих крайових умов на пограниччях.

Вертикальні масштаби екосистем коливаються від кількох сантиметрів у примітивних літогенних або пустельних екосистемах, населених нижчими організмами, до десятків сотень метрів у лісових і водних екосистемах. У польових умовах найбільші труднощі виникають при визначенні горизонтальних границь, оскільки горизонтальні градієнти властивостей екосистем часто бувають малі й не мають виразних просторових максимумів чи мінімумів. У таких випадках перехідні зони між явно різними екосистемами можуть бути достатньо протяжними і тут можна говорити про **континуум екосистем** певного ландшафту.

Площі, займані різними екосистемами, також варіюють від кількох квадратних метрів (пустельні самотні рослини, куртини, невеликі степові запа-



Костянтин
Малиновський
(1919-2005)

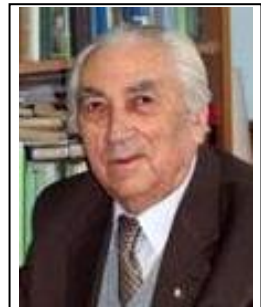
дини – "блюдця", парцели) до мільйонів квадратних кілометрів (у однорідних лісах, саванах, степах, пустелях, тундрі або водних екосистемах).

Із метою досконального вивчення структури й функцій лісових екосистем Українських Карпат К. Малиновський і С. Стойко (упродовж 1965–1969 років) запропонували принципи та здійснили **еколого-фітоценотичну класифікацію** наземних екосистем. Її стрижнем є субординація природних рослинних угруповань: тип рослинності (лісова, лучна й ін.), формація (діброви, бучини, смеречини й ін.) та асоціація (тип фітоценозу) – домінант верхнього ярусу (панівний вид) і домінант надґрунтового покриву. Із певною деталізацією вони були взяті як таксономічні класифікаційні одиниці. Використані фітоценологічні таксони дуже добре вписуються у відповідні умови, що формуються вказаними вище чинниками в окреслених природними бар'єрами границях.

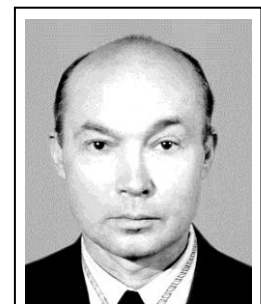
Ю. Одум (1986) запропонував інші підходи до типізації екосистем, з-поміж іншого і з урахуванням втручання людини у їхню будову й функції. Є низка різних способів групування, але найпродуктивнішою виявилася класифікація на засадах цілісності їхніх системних ознак. Таке групування ґрунтується на окресленні рівнів організації екосистем, які детально описані у попередньому підрозділі.

Залежно від мети класифікації нативні екосистеми можуть мати інші ряди таксономічних одиниць. Якщо брати за сутнісну основу природних живих систем Землі їхню структурно-функціональну організацію, то відповідно до кожного рангу екосистем біогеосфери можна вибрати класифікацію за кількома такими змістовними критеріями, як керованість, біогеохімічні, водо- й енерготрансформаційні властивості, продукційна потенція, біорізноманіття, природоохоронне й ерозійнозахисне значення тощо. Для трансформованих і штучних екосистем є потреба класифікування їх за мірою впливу людського фактора. Актуальною є типізація за ступенем антропоїзації (Бачинський, 1992 і 1995), урбанізації (від хутора до мегаполіса – Кучерявий, 1999), за обсягами енергетичної та речовинної дотації, за мірою різноманітних забруднень та інших трансформацій.

1979 року Григорій Бачинський організував та очолив в Обчислювальному центрі Інституту прикладних проблем механіки і математики АН УРСР групу математико-картографічного моделювання соціоекосистем і створив атлас природних умов, раціонального природокористу-



Степан Стойко
(1920-2020)



Григорій Бачинський
(1936-1996)

вання й охорони природи Львівської області. У процесі досліджень вперше успішно застосовано метод математико-картографічного моделювання регіональних та локальних соціоекосистем для переходу від вирішення окремих питань оптимізації галузевого природокористування до розв'язання комплексних проблем територіального природокористування, до керування соціоекосистемами різного ієрархічного рівня.

Значно складніше класифікувати середовище існування екосистем. Концепція середовища та його взаємозв'язку із організмами й екосистемами належить до дискусійних у науці. У розгляді зв'язку організмів із середовищем на перший план постає врахування критеріїв їхнього виживання і розмноження. Саме вони надають шанси адаптуватися окремим видам у певному середовищі або конкретній підсистемі – у середовищі надсистеми.

Класифікація середовища, де основними сутнісними критеріями є природність чи антропогенне його походження, може бути різними. Місцеположення середовища може бути внутрішнім стосовно екосистеми та зовнішнім. Зовнішнє середовище часто називають довкіллям, але потрібно завжди враховувати, що довкілля означає "довкола чогось", тобто довкілля завжди буває відносно чого-небудь. Залежно від масштабу, власне, системи воно може виявитися мікро-, або макросередовищем.

За структурою середовище буває гомогенним і гетерогенним, за рівнями організованості – стихійним (неорганізованим, непередбачуваним) та організованим (упорядкованим), за дієвістю – активним і пасивним, за якістю дії – благодатним, нейтральним, агресивним (руйнує екосистему та забирає її ресурси).

Середовище за сутнісною дією може бути ресурсним (у розумінні речовини, енергії, тіл) та інформаційним. З урахуванням активності екосистем їхнє середовище (і внутрішнє, і зовнішнє) є керованими, або некеруваними (на стадії руйнування системи).



Антропогенне середовище – це природне середовище, перетворене людиною, доповнене штучними системами, і воно включає штучне довкілля – інтер'єр, будівлі, дороги, інші штучні компоненти у поєднанні з природними – ґрунтом, біотою.

Для живих систем необхідні умови існування, або мінімальні умови життя (сукупність життєвих елементів середовища, з якими живі організми перебувають у нерозривній єдності і без яких відтворити самі себе не в стані).

У науковій і навчальній літературі натрапляємо на плутанину з використанням понять "природне середовище", "навколишнє середовище", "довкілля". До виникнення вагомих і масштабних негативних антропогенних змін у природному середовищі існування людини, за примітивного людського соціуму, самодостатнім могло залишатися поняття "**природне**

середовище". Воно з доісторичних часів поєднувало в собі суто фізичне й екосистемне середовище (на рівні ландшафту). На біогеосферному рівні все природне довкілля планети, захищене атмосферою, було екосистемним. Коли ж людина створила середовища: виробниче, економічне, суспільне, духовне, культурне, політичне тощо, вони "потіснили", а подекуди "підпорядкували" собі природне довкілля.

Для диференціювання навколишнього середовища людини (довкілля) стосовно інших середовищ потрібно використовувати додаткові означення, такі як "навколишнє природне" середовище, "суспільне" або "соціальне", "економічне", "культурне", "духовне", "психологічне", "релігійне" середовища тощо. Не всі ці середовища мають стосунок до екології людини чи соціуму.



Довкілля (без додаткового епітета) – це навколишнє щодо людини середовище з усіма його взаємозалежними природним, соціальним та економічним компонентами у часовій і просторовій динаміці.

Всі різновиди середовищ тепер є ієрархічно підпорядкованими надсистемі довкілля – навколишньому середовищу людини.

Уперше авторитетну наукову дискусію в Україні стосовно вагомості середовищезнавства (інвайронментології), як прогресивної у світі й потрібної для захисту довкілля сфери знань, започаткував академік К. Ситник. На противагу географам, які "затаврували" інвайронментологію, як буржуазну



Костянтин Ситник
(1926-2017)

псевдонауку, він чітко й сміливо розмежовував, власне, екологію та науку про довкілля, яку тепер в Україні називають середовищезнавством (Гнатів, 2007; Гнатів і Голубець, 2008).

Костянтин Ситник писав, що сприйняття могутньої загальної ідеї **інвайронменталізму** всіма політичними, державними і міжнародними силами може забезпечити успіх новій парадигмі суспільного розвитку, а природі і людині – гідне співіснування. Ідеологія інвайронменталізму дозволяє по-новому на світ, на взаємовідношення людства й біосфери. Головне в ній – визнання залежності кожної людини й людства в цілому від біосфери. Становище в світі визначається не тільки соціально-економічними умовами, а й станом довкілля на планеті загалом і в кожній країні.

Природне середовище істотно обмежує діяльність людини, потенціальні можливості якої стримуються закономірностями функціонування континентальних, океанічних і регіональних екосистем. Прийняття нової інвайронментальної ідеї зачіпає основоположні людські цінності й вимагає перегляду багатьох постулатів релігій, економіки, політики, науки, куль-

тури, освіти. Уся система економічних, політичних і соціальних інститутів, які керують національними й світовою громадською діяльністю, має в своїх великомасштабних проектах повною мірою враховувати їх віддалені наслідки екокриз.

8.4. Природні, напівприродні й штучні системи

Природні (нативні) екосистеми – як комплекси взаємозалежних між собою та своїми екотопами диких видів рослин, тварин і мікроорганізмів у межах навколишнього середовища, яке вони займають, є доволі стійкі до зовнішнього втручання. Схематична модель нативної екосистеми (див. рис. 4.3 у розд. 4 та рис. 5.2 у розд. 5) відображає передусім трофічні відношення, а також природний біогеохімічний кругообіг речовин, дію абіотичних (клімат, поживні мінеральні речовини) та біотичних (популяції, біоценози) факторів. На схемах проілюстрована повна залежність екосистеми від сонячної енергії. Компоненти її доволі однорідні, мають чіткі функції, їх можна добре описати вхідними та вихідними величинами.

Інша річ – трансформовані людиною або рукотворні системи. Тому детальніше зупинимось на особливостях **штучних екосистем**.

Антропогенні екосистеми – це створені людиною системи. Вони бувають відкриті чи закриті (діжка забродженого виноградного соку чи орбітальна космічна станція), великі й малі, виробничі, експозиційні й декоративні, лісові, водні, аграрні й ін. У них усі компоненти, або один чи кілька, можуть бути штучними. Прикладами є кімнатний акваріум, поле пшениці, футбольний газон, оранжерея, культури ялини європейської на місці зрубаної діброви, морська аквакультура ламінарії чи мідій тощо.

Проміжними між природними та антропогенними екосистемами є **напівштучні**, або **антропізовані**. Такі системи створені на основі природних, але мають вагомо змінену будову і функції, зазвичай, корисні для людини, але гіпертрофовані для їхнього зрівноваженого функціонування. Така перебудова потребує великих зовнішніх, неприродних енергетичних та речовинних дотацій, щоби не деградувати й зникнути.

Біогеохімічна функція антропогенних екосистем, яка тісно пов'язана з вищезгаданими, набуває інших, відмінних від природних ознак. Так, в агроекосистемах може активізуватися (зафосфачування, засолення тощо), а може і сповільнюватися концентрація біогенних хімічних елементів у верхній товщі ґрунту, з-поміж іншого й через переважно малопотужну кореневу систему культурних рослин. Якщо і продовжується акумуляція біофільних мінеральних елементів у гумусовому горизонті, то все ж значну їх кількість, як і токсичних чи радіоактивних компонентів, вилучає людина з урожаєм. Якщо рослинна продукція отримана на хімічно забруднених чи радіоактивних землях, вона підлягає поверненню (за помірної

концентрації шкідливих компонентів) у ґрунт, або ж вилученню й утилізації у спеціальних місцях за надмірного накопичення їх в урожаї.

В умовах складного рельєфу й великої кількості опадів набуває особливої ваги водотрансформаційна функція біогеоценозів. Агрофітоценози зі спрощеною просторовою структурою й обмеженою кількістю й тривалістю вегетації рослин не здатні затримати, спожити на транспірацію і фотосинтез такого великого обсягу води, який трансформує корінна екосистема. За найменшого перепаду рельєфу, особливо на рілних землях навесні та восени, а в просапних культурах і влітку, опади у вигляді зливи або дощу 30–40 мм зумовлюють ерозію ґрунтів. Втрачена органіка зі змитим ґрунтом і завислими стоками разом з вилученою з урожаєм і мінералізованою сапротрофами й становить сумарний обсяг вилученої біотичної продукції агроекосистем. Остання в свою чергу є від'ємною статтею втраченого **екопотенціалу** корінних екосистем регіону. Агроекосистема, створена на місці корінних, особливо гірськолісових екосистем, порушує міжекосистемні зв'язки і негативно впливає на гомеостаз екосистем наступних рівнів.

У північних і західних регіонах України, особливо в Карпатах, найбільшими за площею у с.-г користуванні є напівштучні лісові й гірські лучні екосистеми. Головно це поширені на висотах 1800 м над р.м. субальпійські луки-полонини, на висотах понад 1800 м трапляються альпійські луки. Субальпійські луки багаті за флористичним складом трав. Здебільшого гірські й заплавні луки рівнин використовують як пасовища, де можна отримати 20–50 ц/га зеленої маси, на родючих землях – як сіножаті, де за два укуси можна отримати 20–30 ц/га сіна.

Лісові напівштучні екосистеми (сільваекосистеми) мають істотно змінений склад деревних видів – основного системотвірного компонента лісів. Як правило, у більшості випадків це призвело до зменшення екопотенціалу лісових екосистем, де він подекуди становить лише кілька десятків відсотків від можливого у природних. Корінних (історичних) лісових екосистем (пралісів) в Україні залишилося дуже мало, але вони є неоціненним скарбом – осередком біорізноманіття природи й об'єктом наукового пізнання, та потребують заповідання й охорони.



Володимир Кучерявий
(нар. 1939)

Місцями штучні агроекосистеми змінила суцільна забудова різного функціонального призначення. Так виникли урбаністичні утворення – міста. На території міст природні ландшафтні екосистеми трансформовані в урбоекосистеми (Кучерявий, 1991 і 1999). Залежно від глибини перетворення, урбаністичні екосистеми можуть



включати як фрагменти або залишки природних екосистем, так і винятково новостворені – штучні елементи у вигляді газонів, садів, парків та інших насаджень.

У покинутих людиною містах і селах, особливо депресивних регіонів, напівштучні й штучні екосистеми стають некерованими й непередбачуваними, тому небезпечними з огляду на інвазії мікроорганізмів, адвентивних (з-поміж іншого й карантинних – амброзії, борщівника тощо) рослин та, навіть, проникнення й поширення небезпечних хижаків (вовка, лисиці). Прикладом такої урбаністичної екосистеми є територія залишених людьми 1986 року міст Прип'ять і Чорнобиль, де почалися *демутаційні процеси*. Особливу активність проявила місцева, панівна у корінних екосистемах дендрофлора, яка поступово утворює суцільний покрив, руйнує різні наземні замощення, будинки, формує притулок для зооценозів, активно корегує малий біогеохімічний кругообіг, з-поміж іншого радіоізотопів, концентруючи у харчових ланцюгах і біогеохімічних бар'єрах розсіяні вибухом радіонукліди, нейтралізатори та детоксиканти.

8.5. Питання типізації екосистем і керування ними

Наукові аспекти типізації екосистем і керування ними розглянемо на прикладі автотрофних агроекосистем. Виходячи з історичного аспекту і приймаючи пропозицію Ю. Одума (1986), агроекосистеми можна розділити на два типи, а саме доіндустріальні (самодостатні) й інтенсивні механізовані. Останні є прогресивними і сучасними, отримують дотації у вигляді пального, добрив, хімічних засобів контролю біоти, енергії машин. Точніше їх можна розділяти на природно-ресурсні (якщо розглядати силу м'язів природною) і техногенно інтенсифіковані агроекосистеми.

Аналізувати агроекосистеми, їх структурні й функціональні особливості складно через недосконалість різноманітних класифікацій. Поступово відходять у минуле механістичні й схоластичні агрофітоценологічні напрямки, котрі здебільшого пов'язували культурні рослини із супутніми у посівах небажаними представниками місцевої флори у фітоценотичній асоціації. Такий підхід не має певної практичної користі, адже поширення бур'янів переважно пов'язане більше з екоумовами (екотопами) та присутністю їх у генопласті корінних екосистем, ніж із конкретною культурою (якщо це не багаторічна монокультура). Незаперечним залишається положення, що дикі види на конкретних полях культурних видів (сортів) є такими ж індикаторами природних умов на них (трофність ґрунту, зволоженість, кислотність тощо), як і рослини-індикатори типів лісу, степу тощо.

Головна мета людини, як конструктора культурних біоценозів, в ідеалі, спрямувати максимум речовинно-енергетичних ресурсів екосистеми на продукцію культурного автотрофного блоку. Наявність у його складі та у

складі інших блоків більшої чи меншої кількості сторонніх структурних компонентів – рослин-бур'янів, комах-шкідників тощо, свідчить тільки про рівень культури землеробства. Тобто, мова йде винятково про рівень регульованості агроєкосистем із метою підтримання їх найвищої корисної продуктивності з позиції сільгоспвиробника. Ідеальні агроєкосистеми можна спостерігати у розвинутому тепличному господарстві й у гідропонних культурах. Але, очевидно, що за відомими досі класифікаціями вони нікуди не можуть бути вписані.

Рівень керованості агроєкосистемами тією ж мірою стосується й обробітку ґрунту, удобрення, зрошування, знищення шкідливої ентомофауни й інших небажаних складових консументного та редуцентного блоків (Номоконов і Сидоренко, 1980). Не можна також ігнорувати способи й рівень антропогенного вилучення корисної продукції з агроєкосистем. Сукупно ці ознаки дозволили порівнювати агробіогеоценози з *експериментальними біогеоценозами*, а їх створення називають конструкційною фітоценологією. Проте, досі агробіогеоценози не мають науково обґрунтованої та практично придатної класифікації чи типізації.

За узагальненнями Ю. Злобіна (2009) у практиці поширені методологічні підходи класифікації за складом бур'янів на культурних посівах із застосуванням системи Браун-Бланке, за складом культурних рослин, а також інші. На жаль пропонувані класифікації не враховують повною мірою головних структурно-функціональних ознак агроєкосистем: їхньої штучності й керованості людиною. Саме ступінь керованості, котрий можна виразити кількісними обсягами антропогенних дотацій речовин й енергії порівняно із обсягами всієї, з-поміж іншого й вилученої біопродукції, є головним предметом наукових досліджень і практичного інтересу з огляду на потреби оцінки вторинного потенціалу похідних екосистем, якими є агробіогеоценози.

Одним з найдавніших і найпоширеніших способів підвищення біотичної продуктивності агробіогеоценозів є обробіток (розпушування) ґрунту – механічний метод активації такої корисної його функції, як родючість. Окрім того, він створює сприятливіші умови для насіння і проростків культур, а також формування врожаю культурних рослин в конкуренції із рослинними угрупованнями бур'янів, природно присутніми у автотрофному блоці екосистеми. Отже робота, виконана в процесі розпушування ґрунту впродовж одного вегетаційного сезону, виражена в енергетичних одиницях дотації, дає уяву про інтенсивність активації екосистеми таким способом.

Інший, дещо сучасніший спосіб – штучне удобрення ґрунтів органічними чи мінеральними добривами. Обсяг річної ін'єкції в екосистему речовинного (біофільні елементи живлення) та енергетичного (калорійність добрив) компонентів теж суттєво впливають як на позитивні, так і



негативні процеси в них. У регіонах зрошувального землеробства регулярно здійснюють значні дотації води, що супроводжується додатковими затратами енергії на її підведення. У зрошувально-меліоративних агроекосистемах практикують двобічне водорегулювання залежно від надлишку чи дефіциту атмосферних опадів.

Способи вилучення потрібних людині структурних складових продукувального блоку агроекосистем два: випас свійськими тваринами (непрямий) і механічне збирання врожаю (Номоконов, 1980). Повнота відчуження цінної частини фітомаси з їх застосуванням істотно коливається. Можливий ще третій – стихійний шлях: утрата біотичної продукції ерозійним зливом або знищенням пожежами. Виходячи з вищенаведеного, для того, щоб класифікація агроекосистем мала практичне значення (в з-поміж іншого для розрахунку *вторинних екопотенціалів, біотичних потенціалів* тощо), вона повинна відображати рівень керованості ними людиною. На нашу думку, критеріями класифікації з-поміж інших повинні бути: 1) способи й інтенсивність активації продукційної роботи агроекосистем; 2) способи й інтенсивність відчуження матеріальних структурних компонентів агроекосистем й експлуатації їх корисних функцій.

Для прикладу можна виділити *типи агроекосистем за інтенсивністю обробітку* (розпушування) ґрунтів.

1. Неорні землі с.-г. призначення (луки, або сіножаті й пасовища), – пасивна експлуатація родючості.

2. Непостійно і несучільно оброблювані землі (сади, виноградники, хмільники тощо), де застосована періодична активація родючості: лишень у період закладки та сезонно у міжряддях.

3. Суцільно посезонно оброблювані орні землі (рілля), де застосовують глибоку оранку і передпосівний обробіток для культур суцільної сівби з перервою у кілька років у сівозміні з полем багаторічних трав.

4. Суцільно оброблювані орні землі (рілля), де застосовують як глибоку оранку, так і багаторазове суцільне і міжрядне розпушування впродовж вегетаційного періоду (в просапних культурах) або з перервою у кілька років (за присутності у сівозміні поля багаторічних трав).

5. Землі закритого ґрунту (тепліці), де практикують конструювання ґрунтосуміші й експлуатацію її до виснаження із наступною заміною.

Аналогічно можна виділити типи агроекосистем за способами й інтенсивністю удобрення і водорегулювання, способами, періодичністю й обсягами внесення насіння (садивного матеріалу) – сівби (садіння), способами, повнотою й обсягами вилучення продукції тощо.

Для агробіогеоценозів із великими обсягами біотичної продукції та її вилучення, інтенсивними антропогенними дотаціями, сформованих як монокультурні (один, рідше два-три сорти або культури) посіви на перший



план виходять екологічні особливості й біотичний потенціал виду чи сорту саме тієї культури, яка є морфоструктурною основою автотрофного блоку.

Монокультурні одно-, дворічні посіви, обмежені територіально, є елементарними екосистемами, створеними й керованими людиною для отримання максимальної господарської продукції упродовж одного, рідше двох і більше річних циклів. Такі агроекосистеми найнижчого рангу належать до третього і четвертого типу за інтенсивністю обробітку ґрунту і з технологічних міркувань їх об'єднують у сівозміни. Якщо ці сівозміни, а також технології культур науково обґрунтовані та їх практикують постійно, то їх можна розглядати як агроекосистеми наступного рангу. З вищенаведеними ознаками вони будуть відносно стабільними у просторі, оскільки займають визначені за площею поля, і стабільними в часі, тому що мають точний цикл ротації визначеного набору культур. Ці ж особливості спричиняють відносно сталий і передбачуваний за структурою й обсягами вихід біотичної продукції і господарського урожаю за одну ротацію сівозміни, а також стабільні технологічно зумовлені обсяги дотацій (насіння, добрива, хімічні засоби захисту рослин, паливо, робота машин і людей тощо).

Не менш складним та актуальним є ефективне керування урбаністичними й фітомеліоративними напівштучними або цілком рукотворними екосистемами, які вже створюють і на стінах, і на дахах будинків і які покращують якість навколишнього середовища. За В. Кучерявим (20) антропогенний чинник призвів до перетворення (*гемеробізації*) природних екосистем до різної глибини, аж до їх практичної ліквідації (рис. 8.5).

Тому підтримання трансформованого, чи створення заново й культивування штучного рослинного покриву здійснюють на наукових засадах фітомеліорації довкілля. Фітомеліоративні екосистеми, що розвиваються на порушених територіях, потребують значної уваги, особливо на землях, де знищений, а згодом по-можливості відновлений, або й ні, ґрунтовий покрив. Зелені зони міст і сіл, як специфічні ландшафтні екосистеми, окрім агротехнічних заходів підтримання у функціональному стані, ще потребують компетентного архітектурно-дизайнерського піклування про їхній естетико-пізнавальний ефект.

Отже, на відміну від природних саморегульованих систем, аграрні, фітомеліоративні й урбаністичні екосистеми є практично штучно сконструйованими й регульованими. У зв'язку з цим, господарська і соціальна ефективність функціонування таких системи залежить від того, наскільки детально вивчені структурно-функціональні властивості природних її компонентів, наскільки вдало поєднані з ними особливості культивованих рослин, та наскільки ефективно здійснюватиметься цілеспрямоване регулювання екофункцій і біотичних процесів у керованій екосистемі. Загалом все залежить від того, наскільки кваліфікованим і компетентним є фахі-

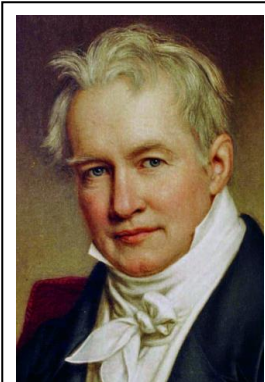
вещь, і наскільки розумно, науково обґрунтовано він впливатиме на формування запланованих структурних і функціональних параметрів штучної системи.



Рис. 8.5. Моніторинг багаторічної динаміки трансформації модельного лісового ландшафту Західної Австралії унаслідок освоєння угідь під пасовища для овець

8.6. Концепція екосистемних послуг та їхня суть

На основі своїх експедиційних досліджень та висновків Александр Гумбольдт пропонує теорію для опису всього фізичного світу: "Космос – чернетка фізичного опису світу". Він досліджує, як ґрунт і клімат впливають на ріст рослин, та екстраполює системні зв'язки на всю природу, як на "... ціле, що рухається та оживляється внутрішніми силами". Тому і людина повертається до природи та стає частиною великої системи, яка об'єднує все. Відродження інтересу до А. Гумбольдта підживлюється, зокрема, його роздумами про важливість збереження довкілля. Вчений-натураліст під час експедицій до Південної Америки зауважив зв'язок між надмірною експлуатацією лісу та висиханням озер, що знаходяться



Александр
фон Гумбольдт
(1769-1859)

в єдиному ландшафті. На підставі цих праць А. Гумбольдта вважають одним із батьків сучасної екології та першовідкривачів феномену екосистемних послуг.

Концепція екосистемних послуг набула великої популярності за правління у США Білла Клінтона (Baveye, Baveye and Gowdy, 2016), який схилявся покладатися на ринкові важелі в екологічній політиці та в прагненні до сталого розвитку. Звіт його уряду на 170-сторінках ґрунтується на переконанні, серед іншого, що "... економічне зростання на основі технологічних інновацій, підвищення ефективності та розширення глобальних ринків має важливе значення для прогресу до процвітання, справедливості та якості навколишнього середовища". Проте, з часом екосистемні послуги трактували по різному. В результаті дисонансу концепцій, згода залишалася недосяжною, а також щодо відповідних методів пов'язування цін з екосистемними послугами в значущий спосіб.

Консенсусу, принаймні щодо визначення ключових термінів, було досягнуто майже через десять років у рамках масштабних міжнародних зусиль Millennium Ecosystem Assessment (MEA), багаторічної міжнародної ініціативи, яка охопила 1300 вчених з усього світу для оцінки наслідків зміни екосистем та подальших змін у потоці екосистемних послуг.

У звіті MEA екосистемні послуги визначені як "вигоди, які люди отримують від екосистем". Крім уточнення значення цієї термінології, MEA, значною мірою натхненний низкою попередніх спроб (de Groot et al., 2002), також запропонував чітку номенклатуру екосистемних послуг, яка швидко стала нормою в цій галузі. Він розрізняє чотири широкі категорії екосистемних послуг (рис. 8.6): послуги забезпечення, що охоплюють усі продукти, отримані з екосистем; допоміжні послуги, необхідну для виробництва всіх інших екосистемних послуг; регуляційні послуги, включаючи всі вигоди, отримані від регулювання екосистемних процесів; "перелік нематеріальних вигод" (Orenstein, 2013) або "нематеріальних вимірів" (Setten et al., 2012), які називають "культурними" послугами та передбачають нематеріальні вигоди. Їх люди отримують від екосистем через духовне збагачення, когнітивний розвиток, роздуми, відпочинок та естетичний досвід (Chan et al., 2012; Milcu et al., 2013).

Забезпечення – це матеріальні блага, які люди можуть отримати з навколишнього середовища, такі як їжа, деревина та волокно, вода та паливо. **Регулювання** – це регульовальні послуги, які відбуваються в екосистемі, що призводить до таких переваг, як регулювання клімату, управління повеннями та фільтрація води. **Культурні** – вони включають способи впливу природи на здоров'я та добробут людей через відпочинок та освіту, а також покращення психічного здоров'я та встановлення духовних зв'язків. **Підтримка** – екосистеми не могли б функціонувати без допоміжних послуг, таких як кругообіг поживних речовин, формування

грунту та забезпечення середовища існування для біорізноманіття, що є основою для інших трьох типів послуг.



Рис. 8.6. Схема групування екосистемних послуг (Orenstein, 2013)

Цілісну раніше категорію "допоміжні послуги" було розділено на "послуги середовища проживання" та "функції екосистеми", останні визначені "... як підмножина взаємодій між структурою екосистеми та процесами, які підтримують здатність екосистеми надавати продукцію та послуги". Остання спроба стандартизувати визначення екосистемних послуг стала результатом роботи з екообліку, проведеної Європейським агентством з навколишнього середовища (ЕЕА).

Розроблена 2009 року, вона стала відома як "Загальна міжнародна класифікація екосистемних послуг" (CICES, веб-сайт: <http://cices.eu>). Ця остання схема включає три основні категорії екосистемних послуг – "надання", "регулювання/обслуговування", "культурні". Така класифікація

спирається на п'ятирівневу ієрархічну структуру, запропоновану як спосіб вирішення деяких проблем, що виникають у зв'язку з конкретними просторовими та тематичними масштабами, які використовують у різних програмах. Ієрархія сформована зверху вниз із секцій, підрозділів, груп, класів і типів класів.

Центральна структура (SEEA) є міжнародним статистичним стандартом для вимірювання навколишнього середовища та його зв'язку з економікою. Центральна структура охоплює вимірювання в трьох основних областях:

1) Екологічні потоки – потоки природних ресурсів, продуктів і відходів між навколишнім середовищем і економікою, а також всередині економіки, як у фізичному, так і в грошовому вираженні.

2) Запаси екоактивів – запаси окремих активів, таких як водні або енергетичні активи, і те, як вони змінюються протягом звітного періоду через економічну діяльність і природні процеси, як у натуральному, так і в грошовому вираженні.

3) Господарська діяльність, пов'язана з навколишнім середовищем. Грошові потоки, пов'язані з економічною діяльністю, пов'язаною з навколишнім середовищем, включаючи витрати на захист навколишнього середовища та управління ресурсами, а також виробництво "екологічних товарів і послуг".

Центральна структура SEEA об'єднує в єдиній системі вимірювання інформацію про воду, мінерали, енергію, деревину, рибу, ґрунт, землю та екосистеми, забруднення та відходи тощо. Центральна структура SEEA складається з низки різних облікових записів, усі з яких інтегровані та об'єднують інформацію в одну узгоджену систему. Уряди країн зобов'язані створити такі ж свої статистичні системи. Остаточна офіційна версія Центральної бази SEEA була опублікована в лютому 2014 року. 2024 року Статистична комісія Організації Об'єднаних Націй схвалила запропоноване оновлення SEEA 2012 (Рішення 55/109(a) від E/CN.3/2024/36).

Аграрне господарство є домінуючою формою освоєння земельних ресурсів, а агроєкосистеми в усьому світі охоплюють майже 40% суходолу Землі (FAO 2025). Агроєкосистеми є як постачальниками, так і споживачами екосистемних послуг (рис. 8.7).

Люди цінують ці екосистеми, головне, за їхні послуги забезпечення. Високочеревані агроєкосистеми розроблені для забезпечення продуктами, фуражем, целюлозою, біоенергією та фармакопейною сировиною. Агроєкосистеми сильно залежать від набору екосистемних послуг, які надають природні, некеровані екосистеми – природне середовище.

Допоміжні природні послуги охоплюють генетичне біорізноманіття диких рослин і тварин, формування та структуру ґрунту, родючість ґрунту,

кругообіг поживних речовин і забезпечення водою. Регулюючі послуги сільському господарству можуть надавати запилювачі та природні вороги, які переселяються в агроекосистеми з природної рослинності. Природні екосистеми також можуть очищати воду та регулювати її потік у агросистеми, забезпечуючи ріст рослин.



Рис. 8.7. Вплив управління фермою та ландшафтного менеджменту на потоки екосистемних послуг і збитків від агроекосистем

Традиційно агроекосистеми розглядали переважно як джерела послуг, але останнім часом було визнано їхній внесок, як інші типи екосистемних послуг (MEA 2005).

Під впливом керованості екосистемних процесів в аграрних системах вони можуть надавати послуги, які підтримують послуги забезпечення, включаючи запилення, боротьбу зі шкідниками, генетичне різноманіття для майбутнього аграрного використання, захисту ґрунту, регулювання його родючості та кругообігу поживних речовин. Чи буде якась конкретна аграрна система надавати такі послуги на підтримку забезпечення, залежить від її ієрархічного становища та потужності, а також від менеджменту.

Можуть відбуватися негативні впливи, включаючи втрату середовища існування для збереження біорізноманіття, змив поживних речовин, замулення водних шляхів і отруєння пестицидами людей і нецільових видів (Zhang et al., 2007 і 2013). Оскільки виробнича практика може завдати шкоди біорізноманіттю кількома шляхами, аграрне виробництво вважають дуже шкочинним щодо нього, але сучасні технології можуть пом'якшити багато невідворотних наслідків.

Агроекосистеми можуть надавати низку інших регулюючих і культурних послуг. З-поміж них боротьба з повеннями, контроль якості води, депонування вуглецю та регулювання клімату через викиди парникових газів, регулювання хвороб та переробку відходів (наприклад, поживних речовин, пестицидів). Культурні послуги включають мальовничі аграрні крайобрази, освіту, відпочинок і агротуризм.

У всьому світі агроекосистеми демонструють величезну варіативність, тому їхня різноманітність має великий перелік і кількість екосистемних послуг. Зруйновані ландшафти, але перетворені аграрні екосистеми, можуть повторно надавати важливі екосистемні послуги, але багато сільськогосподарських систем також можуть бути важливими джерелами послуг.

Важливі є екосистемні послуги, що надходять агроекосистем ззовні від природного довкілля або нативних екосистем, які оточують поле, агроландшафт. Винятково важливим є біотичний контроль шкідників природними ентомофагами. Біотичний контроль комах-шкідників забезпечують некультурні середовища існування членистоногих хижаків і паразитоїдів, комахоїдних птахів і кажанів, а також мікробних патогенів, які діють як природні вороги для шкідників культурних рослин в агроекосистемах (Tscharntke et al., 2005). Ці служби біотичного контролю можуть зменшити популяції комах-шкідників і бур'янів в агроекосистемах, що зменшиться потреба в пестицидах. Наприклад, аналіз вартості пригнічення природних ворогів лише одного шкідника – соєвої попелиці, на сої показав, що така послуга середовища досягла щонайменше 239 млн \$ в чотирьох штатах США в 2007–2008 роках (Landis et al., 2008). Дослідження показують, що комахи-хижаки та паразитоїди забезпечують приблизно 33% природної боротьби зі шкідниками, тому усю вартість послуг боротьби зі шкідниками із використанням природних ворогів комах, оцінюють у 4,5 млрд \$ на рік (Losey & Vaughan, 2006).

Запилення є ще іншою важливою екосистемною послугою для агрофітоценозів. Приблизно 65% видів усіх рослин потребують запилення тваринами, а 75% видів аграрних культур, які мають глобальне значення для виробництва продуктів, залежать від запилення тваринами, головним чином комахами (Klein et al., 2007). 40% видів – це дикі запилювачі, часто на додаток до одомашнених медоносних бджіл (Radchenko & Pesenko, 1994).

Виробництво 87 глобально важливих культур зменшать продуктивність на 3–8%, а за оцінкою (Gallai et al., 2009) на 9,5% у разі втрати природних запилювачів. Культури кава, какао та чай, горіхи, фрукти та їстівні олійні культури є особливо вразливими до втрати послуг запилення. Позитивний вплив запилення комахами на світове виробництво продуктів у 2005 році в 162 країнах-членах ФАО оцінюють у 153 млрд € (Gallai et al., 2009).



Кількість і якість циркулюючої в екосистемах достатньої кількості чистої води є важливою екопослугою, що надається агроекосистемам. На аграрне виробництво припадає близько 70% світового використання води. Багаторічна рослинність у природних екосистемах, таких як ліси, може регулювати захоплення, інфільтрацію, утримання та потік води через ландшафт. Угруповання рослин і покрив загалом відіграють центральну роль у регулюванні потоків води, утримуючи ґрунт, змінюючи структуру ґрунту та створюючи мульчу у вигляді опаду (рис. 8.8). Лісові ґрунти, як правило, мають більш високий рівень інфільтрації, ніж інші ґрунти, і ліси, як правило, зменшують пікові потоки та повені, зберігаючи базові стоки (Maes et al., 2009).

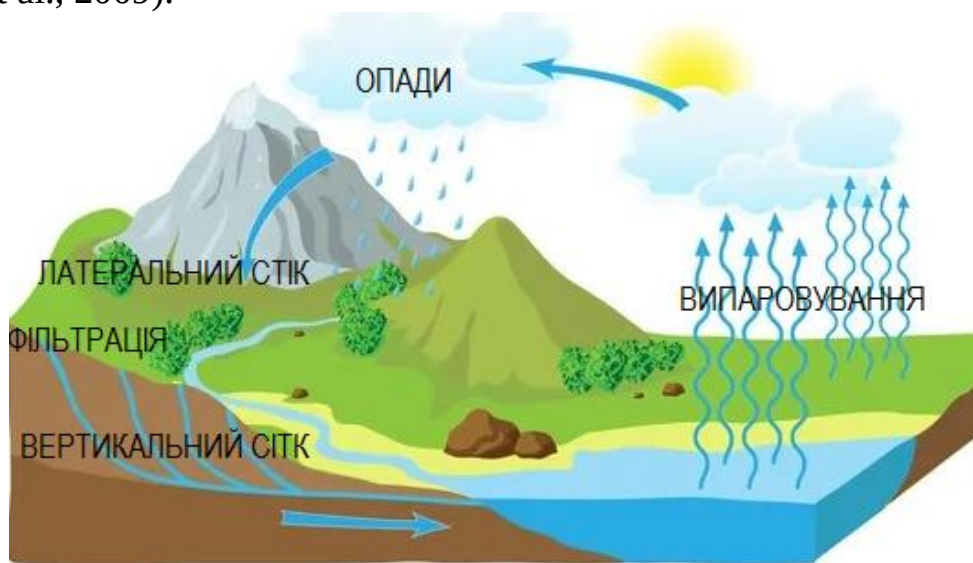


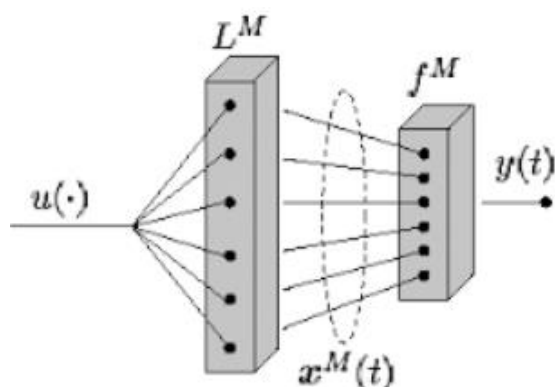
Рис. 8.8. Схема циркуляції води в біосфері, яка забезпечує її перманентне очищення від солей і забруднення завдяки постійному проходженню через екосистеми

Завдяки гідравлічному підйому та вертикальному підйому види рослин, які глибоко вкорінюються, можуть покращити доступність води та поживних речовин для інших видів в екосистемі. Крім того під рослинним покривом, швидкість ерозії ґрунту зазвичай низька, що забезпечує хорошу фізико-хімічну якість води.

Запас вологи в агроекосистемах залежить не тільки від інфільтрації та опадів, але й від утримання води в ґрунті. Запас води в ґрунті регулюється рослинним покривом, органічною речовиною ґрунту та біотичним угрупованням ґрунту (бактерії, гриби, дощові черв'яки тощо). Захоплення відкладень і ерозія контролюються рослинним покривом на поверхні ґрунту або під нею, кількістю поверхневого підстилки та швидкістю розкладання підстилки. Безхребетні, які пересуваються між ґрунтом і шаром підстилки, впливають на рух води в ґрунті, а також на відносну кількість інфільтрації та стоку.

Є прогноз, що зі зміною клімату та мінливістю кількості опадів постане ризик посух (D'Odorico, Laio Ridolfi, 2006) та повеней, тоді як підвищення температури призведе до збільшення потреби у воді. Оцінками доступності води для аграрного господарства часто нехтують, але прогнози щодо ресурсів води в 2050 році сильно залежать від включення водних послуг екосистем. Водночас, понад 6 млрд людей відчуватимуть дефіцит води до 2050 року, якщо брати до уваги лише підземну (артезіанську) воду. Ця цифра зменшується приблизно до 4 млрд, якщо брати до уваги наявність підземної та екосистемної води (Rokstrem et al., 2009).

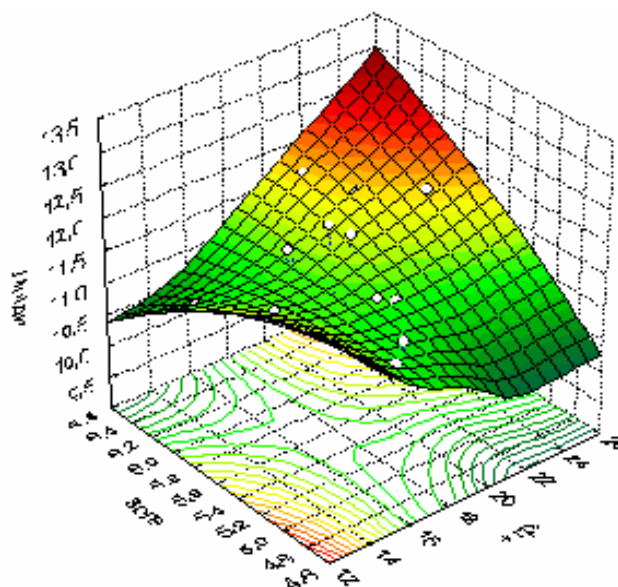




Частина II

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ В АГРОЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННІ

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x - \bar{X})^2}$$



9.1. Основні види, об'єкт і предмет системного аналізу в агроекології

Аналіз як загальне поняття – це *дослідницька* (у найширшому сенсі) *діяльність* за допомогою уявного або реального розчленування системи на структурні, організаційні чи функціональні складові для досягнення їхньої суті. Фактично системний аналіз організовує наші знання про об'єкт так, щоб допомогти вибрати потрібну стратегію або передбачити результати однієї або кількох стратегій, які представляються доцільними тим, хто повинен ухвалювати й виконувати рішення. У найбільш вдалих випадках стратегія, знайдена за допомогою системного аналізу, виявляється "найкращою" для розв'язання проблем за певної ситуації (Imboden & Pfenninger, 2013).



Системний аналіз – це методологія пізнання світу, що охоплює сукупність методів, прийомів та алгоритмів застосування системного підходу в аналітичній діяльності.

Розрізняють також дослідницький (у вузькому науковому сенсі) системний аналіз, котрий будують як дослідження для поглиблення знань про природу і подальшого використання результатів для удосконалення власне науки.

Виділимо *загальний аналіз системний*, який спирається на загальну теорію систем і його здійснюють із найзагальніших системних позицій. Цей новий науковий напрям інтеграційного типу займає певне місце в структурі сучасних системних досліджень. Структура системного аналізу (рис. 9.1) охоплює і певним чином взаємопов'язує (показано стрілками) такі блоки:

- 1) системні дослідження;
- 2) системний підхід;
- 3) конкретні системні концепції;

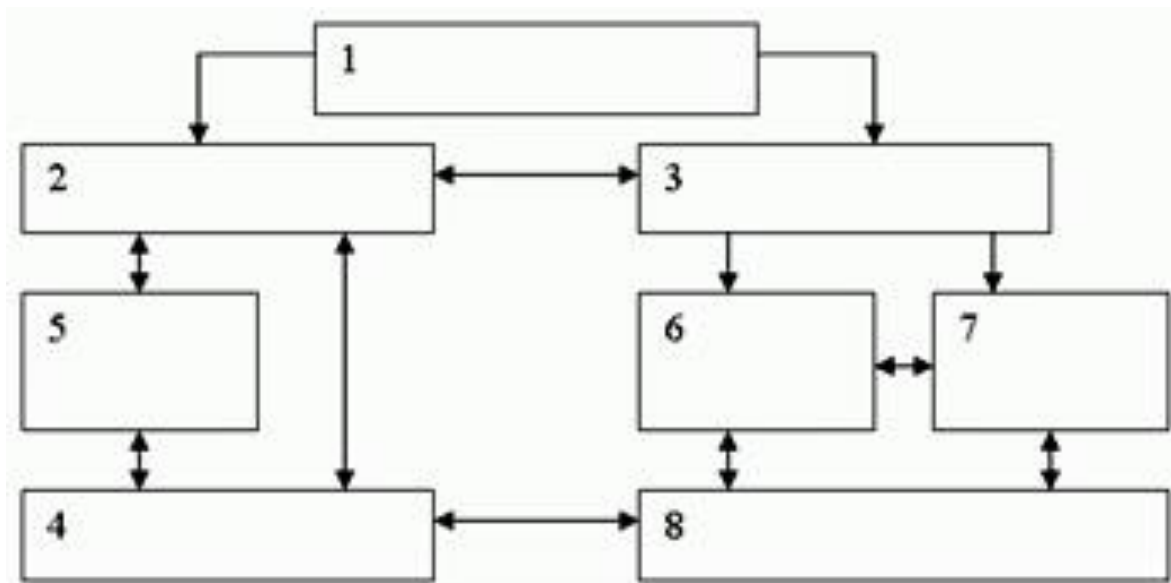


Рис. 9.1. Системний аналіз (пояснення в тексті)

4) загальна теорія систем (метатеорія відносно до конкретних систем);

5) діалектичний матеріалізм (філософські проблеми системних досліджень);

6) наукові системні теорії та моделі (вчення про біогеосферу; теорія ймовірностей; кібернетика й ін.)

7) технічні системні теорії та розробки – дослідження операцій, системотехніка, системний аналіз та ін.;

8) спеціальні теорії системи.

Наведемо визначення й тлумачення найпоширеніших видів системного аналізу.

Аналіз системний прикладний є специфічним різновидом практичної діяльності для використання результатів із практичною метою.

Аналіз системний спеціальний спирається на спеціальні теорії систем і бере до уваги специфіку природи систем.

Аналіз програмно-цільовий застосовують для вироблення програми досягнення певної мети або розроблення докладної моделі досягнення майбутнього.

Аналіз ретроспективний – аналіз систем у їх минулому та їхній розвиток і вплив на минуле й історію.

Аналіз ситуаційний ("Метод Case study" або "кейс-метод") – різновид аналітичної діяльності, побудований на описі ситуації та докладному аналізі цього опису.

Аналіз структурний – це аналіз структури системи як сукупності зв'язків між її частинами, з'ясування значення окремого елемента для певним чином структурованого цілого.

Аналіз структурно-функціональний передбачає виділення елементів взаємодії та визначення їх місця й ролі у функціонуванні системи.

Аналіз функціональний пояснює явища виконуваних ними функцій.

Аналіз причинно-наслідковий має за мету встановлення причин, які призвели до виникнення певної ситуації, та наслідків їх розгортання.

Аналіз прогностичний – це підготовка прогнозів і шляхів їх реалізації щодо вірогідного, потенційного й бажаного майбутнього.

У системному аналізі завжди присутня **аналітична модель**, яка втілює уявний образ, що дозволяє аналізувати відображений нею об'єкт.

Усі наведені види аналізу можна й потрібно застосовувати в екології як науці, у вивченні й оцінці екологічної ситуації та для збереження довкілля.



Об'єктом системного аналізу в екології виступають реальні явища і процеси у природі й суспільстві, а також їхні взаємовпливи, які розглядають як системні.

Предмет системного аналізу в екології охоплює всі важливі для людини аспекти взаємодії у мегасистемі "природа-суспільство", які є чинниками актуального стану нашого довкілля і його перспективи.

Найважливіші з них:

- ✓ актуальний дієвий склад екосистеми (типи, кількість і вагомість компонентів, залежність компонента від його місця і функцій у системі, види підсистем, їх властивості, дія на властивості цілого);

- ✓ ефективна структура екосистеми (типи і складність структур, різноманіття зв'язків, прямі й зворотні зв'язки, ієрархічність структури, дія структури на властивості й функції системи);

- ✓ стійка організація екосистеми (темпоральний і просторовий аспекти стійкості);

- ✓ динамічна організація, гомеостаз, механізми стійкості організаційної структури;

- ✓ сталість функціонування екосистеми, поведінка в умовах критичних ситуацій, механізми функціонування, гармонія і суперечності внутрішніх і зовнішніх функцій, проблема оптимальності функціонування і ресурси перебудови функцій;

- ✓ статус екосистеми в природному середовищі (межі системи, властивості середовища, відкритість, рівновага, збалансованість, механізми взаємодії системи і природного довкілля, адаптивність системи, зовнішні чинники і збурювальні дії, з-поміж іншого й антропогенні);

- ✓ ієрархічний статус екосистеми в геосоціальному середовищі (освоєні, перетворені й штучні екосистеми, механізми взаємовпливу екологічних, соціальних та економічних систем);

✓ еволюція та перспектива екосистеми, з-поміж іншого і біогеосфери (системотвірні чинники, траєкторії, етапи і джерела розвитку, процеси в системі – інтеграція і дезінтеграція, дивергенція, ентропія, негентропія, кризовість, хаос і **зникнення**, самовідновлення, роль випадковості).



Об'єктом системного аналізу в агроекології є реальні явища і дії, що утворюють технологічний процес, а також їхні взаємовпливи, які визначають результат продукційної функції, баланс його підтримання відтворення природного довкілля.

Предмет системного аналізу в агроекології охоплює всі важливі для людини аспекти взаємодії у мегасистемі "природа-суспільство", які є чинниками актуального стану агросистеми, нашого довкілля і його перспективи.

Чому системний аналіз потрібно використовувати в агроекології й захисті довкілля?

Агрокологія, як наука, складна сама собою, вивчає різноманітні взаємодії між безліччю організмів і неживих об'єктів, втручанням у процеси людини тощо. Майже всі екосистемні явища динамічні – вони залежать від часу і постійно змінюються. Більш того, взаємодії часто мають ту особливість, яку в системології називають "зворотним зв'язком". Це означає, що деякі ефекти процесу "повертаються" до свого джерела або до попередньої стадії, внаслідок чого ці ж ефекти можуть посилюватися або видозмінюватися. Зворотні зв'язки бувають позитивними (посилення ефекту) і негативними (ослаблення ефекту). Сам зворотний зв'язок може бути дуже складним, включаючи ряд позитивних і негативних результатів, а загальні наслідки можуть ще й залежати від неврахованих чинників зовнішнього середовища. Особливо це стосується властивостей оброблюваного ґрунту.

З іншого боку, живі організми, як системотвірні елементи, самі є мінливими. Коли до цього додаються зміни таких чинників середовища, як клімат і властивості місця проживання, дослідження або регулювання екопроцесів і екосистем перетворюються на дуже складне завдання. Аналіз навіть відносно сталої агроекосистеми вельми складний.

Найпоширеніша стратегія агроеколога полягає зазвичай у тому, що він зосереджує свою увагу на деяких окремих аспектах реальної великої проблеми.



Проблема – це складна теоретична або практична ситуація, яка потребує вирішення, але за наявних знань чи засобів воно є не можливим.

Коли в агроекологічному дослідженні розглядають результати навмисної дії на екосистеми експериментатора, вводять ще один або кілька додаткових чинників мінливості та взаємодії. Експерименти поширені у інших прикладних галузях – лісовій екології, гідроекології та ін.

Наприклад, екологічні дослідження в галузі землеробства і садівництва пов'язані головним чином з обліком урожаю, а його отримують лише раз на рік. Щоби з'ясувати оптимальну екобезпечну й економічно обґрунтовану норму добрив, отрутохімікатів чи випробувати інші комплексні прийоми агротехніки, може знадобитися кілька років. Особливо це важливо, коли потрібно розглядати взаємозв'язок між експериментальними результатами і погодою, або простежувати рух екологічно небезпечного компонента у біогеохімічному циклі чи ланцюгах живлення. У лісівництві через тривалі цикли вирощування деревини експерименти займають мінімум 25 років, а звичайно від 40 до 120 років. Аналогічні часові масштаби часто потрібні і для проведення регіональних комплексних досліджень природних і соціальних ресурсів.

З усіх цих причин, тобто через внутрішню складність екологічних взаємозв'язків, властивої для живих організмів мінливості й очевидної непередбачуваності результатів постійних дій на екосистеми з боку людини, екологи необхідно упорядкувати і логічно організувати свої дослідження. Прикладний системний аналіз дає можливу схему такої організації – схему, в якій експериментування є складовою частиною процесу моделювання системи, так що складність і мінливість зберігаються в тій формі, в якій вони піддаються аналізу.

9.2. Класичний алгоритм системного аналізу

Єдиного алгоритму системного аналізу немає і створити такий неможливо. Але існують певні правила його організації, які надають змогу вирішувати проблеми, що виникають у практичній діяльності. Вони передбачають порядок виконання системного аналізу, процедури та засоби, які використовують на його певних етапах.

Системний аналіз у вирішенні практичних завдань екології традиційно (Джефферс, 1981) має сім етапів (рис. 9.2).

Розглянемо зміст етапів системного аналізу.

Проблема чи проблемна обставина виникає тоді, коли у людей з'являється усвідомлення того, що нас не задовольняє та, чи інша ситуація, тенденція, перспектива, і зрозумілим стає невідкладність її вирішення. **Вибір проблеми** (І етап) є результатом вибору головних цінностей у суспільстві.

Визнання того, що існує деяка проблема (або сукупність взаємопов'язаних проблем), яку можна досліджувати за допомогою системного

аналізу, і яка цілком важлива для детального вивчення, не завжди виявляється тривіальним кроком. Усвідомлення того, що дослідження справді необхідне, настільки ж важливе, як і **вибір методу** дослідження.

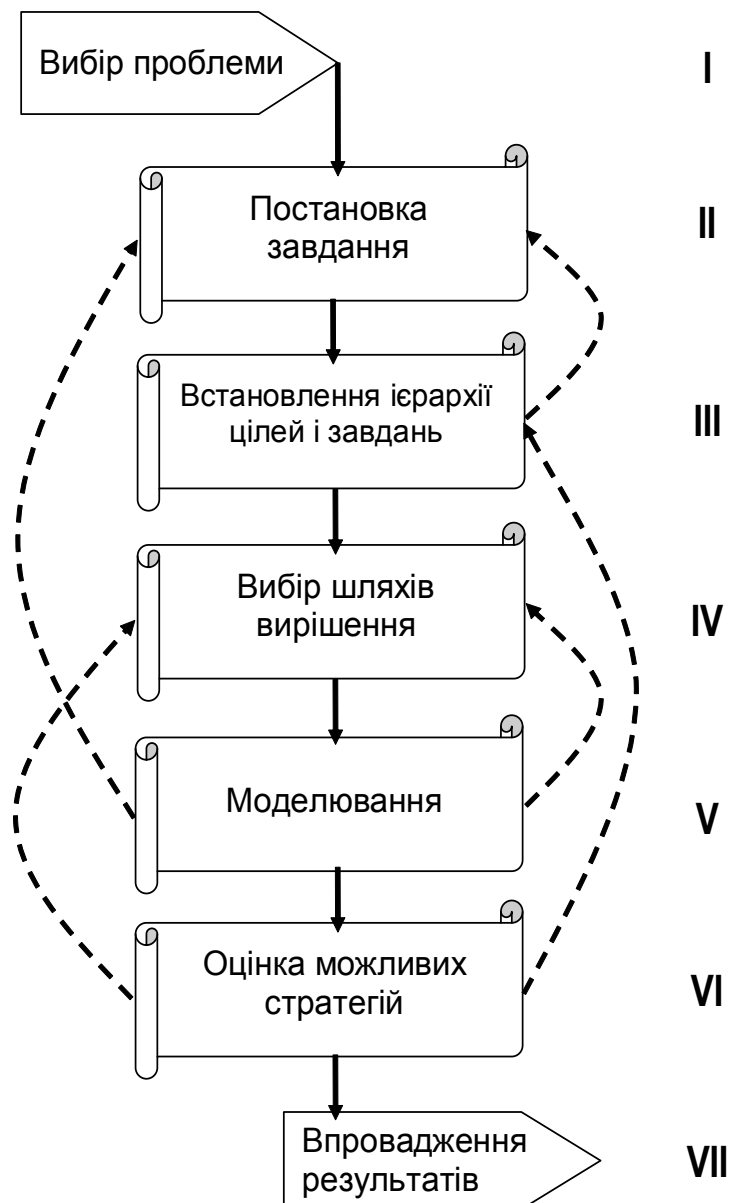


Рис. 9.2. *Етапи системного аналізу та їх взаємозв'язок*

З одного боку, можна взятися за вирішення проблеми, що не піддається системному аналізу, а з іншого – вибрати проблему, яка не вимагає для свого вирішення усієї потужності системного аналізу, і вивчати яку цим методом було би розкішшю. Така дилема першого етапу робить його критичним для успіху або невдачі всього дослідження.

Якщо існування проблеми усвідомлене, а її вирішення невідкладне, постає потреба сформулювати завдання (II етап). Воно має бути настільки простим, щоби мати аналітичне рішення за збереження всіх тих елементів, які роблять проблему досить актуальною для практичного вивчення. Тут

ми знову маємо справу з критичним етапом будь-якого системного дослідження.

Висновок про те, чи варто розглядати той або інший аспект проблеми, а також результати зіставлення значущості конкретного аспекту для аналітичного віддзеркалення ситуації з його роллю в ускладненні завдання, яке сповна може зробити її нерозв'язною, часто залежить від набутого досвіду аналітиків у використанні системного аналізу. Саме на цьому етапі фахівець із системного аналізу може зробити найвагоміший внесок у вирішення проблеми. Успіх або невдача конкретного системного аналізу багато в чому залежать від тонкої рівноваги між спрощенням і ускладненням – рівноваги, за якої збережені всі зв'язки з вихідною проблемою, достатні для того, щоб аналітичне рішення піддавалося інтерпретації.

Після постановки завдання й обмеження міри його складності приступають до **встановлення мети і завдань** дослідження (III етап). Зазвичай мета і завдання утворюють деяку ієрархію. Причому як мета, так і основні завдання послідовно підрозділяють на першочергові й другорядні. Генеральну мету методом декомпозиції розділяють на дерево цілей. У такій ієрархії необхідно визначити пріоритети різних стадій і зіставити їх із тими зусиллями, які потрібні для досягнення поставлених цілей. Тож у складному дослідженні фахівець із системного аналізу може надати порівняно малий пріоритет тим цілям і завданням, які, хоч і важливі для здобуття інформації, але відносно слабо впливають на вигляд рішень, які будуть прийняті відносно дій на екосистему і керування нею. В іншій ситуації, коли певне завдання становить частину програми якогось фундаментального дослідження, аналітик свідомо обмежений певними формами керування і концентрує максимум зусиль на завданнях, які безпосередньо пов'язані з самими екологічними процесами. У будь-якому разі, для результативного застосування системного аналізу дуже важливо, щоби пріоритети, надані різним завданням, були чітко визначені.

Дослідник-аналітик повинен **вибрати шляхи (способи) вирішення проблеми** (IV етап). Ці шляхи або способи залежать від обсягу знань і матеріально-технічних засобів, що є в арсеналі системного аналітика. Як правило, для будь-якого системного аналізу на початку потрібен вербальний опис проблеми, який повинен окреслити певну піддослідну систему. Це може відразу спрямувати на вибір усього пакету можливих методів і засобів аналітичної роботи (різноманітних моделей і способів їх відображення). У загальному випадку аналітик шукатиме найзагальніше аналітичне рішення, оскільки це дозволить максимально використовувати результати дослідження вже виконаних аналогічних завдань і результативний математичний апарат. Найпростіші моделі описують системи у загальному вигляді, складніші дають змогу вивчити всі особливості конкретної системи. Формальні моделі – це опис спеціальних ознак типу моделі. На основі

формальних моделей аналітик створює змістовні моделі, в які вкладає одержані знання щодо конкретної системи. За допомогою новостворених моделей вивчають процеси у системі, її перспективи.

Після того, як проаналізовані вірогідні методологічні й методичні альтернативи, можна приступати до **моделювання** (V етап) – активних маніпуляцій із копіями й відображеннями систем, або модельних досліджень чи експериментів зі складними динамічними взаємозв'язками між різними аспектами проблеми. При цьому потрібно пам'ятати, що модельованим процесам, а також механізмам зворотного зв'язку властива внутрішня невизначеність, а це може значно ускладнити як розуміння системи, так і її керованість. Крім того, в самому процесі моделювання потрібно враховувати складну низку правил, яких необхідно буде дотримуватися при виробленні рішення про відповідну стратегію. На цьому етапі не потрібно надто захопитися дотепністю і витонченістю математичної моделі, в результаті чого можуть бути втрачені всі точки дотику між реальним процесом ухвалення рішень і математикою, покликаною визначити можливі наслідки цих рішень.

Як тільки моделювання доведене до стадії, на якій модель можна (принаймні, заздалегідь) використовувати, починається **оцінювання потенційних стратегій**, отриманих із моделі (VI етап). У ході цієї роботи досліджують чутливість результатів до припущень, зроблених за побудови моделі, оскільки правомірність цих припущень можна перевірити лише в процесі використання моделі. Якщо виявиться, що основні припущення некоректні, можливо, доведеться повернутися до етапу моделювання, але часто вдається поліпшити модель, трохи модифікувавши вихідний варіант. Зазвичай потрібно також досліджувати "чутливість" моделі до тих аспектів проблеми, які були вилучені з формального аналізу на II етапі, тобто коли було поставлене завдання і був обмежений ступінь її складності.

Завершальний етап (VII) системного аналізу – це **практичне впровадження результатів**, які були отримані на попередніх етапах. Системний аналіз не можна вважати завершеним доти, поки дослідження не дійде до стадії практичного впровадження, управлінського чи виробничого використання – перевірки ефективності розробки для вирішення виниклої проблеми. На останньому етапі може виявитися неповнота тих або інших стадій або необхідність перегляду всієї роботи. Може знадобиться проходження якогось із раніше завершених етапів.

Прикладний системний аналіз може мати стільки специфічних алгоритмів, скільки є сфер наукової і практичної діяльності. Відомі системні аналітики С. Оптнер, С. Янг, М. Федоренко, С. Ніканоров, Ю. Черняк, Ф. Перегудов і Ф. Тарасенко й ін. запропонували свої схеми. Вони відрізняються за змістом, формою й акцентами, інколи містять як формальні (кількісні), так і

неформальні (якісні) методи. Проте загалом усі пропонувані схеми подібні за своєю функціональною сутністю й результативністю.

9.3. Методи неформального системного аналізу

Важливою фазою будь-якого системного аналізу є генерування альтернатив, тобто гіпотез про можливі шляхи та способи досягнення визначеної мети. Генерування альтернатив є творчим процесом. У ньому застосовують різні **неформальні (якісні) методи** (процедури): метод мозкового штурму, SWOT-аналіз, метод Дельфі, методи експертних оцінок, сценарний аналіз, метод комісії тощо.

Від 50-х років ХХ ст. почали використовувати **метод мозкового штурму** ("конференція ідей" і "колективна генерація ідей" для глибокого та швидкого вивчення проблеми у вузьких сферах чи напрямках. Спочатку здійснюють групування завдань з використанням універсального методу сканування. Цей етап завжди використовують для першого осмислення виниклої проблеми у найширшому спектрі підходів для розв'язання проблеми, коли відсутній попередній практичний досвід її опрацювання. Суть методу мозкового штурму зводиться до того, що експертам надається повна свобода мислення і висловлювання нових ідей. Розглядають всі генеровані ідеї, не допускається критика і не припиняється обговорення жодної ідеї. З цією метою створюють атмосферу, котра сприяє генерації нетривіальних ідей і звільняє експертів від стереотипного мислення.

Процедура методу мозкового штурму має такий вигляд:

- 1) вузьке формулювання завдання;
- 2) створення групи вузьких фахівців;
- 3) генерування (часто анонімне) множини ідей та підходів;
- 4) групування відібраних ідей на актуальні й перспективні, відбір актуальних рішень;
- 5) документування ідей, придатних для використання в роботі.

Метод вивчення сильних і слабких сторін організації, можливостей і загроз її діяльності називають **SWOT-аналізом**. Це метод стратегічного планування, що використовують для оцінки факторів і явищ, котрі впливають на проект або підприємство. Всі чинники ділять на чотири категорії: *strengths* (сильні сторони), *weaknesses* (слабкі сторони), *opportunities* (можливості) і *threats* (загрози). Метод включає визначення мети проекту та виявлення внутрішніх і зовнішніх факторів, що сприяють її досягненню або ускладнюють його. SWOT-аналіз в загальному вигляді не містить економічних категорій, тому його можна застосовувати до будь-яких явищ і країн для побудови стратегій в найрізноманітніших галузях діяльності.

Основними особливостями **методу Дельфі** є: анонімність гіпотез; обґрунтування думок експертів із граничними оцінками; наявність зворот-

ного зв'язку, що реалізується за допомогою багатокрокового опитування. Метод Дельфі розроблений для вирішення стратегічних проблем за граничного зменшення впливу суб'єктивного фактора, стимулювання способів мислення спеціалістів шляхом створення інформаційної системи зі зворотними зв'язками, усунення перешкод в обміні інформацією між фахівцями, тиску авторитету та інших форм тиску, підвищення достовірності прогнозів шляхом спеціальних процедур кількісного оцінювання думок експертів та їх опрацювання. У найрозвинутіших варіантах методу експертам присвоюють вагові коефіцієнти значущості їхніх тверджень, які обчислюють на основі попередніх опитувань. Їх уточнюють від туру до туру і враховують при одержанні узагальнених результатів оцінок.

Технічна процедура методу Дельфі наступна:

- 1) формування групи компетентних експертів;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) розроблення опитувальної форми для експертів;
- 4) опитування експертів за розробленою формою;
- 5) статистичне опрацювання результатів опитування;
- 6) аналіз кожним експертом підсумків опрацювання даних і надання йому шансу врахувати думку всієї групи;
- 7) корегування думки окремих експертів, повторне опитування й статистичне опрацювання всіх думок.

Особливу категорію методів системного аналізу становлять **експертні оцінки**, котрі пов'язані із залученням експертів. Можливість їх застосування, обґрунтування їхньої об'єктивності базується на тому, що значення досліджуваної характеристики знаходиться всередині діапазону оцінок, отриманих від групи експертів, і що узагальнена колективна думка є достовірною.

Метод сценаріїв передбачає, що способи та процедури підготовки й узгодження уявлень про проблему чи об'єкт, які досліджують, викладені у письмовому вигляді (сценарій). Як правило, сценарій готує кожен експерт окремо, а потім думки експертів узгоджують. Використання широкого кола експертів із різних галузей знань і сфер діяльності забезпечує різноаспектний, різносторонній розгляд проблеми, дає змогу виконати її декомпозицію, виявити зв'язки з іншими проблемами. Цей метод застосовують для розв'язання слабоструктурованих проблем, у яких стратегії розвитку системи спираються на гостро конфліктні припущення.

Метод комісії полягає в організації та проведенні відкритої дискусії з метою отримання єдиного узгодженого висновку експертів, причому цей висновок визначають шляхом голосування. Перевагою цього методу є можливість підвищення рівня інформованості експертів і зміна їхніх попередніх висновків у процесі обговорення. До вад можна зарахувати: відсутність анонімності, що може призвести до неформального впливу авторитет-

них експертів; різну активність експертів, яка часто не залежить від їхньої компетентності.

Метод комісії часто використовують для розв'язання суспільно-наукових проблем. Процедура триває у формі з'їздів, форумів, симпозіумів, конференцій (рис. 9.3) і завершується ухваленням консесусної резолюції, звернень, запитів та інших документів.

Одним із різновидів неформального системного аналізу є метод комісії – суд, коли частина експертів підтримує певну альтернативу і наводить аргументи на її користь, а частина – є опонентами, котрі обґрунтовують її вади. У країнах із розвинутим громадянським суспільством саме суди найчастіше стають ефективними засобами захисту довкілля, оскільки навіть рядові громадяни все більше звертаються у ці інстанції з позовами і скаргами щодо дій влади, компаній, окремих порушників екобезпеки.



Рис. 9.3. Міжнародна наукова конференція "ґрунтознавство й агрохімія: історичний досвід, Стан та актуальні перспективи", присвячена 100-річчю кафедри агрохімії та ґрунтознавства ЛНАУ (Львівський національний аграрний університет, 17–20 вересня 2019 р.)

Суди часто роблять юридичну експертну оцінку рішень державних експертних установ із охорони природи і довкілля щодо безпечності тих

чи інших масштабних проєктів, які стосуються використання природних ресурсів або мешканців певної території.

Методи комісії та експертних оцінок використовують вчені ради для атестації науковців і викладачів.

9.4. Алгоритм прикладного аналізу агроєкосистем

Розв'язання проблем, що виникають у людських соціумів у біогеосфері, потребує всеохопного методологічного підходу. Джерелами таких проблем є природокористування – взаємовідношення між суспільними й природними процесами. Об'єктами природокористування виступають як цілісні екосистеми (ліси, степи, луки, водні екосистеми й ін.), так і компоненти біогеосфери: літосфера (надра й ґрунти), атмосфера, біота (біосфера). Загалом, з позицій загальнопланетної людської цивілізації уся теперішня біогеосфера з її внутрішнім середовищем, у т.ч. океанічним, а також окремі пласти **метабіосфери** (надра), нині стали об'єктом природокористування. Саме на такому загостренні проблеми безпечного для довкілля природокористування сконцентрувала увагу суспільства у своїх працях Д. Медоуз (1972).

Адже людство самє створює собі проблеми, коли раз по раз приймає абсолютно раціональні рішення у природокористуванні заради досягнення короткострокових цілей, ризикуючи при цьому спричинити глобальні руйнування у довготривалій перспективі. Оскільки системне мислення є за рамками будь-якої окремої наукової дисципліни або культури, воно, та конкретно системний підхід і системний аналіз, мають бути застосовані до організації природокористування, а саме до використання наявних чи створення штучних екосистем або природного довкілля для досягнення економічних і соціальних цілей.

Із позицій системного підходу розглянемо універсальний в екології спосіб аналізу екосистем, як складових мегаекосистеми – біогеосфери.



Системний аналіз в агроєкології – це методологія дослідження складу, структури, функцій і функціональної організації продукційних аграрних екосистем, а також вивчення суті їх емерджентних властивостей та ефективних взаємовідношень між ними, регулятором-агрономом та з їхнім зовнішнім середовищем.

Вступний етап до екологічного аналізу систем – з'ясування ключових системотвірних елементів чи функцій. По суті – це ідентифікація екосистеми. Перше питання, на яке слід дати відповідь: що є головним компонентом **функціонального ядра** конкретної екосистеми? Якщо рухатися від елементарної екосистеми – консорції, то це буде:

- 1) живий організм – особина рослини, тварини чи людини, як **детермі-
нанти** консорції (без аналізу дії зовнішніх чинників існування й функ-
ціонування такої одиниці вона є лишень об'єктом і предметом біології);
- 2) на суходолі група однотипних рослинних консорцій – поле, лука тощо;
- 3) окрема рослинна, тваринна чи мікробна популяція або її складові
(наприклад, у випадку з тваринами – пара, колонія, сім'я, зграя, стадо, рій
тощо);
- 4) стає й однотипне просторове поєднання рослинних популяцій –
асоціації, фітоценози;
- 5) однотипне й постійне в просторі поєднання фітоценозів – рослинні
формації у ландшафті;
- 6) поєднання однотипних рослинних формацій, як панівних компонен-
тів і решти біоти ландшафтів;
- 7) особливе за складом та екоморфами рослин, видами тварин і мікроо-
рганізмів географічне поєднання біоти (зональні агроєкосистеми);
- 8) ізольовані фізичними межами біоценози (фермерські господарства);
- 9) цілісна агросфера України, як галузь виробництва.

Перелічені вище системотвірні живі одиниці суходольної біоти фор-
мують відповідно консорційні, парцелярні чи фаціальні (польові), ланд-
шафтні (сівозміни, господарства), зональні агроєкосистеми.

Перший етап аналізу агроєкосистем – з'ясування їх компонентного
складу (основних системотвірних елементів), просторової організації та
ієрархії. Наприклад, за розгляду екосистеми людини слід встановити, які
організми є консортами першого концентру, другого і т.д. У випадку дос-
лідження біогеоценозної екосистеми поля чи луки встановлюємо, які рос-
линні асоціації присутні в її структурі.

Другий етап має дати відповідь на питання, які екофактори є вирішаль-
ними чи лімітними в існуванні екосистеми. Це – вода, атмосфера, ґрунт,
внутрішнє середовище іншої надсистеми тощо. На цьому етапі визначають
просторові межі систем.

Третій етап – дослідження функціональної структури агроєкосистеми,
вагомості й ієрархії внутрішніх та зовнішніх зв'язків (з'ясування емер-
джентності конкретної системи).

Четвертим етапом може бути з'ясування оптимальних внутрішніх
умов функціонування.

П'ятий етап може мати за мету уточнення оптимальної структурно-
функціональної динаміки, що відповідає стану максимальній продуктив-
ності агроєкосистеми.

Шостий етап, за послідовного виконання усіх попередніх, надає мож-
ливості оцінювати наслідки конструктивного (позитивного чи негативного)
зовнішнього впливу регулятора-агронома, з'ясувати часові межі існування

системи та порогові значення зовнішніх впливів, приналежність системи до певної надсистеми.

Сьомий етап передбачає можливість моделювання агроєкосистеми й експериментування з моделями чи самими системами.

Восьмий етап дає змогу оцінювати різні аспекти корисного і безпечного використання екосистем, частки їхніх ресурсів чи їх продукційної роботи.

Дев'ятий етап може встановити можливість еволюційної підтримки, тривалість підтримуваного існування агроєкосистем.

Десятий етап у разі необхідності може бути спрямований на оцінювання можливостей відродження втрачених, частково зруйнованих чи істотно спотворених екосистем, створення нових.

Підхід до системного аналізу в агроєкології має бути творчим і креативним. Тому, не всі десять етапів системного аналізу екосистем, окрім вступного, є обов'язково однаково детальними й необхідними, деякі з них можна пропускати, якщо до вирішення взяті спеціальні завдання для розв'язання вузьких проблем.

9.5. Зміст прикладного системного аналізу компонентів і факторів природного середовища

Межі економічного зростання, підвищення добробуту й розвиток матеріальної культури визначені обмеженими ресурсами біогеосфери та її внутрішнього довкілля, за виключенням сонячної енергії, яка для землян є зовнішньою невичерпною і дармовою в осяжному відрізку історії нинішньої цивілізації. Проте, постійне зростання чисельності населення і необхідних ресурсів споживання може завдати і, вірогідно, уже завдає серйозної шкоди еко- і соціосистемам, які забезпечують життя на Землі. Прагнення до нескінченного економічного зростання в решті-решт призведе до руйнування більшості локальних, регіональних екосистем, їхнього внутрішнього середовища і навколишнього середовища людини.

Внутрішньобіогеосферне середовище умовно ділять на атмосферу надземну і повітря ґрунтового, водну оболонку Землі, літосферу та її приповерхневий ґрунтовий покрив, біотичні компоненти усіх видів у їх найрізноманітнішому поєднанні. Теперішнє природне середовище планети доповнене рукотворними технічними спорудами: будівлями, дорогами, промисловими технічними локальними й мережевими компонентами, новими ландшафтними елементами (кар'єри, відвали, шламосховища тощо), штучними, напівштучними суходільними й водними екосистемами, захищеними законом нативними або *демутаційними екосистемами* (природно-заповідні об'єкти) тощо. Стан, безпеку й основи захисту цих компонентів довкілля людини вивчає інвайронментологія.

Об'єктом вивчення середовищезнавства (інвайронментології) є всі рівні природного середовища – від космічного до внутрішньоклітинного, а також усі рівні антропізованого середовища – від техногенно-виробничого до соціально-культурного й духовно-естетичного. Особлива увага надається компонентам неживої природи: стану атмосферного (аж до ближнього космосу) середовища, земної кори і ґрунтового покриву, гідросфери (води суходолу, океанів і морів). Унікальним явищем природи є різнорівневе біотичне – внутрішньоекосистемне та внутрішньоорганізмове середовище.

Предметом дослідження середовищезнавства є наукові основи збалансованого співіснування середовищетвірних живих і неживих природних систем та людської спільноти, способів розумного використання речовинно-енергетичних природних ресурсів на благо людства без руйнування чи розбалансування природного середовища.

Метою середовищезнавства є розроблення й утвердження у свідомості людей розумних принципів співіснування природних і суспільних систем у навколишньому середовищі задля збереження можливості задоволення теперішніми і майбутніми поколіннями своїх матеріальних і духовних потреб.

Середовищезнавство досліджує засадничі (філософські, матеріалістичні, етичні тощо) закономірності виникнення й еволюції та формулює принципи розуміння нашого навколишнього середовища, місце й унікальну роль у ньому біотичних систем. Ця наука обґрунтовує місце і роль людської спільноти, а також розумні й зважені засади промислового, аграрного, комунального й рекреаційного господарювання людини в навколишньому природному середовищі. Її завданням є пізнання й обґрунтування засад розумного керування середовищетвірними функціями всіх (живих і неживих) природних систем і використання матеріальних ресурсів. І врешті-решт, середовищезнавство повинно адекватно оцінювати теперішні наслідки, прогнозувати й надавати прагматичні та ефективні пропозиції щодо способів вирішення сучасних і майбутніх проблем економічної експлуатації природного середовища й земних матеріальних ресурсів для того, щоб убезпечити нинішнє і майбутні покоління від катаклізмів і катастроф (Зербіно, 2005).



Системний аналіз в середовищезнавстві (інвайронментології) – це методологія дослідження природних і штучних компонентів біогеосфери або окремих систем, їх взаємовідношень між собою та з природним чи штучним середовищем, чинників їх виникнення, перетворення та безпеки для людини.

Системний аналіз в інвайронментології застосовують як до окремих складових навколишнього середовища, так і до довкілля загалом. Комплексний або всеохопний системний аналіз внутрішньобіогеосферного довкілля – це надскладна багатопланова і тривала процедура, як правило



виконувана великими колективами із застосуванням комп'ютерної техніки та спеціальних програм. Покомпонентний системний аналіз докільля дещо простіший, проте потребує глибоких знань про конкретний об'єкт дослідження. Як у першому, так в другому випадку порядок здійснення аналізу є класичним (див. рис. 9.2).

Алгоритм системного аналізу докільля людини побудований на основі врахування структури і базових властивостей основних геосфер Землі. Послідовність їх дослідження немає особливого значення.

Системний аналіз *стану атмосферного і ґрунтового повітря* базується на спеціальнонаукових методах: встановлення фізики його явищ і фізичного складу; хімічного складу і властивостей; кліматології й метеорології тощо.

Оцінювання *стану водних компонентів* біогеосфери ґрунтується на аналізі основних фізичних, хімічних, біогенних та антропогенних властивостей водних об'єктів (води поверхневі й підземні, льодовики, опади тощо).

Системний аналіз *літосфери* передбачає дослідження її геоматичної структури, морфології, геохімічного складу, ролі плівки життя на Землі у метаморфізації мінеральних та осадових порід, а також виробничої діяльності.

Дослідження *педосфери* опирається на фундаментальні здобутки й методи ґрунтознавства, біогеохімії та агрохімії, ґрунтової біології, а також досвіду аграрного природокористування.

Особливим об'єктом системного аналізу в інвайронментології є *біотичне різноманіття* біосфери, різноманіття й функціонування екосистем, їхня антропізація й охорона, заповідання особливо цінних та еталонних екосистем і ландшафтів. Інвайронментологія використовує для цього спеціальні методи біології та екології.

Окремим і найскладнішим є системний аналіз середовищетвірної та середовищеруйнівної *функції людської популяції* в біогеосфері. Для цього спеціального системного аналізу використовують як методи екології й біології людини, так і соціологічні й економічні підходи у їх цільовому поєднанні.

Об'єктами системного аналізу в інвайронментології є: безпечне для довкілля *енерговиробництво й енергоспоживання; урбанізація; техногенне довкілля й промислова безпека*; проблема нагромадження й безпечного поводження з антропогенними *твердими відходами, рідкими комунальними і промисловими стоками, токсичними, радіоактивними речовинами й ксенобіотиками*, їх нейтралізація, утилізація чи безпечне зберігання та захоронення.

Ріст народонаселення вимагає зростання речовинно-енергетичних потоків, починаючи з вилучення із навколишнього середовища ресурсів з низькою ентропією, і закінчуючи поверненням у нього високоентропійних відхо-

дів, які пов'язані з межами виснаження і *забруднення*. У фізичному сенсі кінцевим продуктом економічної діяльності з перетворення природи в нас, наше тіло й у наші речі, які потім ми витрачаємо або зношуємо, є відходи. За сутністю вся така діяльність спрямована на перетворення світу з плином часу в суцільні відходи. Тому сьогодні надзвичайно актуалізується проблема системного аналізу чинників сталого (екобезпечного) розвитку, що базується не на нагромадженні відходів цивілізації завдяки розширеному відтворенню, а на економному й у майбутньому обмеженому використанні додатково залучених природних ресурсів біосфери.

9.6. Системний експертний аналіз в агроекології й захисті агроландшафтів

Невід'ємним видом виробничо-управлінської і наукової діяльності з використанням системного аналізу є *експертна діяльність* в екології та збереженні довкілля.

У Законі України (1995) "Про екологічну експертизу" визначено, що екологічна експертиза – це "...вид науково-практичної діяльності спеціально уповноважених..." суб'єктів. Вона "...ґрунтується на міжгалузевому екологічному дослідженні, аналізі та оцінці передпроектних, проектних та інших матеріалів чи об'єктів, реалізація і дія яких може негативно впливати або впливає на стан навколишнього природного середовища та здоров'я людей...". Ця робота "...спрямована на підготовку висновків про відповідність запланованої чи здійснюваної діяльності нормам і вимогам законодавства про захист навколишнього природного середовища, раціональне використання і відтворення природних ресурсів, забезпечення екобезпеки". Отже, якщо це науково-практична діяльність, то вона може здійснюватися ефективно тільки на основі системного підходу з використанням методології системного аналізу.

Еколог-експерт, насамперед, повинен бачити проблему, що виникає через непередбачену діяльність різних суб'єктів у навколишньому середовищі чи стосовно тих чи інших екосистем. Далі він повинен поставити перед собою мету експертизи. Метою екологічної експертизи, на загал, є запобігання негативному впливу людської діяльності на стан довкілля та здоров'я людей.

Традиційними завданнями еколога-експерта є:

- ✓ визначення ступеня екоризику і безпеки діяльності;
- ✓ оцінювання об'єктів на предмет екозагрози;
- ✓ дотримання вимог екологічного законодавства, санітарних норм і правил;



- ✓ оцінювання обґрунтованості, повноти й ефективності заходів щодо захисту довкілля і здоров'я людей;
- ✓ надання об'єктивних, всебічно обґрунтованих висновків екологічної експертизи.

Алгоритм або порядок проведення екологічної експертизи загалом має системний вигляд і передбачає:

- ✓ виявлення актуальної проблеми довкілля;
- ✓ постановку еколоґо-експертними органами чи формуваннями завдань експертного дослідження;
- ✓ оцінку об'єктів екологічної експертизи;
- ✓ підготовку обґрунтованого об'єктивного еколоґо-експертного висновку.

Технічна процедура екологічної експертизи передбачає:

1) з'ясування наявності й повноти необхідних матеріалів і реквізитів на об'єкти екологічної експертизи та створення еколоґо-експертних комісій (груп);

2) аналітичне опрацювання матеріалів екологічної експертизи, в разі необхідності натурні обстеження та проведення на їх основі порівняльного аналізу й часткових оцінок ступеня екобезпеки, достатності та ефективності екологічних обґрунтувань діяльності об'єктів екологічної експертизи;

3) узагальнення окремих експертних досліджень, отриманої інформації та наслідків діяльності об'єктів експертизи, підготовка висновку екологічної експертизи та подання його замовнику й органам керування.

Висновки державної екологічної експертизи повинні містити оцінку екологічного ризику і можливості прийняття рішень щодо об'єкта експертизи та враховувати соціально-економічні наслідки. Вони можуть бути позитивними й негативними. Позитивні висновки державної екологічної експертизи після затвердження їх Міністерством екології та природних ресурсів України чи його органами на місцях є підставою для відкриття фінансування проектів і програм чи діяльності. Реалізацію їх без позитивних висновків державної екологічної експертизи забороняє відповідний орган. У разі негативної оцінки державної екологічної експертизи замовник зобов'язаний забезпечити доопрацювання проекту чи об'єкта відповідно до вимог еколоґо-експертного висновку і своєчасно передати матеріали на додаткову державну екологічну експертизу. У такому разі це означатиме впровадження результатів екологічної експертизи у практичну сферу.



10.1. Мета й завдання моделювання, матеріальні й абстрактні моделі

Системний аналіз – це певний алгоритм реалізації цілісної сукупності методів для окреслення, вивчення та вирішення проблем. Центральною процедурою системного аналізу є вибір чи побудова моделей систем і вивчення систем за допомогою цих моделей, експериментування з ними, їх оптимізація. Тому, універсальним і найефективнішим засобом пізнання систем є їхнє різноманітне відображення у вигляді моделі (лат. *modulus* – міра, зразок). Цей творчий процес називають моделюванням, а активні маніпуляції з копіями й відображеннями систем – модельними дослідженнями чи експериментами.

Моделювання – це завжди порівняння відомого (достовірного) з новим (невідомим) за аналогіями. Аналогія є твердженням про подібність об'єктів за різними їхніми ознаками та властивостями. Спираючись на аналогії, дослідник висуває гіпотези – передбачення, здогадки, які згодом перевіряє шляхом експериментів. Отже, модель є штучною (часто віртуальною) системою, яка служить засобом здобуття інформації про реальну (штучну чи природну) систему різними методами дослідження.

Тобто:



Модель – це створена або вибрана аналітиком система, яка відтворює взяті для вивчення, вагомі для поставленої мети пізнання, сторони (елементи, властивості, відношення, параметри) об'єкта (явища) та перебуває з ним у такому відношенні заміщення й подібності (зокрема ізоморфізму), що дослідження її служить опосередкованим способом здобуття знання про цей об'єкт (явище).



Відповідно, **МОДЕЛЮВАННЯ** є відтворюванням певних ознак і властивостей системи-оригінала на створеному за вибраними методами аналогу.

Всесвіт навколо нас наповнений реальними системами, а все, що ми про них знаємо і відображаємо будь-якими способами, є їхніми моделями. Тому класифікувати моделі настільки ж складно, як і самі системи. Інколи науковець бере для вивчення реальну систему й опрацьовує всі її ознаки і властивості. А це вже є робота з моделлю, оскільки отримані знання є придатними для **екстраполяції** їх на аналогічні об'єкти в природі.

Отже, будь-які реальні об'єкти й явища спочатку фіксують термінами (словесні описи), відображують малюнками, світлинами, графіками, діаграмами, математичними формулами, а також відтворюють на макетах, у лабораторних, вегетаційних і польових дослідях. Тому спочатку зазначимо, що об'єктивно існують дві основні групи моделей: **матеріальні** (тобто фізичні або дієві) й **абстрактні** (ідеальні, уявні).

За своєю природою матеріальні моделі бувають предметні та знакові. Предметні моделі поділяють на природні (натурні) й виготовлені (фізичні) макети, а знакові – на мовні (вербальні) й математичні (статистичні, імітаційні тощо).

Способи побудови моделей визначають вибрані аналітиком наукові методи моделювання. Традиційним є математичне, фізичне, хімічне, біологічне, екологічне, соціальне, економічне, політичне моделювання. У сфері кожної наукової галузі використовують ті чи інші види моделей. Їх класифікація може мати різні критерії: ступінь визначеності, закономірності зміни параметрів моделі, фактор часу, засоби опису й оцінювання.

За ступенем визначеності моделі є: **детерміновані** (за відомого "входу" "вихід" у них строго передбачуваний); **стохастичні** (змінні параметри стану й умови функціонування системи є випадковими величинами та пов'язані стохастичними залежностями); **невизначені** (розподіл ймовірностей певних параметрів може або взагалі не існувати, або ж бути невідомим).

За закономірностями зміни своїх параметрів моделі поділяють на **дискретні**, **неперервні** та **дискретно-неперервні**. У дискретної моделі множини припустимих значень вхідних і вихідних параметрів є дискретними, а у неперервних – всі змінні й параметри неперервні.

За критерієм часу розрізняють **статичні** й **динамічні** моделі. У статичній моделі всі параметри й залежності співвіднесено до одного моменту часу, тобто в певному вигляді відсутня залежність їх від часу. В динамічних моделях значення параметрів залежать від плину часу. Часто динамічна модель є послідовністю статичних моделей із рекурентним (зворотним) типом зв'язків між ними.

Залежно від засобів описування та оцінювання вирізняють *дескриптивні* й *нормативні* моделі. У дескриптивних моделях не використовують визначені критерії ефективності функціонування системи, тому з їхньою допомогою лише описують, аналізують поведінку. *Нормативні моделі* охоплюють такі критерії, тому вони надають інформацію про норму функціонування системи і їх використовують у процесі прийняття управлінських рішень, при проектуванні систем.

Основним призначенням моделей систем є пізнання реального світу та прагматичне використання для: осмислення дійсності; формального опису причинно-наслідкових зв'язків і структури системи; імітації й прогнозування поведінки системи; навчання і тренінгу; керування процесами й оптимізації.

10.2. Формалізація та візуалізація моделей систем

Метод моделювання слугує для розв'язування тих завдань, які не можуть бути вирішені науковими експериментами чи дослідями безпосередньо на об'єкті, наприклад на живій людині.

Необхідними й достатніми умовами для моделі є такі:

- ✓ задовільне віддзеркалення або високий рівень аналогії щодо первинного об'єкта дослідження;
- ✓ прийнятна репрезентативність;
- ✓ придатність для екстраполяції встановлених властивостей на первинні об'єкти.

Найкраще – коли модель тотожна самому об'єкту-оригіналу.

Точне уявлення конкретної мети – перша обов'язкова умова плідного моделювання. Поки ми не скористаємося елементарною моделлю системи, доти не знатимемо про що говоримо. Фактичним способом передавання знань у науці й практиці є моделі. Труднощі, пов'язані з моделюванням, полягають у неоднозначності самих моделей, адже завжди буде більше, ніж один правильний спосіб побудови моделі. Мистецтво створення моделі – це вибір такої конструкції, яка давала би змогу використовувати відносно прямі методи аналізу первинної системи.

Перша загальна мета моделювання – це прагнення найкращим чином з'ясувати суть проблеми або системи. Друга мета полягає у тому, щоб за допомогою того чи іншого регуляторного методу дати концептуальне пояснення явищ, які моделюємо. Третя мета – передати знання про систему-оригінал, навчання і тренінг. Четверта мета – спланувати й реалізувати поведінку системи на визначений відтинок часу. П'ята традиційна мета моделювання – це прогнозування подій, явищ і часу.

Після виявлення і формулювання проблеми, ідентифікації її як системної, розпочинають вибір моделі. Першим результатом цього є опис системи на вербальному рівні (словесний, текстовий тощо). В описі системи знання певним чином упорядковують. Опис повинен бути всебічним і зрозумілим для всіх суб'єктів системного аналізу – науковців, експертів, керівників та ін.

Залежно від форми подання об'єкта, моделювання поділяють на натурне й абстрактне. У **натурному моделюванні** використовують можливість дослідження властивостей на реальному об'єкті чи на його частині, або на штучно створеному макеті системи – фізичній моделі з подальшим камеральним опрацюванням результатів.

Найскладнішим є **моделювання нативних екосистем**, традиційно присутніх у природно-заповідному фонді, та перспективних для залучення в екомережу держави. У лісовому господарстві поширеним є моделювання високопродуктивних і стійких деревостанів, у садово-парковому – рекреаційно- й техногенностійких насаджень у міських селітебних і промислових зонах. В аграрному секторі велику увагу приділяють експериментам із натурними моделями з метою підвищення продуктивності природних лук, кормових угідь, урожайності та якості польових, овочевих культур і плодових насаджень. З урахуванням мінливості клімату й строкатості ґрунтів, динамічності біотичних факторів, експериментальне дослідження агротехнологічних моделей триває 3–5 років, лісогосподарських – 10–50 і більше років. Значно прискорити процес дозволяють паралельні вегетаційні дослідження з вивчення добрив, засобів захисту рослин, фізіологічно активних речовин тощо, за допомогою яких можна моделювати їх вплив на ріст і розвиток культурних сортів. Паралельні лабораторні аналізи дають змогу створити моделі внутрішніх фізіологічних процесів у рослинах, сприяють розумінню механізмів формування високої якості харчової чи кормової продукції.

Загалом, усебічне попереднє вивчення натурних (природних) процесів, а згодом, наскільки це можливо, відтворення їх у реальних експериментах у лісовому, сільському й садово-парковому господарствах можна сміливо вважати **екологічним моделюванням**. За належного теоретичного опрацювання отриманий у цих сферах наукового моделювання багаторічний досвід потрібно узагальнити й оформити як спеціальну галузь знань під назвою **експериментальна екологія**.

Незамінним є лабораторне моделювання впливу кількості та якості кормів, різних корисних добавок до корму тварин, а також ліків, стимуляторів, шкідливих концентрацій токсичних речовин, радіонуклідів тощо. Традиційними дослідними моделями є невеликі групи лабораторних тварин – мух дрозофіл, мишей, щурів, кролів, собак, рідше у медичних експериментах – приматів. Моделювання процесів із цими тваринами дозво-

ляє екстраполювати наукові знання на організм людини й уникнути зайвого ризику при розробленні та впровадженні фармакологічних методів втручання у життєдіяльність людського організму. Особливої значущості набувають такі методи у наш час, коли техногенна трансформація довкілля спричинює досі невідомі адаптивні реакції й мутації мікроорганізмів, розширює й поглиблює масштаби захворювання людей і тварин.



Фізичне моделювання – створення аналогів систем однакової з ними фізичної природи. Застосовують його в інженерній справі через відтворення досліджуваного процесу на лабораторному макеті, який у загальному вигляді має відмінні від оригіналу розміри, інші параметри, але однаковий принцип дії та математичний опис процесу функціонування.

Наприклад, інженери перед спорудженням моста – системи будівельних (металевих і бетонних) конструкцій для встановлення над річкою, ущелиною тощо – створюють його лабораторний макет, що за математичними параметрами міцності повинен відповідати запропонованому проєкту. Така штучна мініатюрна модель має витримати і пропорційне навантаження на конструкції в умовах лабораторного випробування, розраховане за відповідною методикою.

Поширеним способом фізичного відображення систем є **оптимізаційне моделювання**. Прикладом може бути тренувальний матч футбольної команди із сильним спаринг-партнером напередодні відповідальної для неї турнірної зустрічі, у якому тренер остаточно оптимізує склад ігрового колективу та функціональні ролі кожного гравця.

Для вивчення складних систем придатні імітаційні моделі, які достатньо універсальні, надають можливості проведення чисельних експериментів і передбачення різноманітних змін. **Імітаційне моделювання** завжди практикують у театральній, кінематографічній і концертній діяльності, коли проводять генеральну репетицію перед виступами.

У військовій справі, цивільній обороні застосовують **ситуаційне моделювання**, яке базується на модельній теорії мислення. Згідно з нею можна описати основні механізми регулювання процесів прийняття рішень. В основі модельної теорії мислення є формування у свідомості та підсвідомості людини інформаційної моделі об'єкта чи зовнішнього світу. Цілеспрямована поведінка людини ґрунтується на формуванні цільової ситуації та мисленого перетворення фактичної ситуації в цільову. Основа побудови ситуаційної моделі – опис об'єкта у вигляді сукупності елементів, що пов'язані між собою певними відношеннями. Модель об'єкта має багаторівневу структуру та є інформаційним контекстом, на тлі якого здійснюють процеси керування.



Абстрактне (лат. abstractio – віддалення) **моделювання** – це інтелектуальне створення уявних систем або їх прототипів, яке має різні види формалізації: наочну, символну, математичну.



Первісним є вербальний опис як найстаріший і найпростіший спосіб відображення системи за допомогою словесних чи знакових конструкцій.

Символьне моделювання – це штучний процес створення об'єкта, що замінює реальний і виражає основні його властивості через певну систему знаків і символів.

Його поділяють, відповідно, на мовне та знакове. Теорію виникнення, правила і практичні аспекти застосування різногалузевих символів і символних конструкцій досліджує спеціальна наука – семіотика (Карась, 2000).

В основу мовного моделювання покладений тезаурус, який утворює набір вхідних понять. Причому цей набір має бути строго фіксованим. Тезаурус – це словник, одиниці якого містять набори ознак, що описують родово-видові зв'язки та згруповані за змістовною близькістю. Між тезаурусом і звичайним словником є принципова різниця. **Тезаурус** – це словник, який не містить неоднозначних слів, а кожному його слову відповідає лише одне поняття.

Прикладом вербальної абстрактної системи може бути будь-яке слово чи наукове визначення якого-небудь поняття.

Зокрема, проаналізуємо визначення екології як **мовну модель**. Воно сформульоване так: екологія – наука, яка вивчає взаємовідношення живих істот та їх сукупностей між собою і з навколишнім біотичним та абіотичним середовищем, структурно-функціональні властивості екосистем – від найменших консорційних до біогеосфери включно, історію формування, еволюцію, природну й антропогенну динаміку цих систем, їхні корисні функції для людини та можливості їх розумного використання. Мета цієї словесної системи – коротко виразити однозначне розуміння змісту конкретної науки. Для цього у центр системи поставлений головний її елемент – слово "екологія", яке теж є буквенною підсистемою зі своїм функціональним навантаженням, що існує в середовищі інших аналогічних підсистем (слів). Ієрархічно найближчим до головного елемента (підмета) є присудок (дієслово "є", яке замінене на тире "-"). Наступним ієрархічним елементом є допоміжний іменник "наука", а далі функціонально підпорядкованими є інші допоміжні члени речення, які дають певні деталізації й уточнення щодо головної словосполуки – "екологія – наука". Вони уточнюють її призначення (...вивчає...), об'єкт із переліченням його складових (...взаємовідношення живих істот... із середовищем..., властивості..., історію...,

динаміку..., функції...), а в завершенні вказують надмету екології – виявити "...можливості... розумного використання" екосистем. Отже, чітка словесна модель відображає всі аспекти науки екології у одній невеликій конструкції.

Великі мовні моделі, такі як ChatGPT, можуть вільно відповідати людською мовою на запитання та твердження. Хоча такі моделі насправді не розуміють мови так, як це розуміють люди, а лише вибирають слова, які є більш імовірними, ніж інші, вони досягли точки, коли їхнє володіння мовою неможливо відрізнити від володіння мовою нормальної людини. Що тоді означає справжнє розуміння, якщо навіть комп'ютер, який використовує мову, як носій мови, не визнаний таким, що його розуміє? На це складне запитання немає загальновизнаної відповіді.

Знакове відображення систем – це **наочне моделювання**, що демонструє явища й процеси, які відбуваються в об'єкті. Ними можуть бути малюнки, світлини, блок-схеми, інші зображення. На рис. 10.1 легко з'ясувати, що у біомі тундри середньорічна температура повітря коливається в діапазоні від -5 до -14°C , а кількість опадів упродовж року від 100 до 1000 мм. Натомість у тропічному вологому лісі ці екологічні параметри коливаються у межах 18 – 28°C та 2400 – 4550 мм. Отже ці біоми охоплюють ландшафти, де сформувалися саме такі кліматичні умови.

Візуалізація співставлення середньорічної температури і кількості опадів, реалізована у двокоординатній площині, дає наочну модель, яка детально відображає відмінності та подібності тих

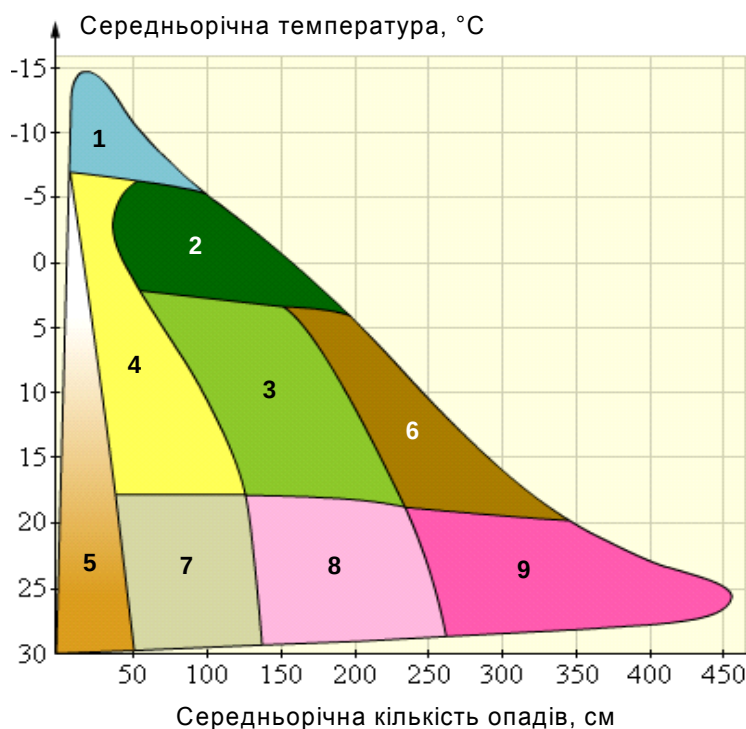


Рис. 10.1. Кількість опадів і середньорічна температура у різних біомах Землі (наочна модель)

- 1 – тундра; 2 – хвойні ліси (тайга); 3 – мішані ліси;
- 4 – степи і прерії; 5 – пустелі; 6 – субтропічні ліси;
- 7 – савани й рідколісся; 8 – тропічні сезонно-вологі ліси; 9 – тропічні вологі ліси.

чи інших біомів планети за цими двома параметрами.

Про будову системи дає інформацію *модель типу "склад системи"*. Ця формальна модель може бути геометричною фігурою (прямокутник, квадрат, коло), яка окреслює систему (її границі) і зображення її складових частин – елементів (у вигляді кілець, квадратів тощо), або їх організаційних об'єднань – підсистем, окреслених вже внутрішніми границями інших фігур.

Класична схема будови біогеоценозу (рис. 10.2) зображає п'ять системотвірних елементів-блоків – рослини, тварини, мікробіота (жива підсистема – *біоценоз*), атмосфера і ґрунт (нежива підсистема – *екотоп*). Стрілками зображена функціональна будова біогеоценозу.

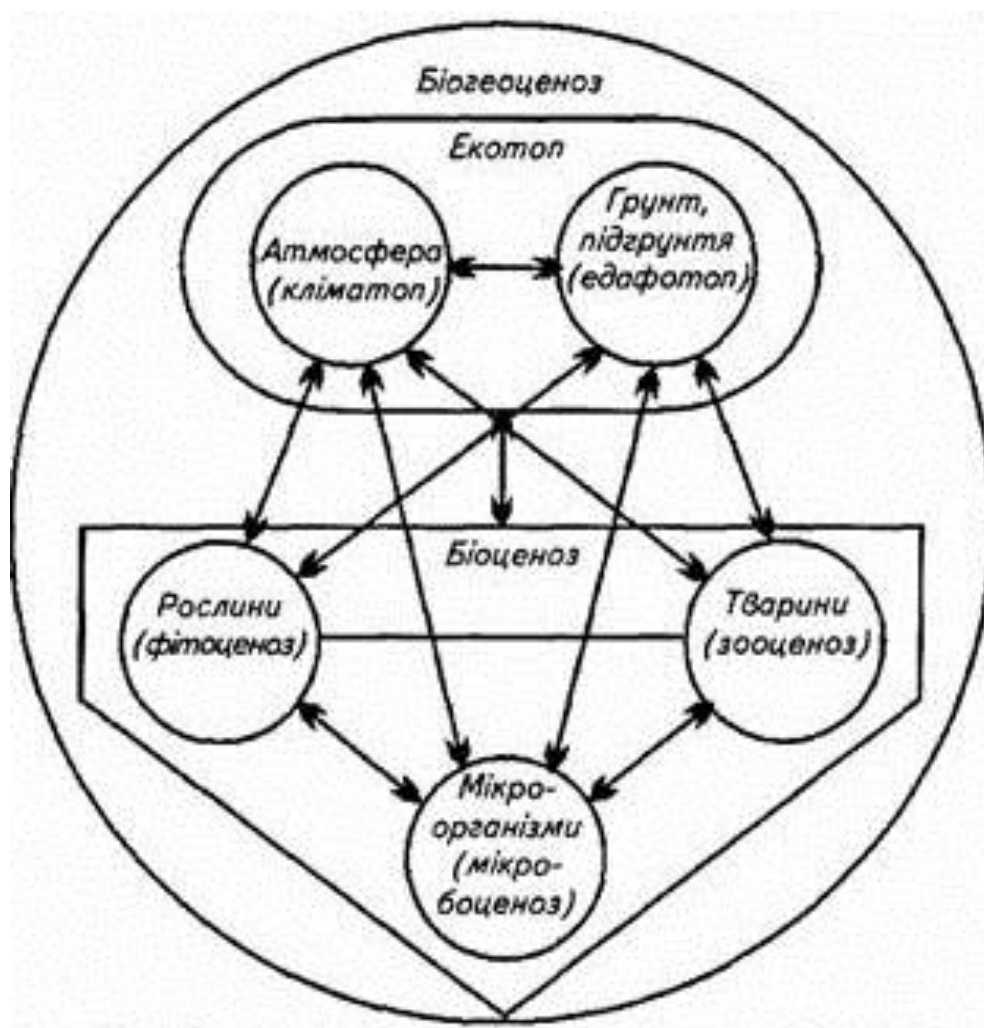


Рис. 10.2. Будова біогеоценозу за Станчинським-Сукачовим
(модель типу "склад системи")

Структурна схема системи є найповнішою моделлю системи на конкретному етапі нашого знання і відображає її структурно-функціональну

організацію. Компонентну й функціональну структури системи зображають різними геометричними символами – фігурами, лініями, стрілками тощо.

На рисунку 10.3 наведена спрощена схема взаємодій структурних блоків ("чорних" або "сірих скриньок") і функціональних елементів у біогеоценозі. Ці символи стали класичними для екології і у світовій літературі (Гильманов, 1978; Полуэктов и др., 1980). За інформацією Дж. Феррестера (1971) їх застосовують від 1961 року, тому ми використовуватимемо далі ці умовні знаки без спеціальних пояснень. На жаль, така стандартизація не набула нормативної вагомості, тому сучасні наукові праці містять численні новації у цьому плані, які інколи складні для читання.

Блок-схема на рисунку 10.3 представляє джерела енергії та речовини у вигляді сукупності матеріальних та енергетичних ресурсів екосистеми. У природних екосистемах на ці ресурси впливають кліматичні чинники, у штучних їх контролює людина.

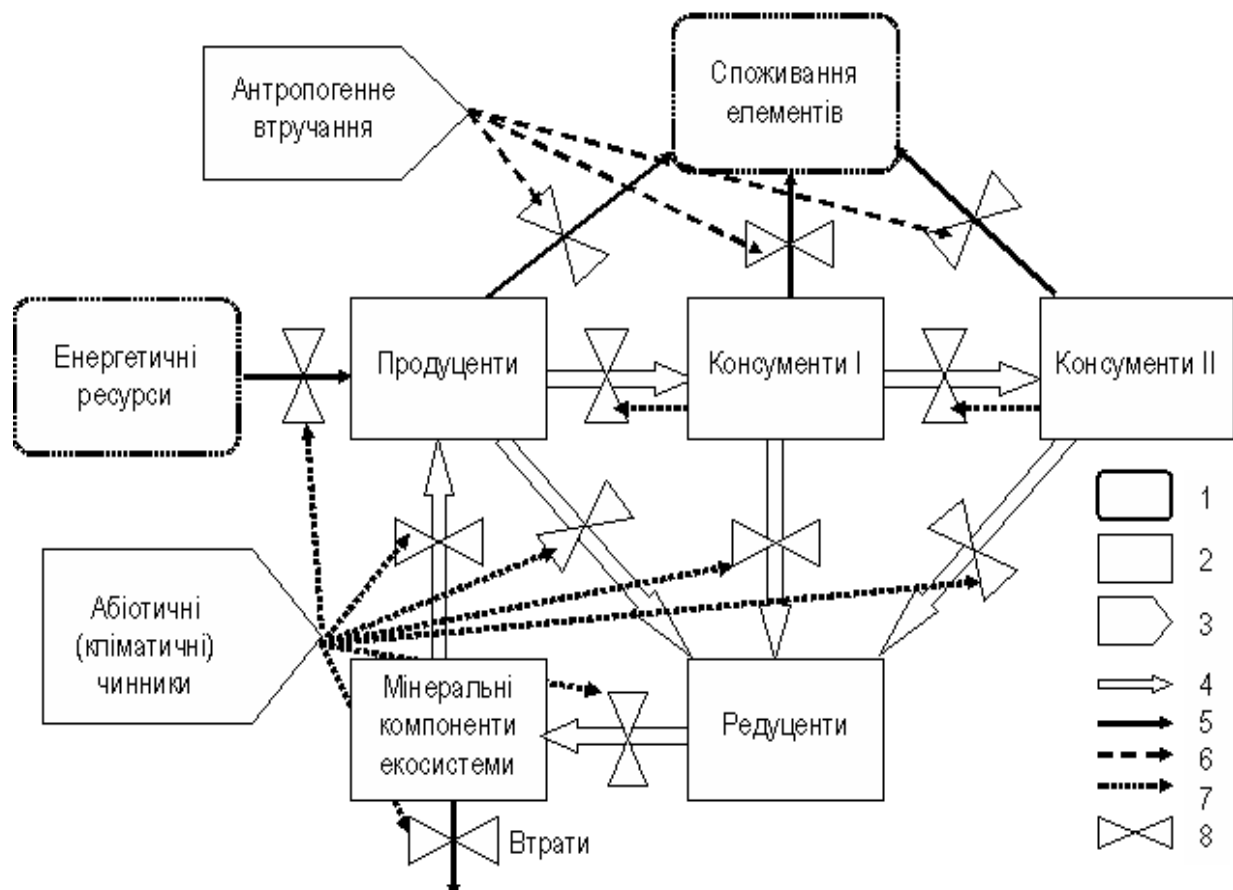


Рис. 10.3. Проста структурно-функціональна схема природної екосистеми

(модель типу "структурна схема"):

1 – джерела і стоки; 2 – накопичувачі; 3 – регулятивні змінні; 4 – мережа основного кругообігу речовин; 5 – матеріальні потоки і втрати; 6 – корегування процесів людиною; 7 – інформаційні канали впливу абіотичних (кліматичних) чинників; 8 – функції, що керують

Обидві блок-схеми показують, що з термодинамічної точки зору будь-яка екосистема є відкритою: для свого функціонування вона потребує постійного постачання енергії й речовини.

Блок-схема на рисунку 10.4 відтворює *модель типу "функціональна схема"* і відображає цикл руху азоту від блоку до блоку, а також його надходження й вилучення з екосистеми.

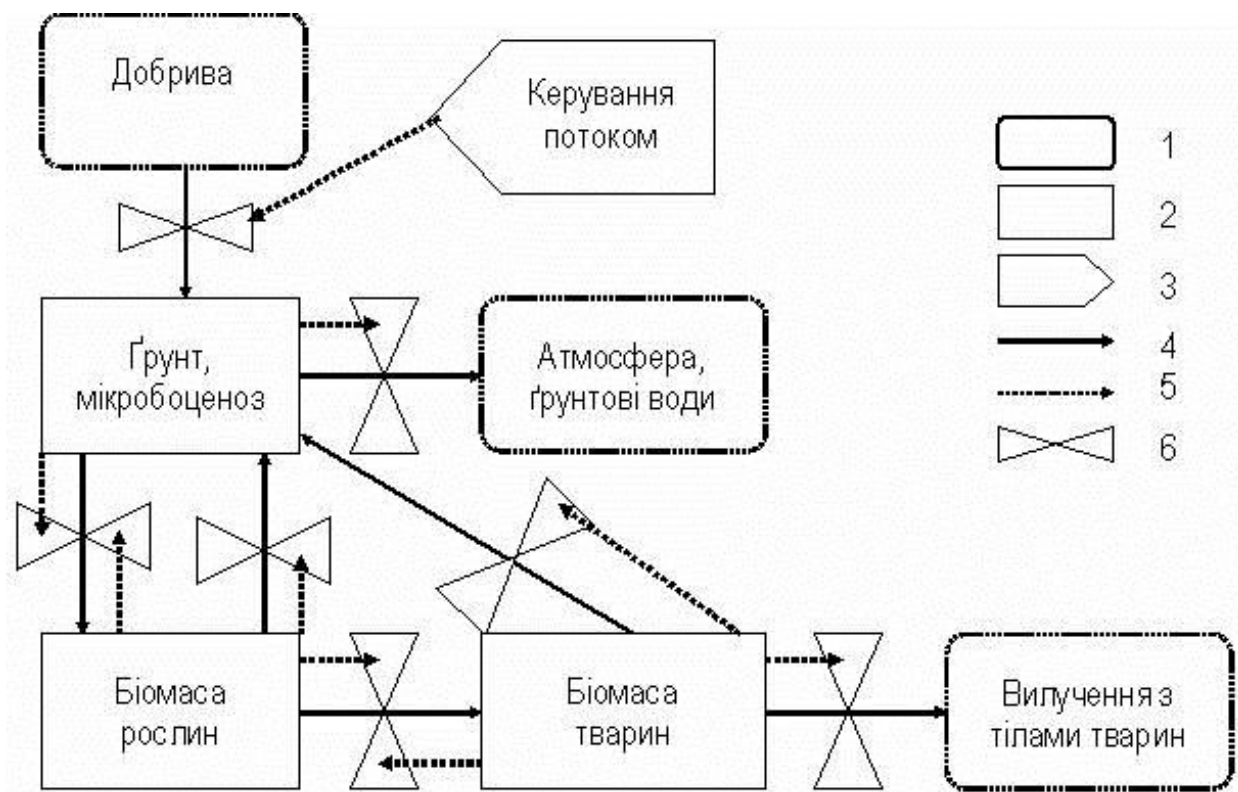


Рис. 10.4. *Схема руху азоту в екосистемі*
(модель типу "функціональна схема"):

1 – джерела і стоки; 2 – накопичувачі; 3 – регулятивні змінні; 4 – потоки азоту; 5 – регулювання процесів людиною і саморегуляції; 6 – функції, що керують

Поширеними й достатньо інформативними *символьними моделями*, придатними для екологічних досліджень, є різноманітні карти, що завдяки уніфікованим системам умовних позначень відображають рослинний, ґрунтовий покрив, розповсюдження забруднень тощо. Незамінними у ландшафтознавстві є фотографічні моделі, за якими можна вивчати й систематизувати ландшафти світу, не перебуваючи безпосередньо на місцях.



10.3. Математичне моделювання

Незамінними у системному підході є засоби математики. Зв'язки й закономірності в природі, прогнозовані за допомогою математики, рано чи пізно були виявлені емпірично. Математично відображені закономірності світу пояснюють явища, які без математики є незрозумілими.

Рівняння, що описує певний процес, дає нам набагато більше знань, ніж результати численних дослідів, вимірювань і спостережень. Математично виражені закономірності є найуніверсальнішими, найінформативнішими, компактними. Наприклад, закони фізики, які описують усі значущі явища матеріального світу, можуть бути відображені у вигляді формул лише на одному аркуші паперу, оскільки таких універсальних законів не більше 20. Зокрема це – рівняння механіки з поправками теорії відносності, рівняння неперервності та гідродинаміки, рівняння електромагнітного поля, гравітаційного поля, рівняння квантової механіки, рівняння слабких і тісних взаємодій елементарних часток матерії та ін.

Із-поміж знакових (формальних) способів відображення систем особливу увагу надають *математичним моделям*, які розділяють на аналітичні й імітаційні.



Аналітичне математичне моделювання передбачає запис процесів функціонування системи у вигляді співвідношень інтегро-диференціальних та алгебраїчних виразів.

Імітаційне моделювання – це реалізація моделі або сукупності моделей системи за допомогою алгоритму, який відтворює процес функціонування реального об'єкта в часі, тобто його динаміку.

Імітаційні моделі дають змогу враховувати такі ознаки, як дискретність і неперервність елементів системи, нелінійність їхніх параметрів, випадкові збурення тощо.

Різні математичні правила маніпулювання зі зв'язками системи дають змогу робити передбачення змін, які ймовірні в екосистемах, якщо змінюються їхні складові. Такі передбачення у свою чергу дозволяють порівнювати модельні системи з тими реальними об'єктами, які вони представляють, і перевіряти цим самим адекватність моделі спостереженням і експериментальним даним, – це саме та умова, яка обов'язкова для застосування будь-якого наукового методу. З іншого боку, маніпуляції із самою модельною системою можуть підказати, які реальні експерименти необхідно поставити для перевірки адекватності моделі.

Переваги математичних моделей у тому, що ці моделі точні й абстрактні, що вони передають інформацію логічним однозначним чином. Моделі точні тому, що вони дають змогу робити передбачення, які можна порівняти з реальними даними, поставивши експеримент або провівши необхідні спостереження. Моделі абстрактні тому, що символічна логіка математики висвітлює ті, і лише ті елементи, які важливі для дедуктивної логіки міркування, виключаючи в такий спосіб усі сторонні значення, які можуть бути доповнені словами. Математичні моделі дозволяють використовувати всю сукупність накопичених знань про поведінку взаємозв'язків так, що логічно пов'язані думки про досліджувану систему можна вивести, не повторюючи всі попередні дослідження. Математичні моделі дають важливий засіб комунікації завдяки однозначності символічної логіки, використовуваної у математиці. Такий інструмент значною мірою позбавлений вад, властивих звичайній мові.

Методологія математичного моделювання має в своєму арсеналі велику кількість як стандартизованих, так і довільних символів і знаків, з-поміж іншого і грецьких, латинських та арабських букв і цифр. Використовуючи їх можна вказати, наприклад, **склад** (X) **екосистеми**. Це означає – виділити множину внутрішніх елементів (за Гільмановим (1978) – $X = \{X_1, \dots, X_n\}$), що її представляють, і множину зовнішніх елементів (V) систем ($V = \{V_1, \dots, V_k\}$), що безпосередньо з нею взаємодіють.

Для подальшого математичного оперування символами можна позначити всі сукупності компонентів екосистеми: V – зовнішні активні елементи; X – внутрішні активні елементи; R^{VX} – дії зовнішніх компонентів на внутрішні (довкілля на систему); R^X – взаємодії внутрішніх активних елементів (або множина системотвірних взаємовідношень); R^{XV} – дії внутрішніх компонентів на зовнішні (системи на довкілля). Отже, системою S буде множина внутрішніх елементів X , структурована взаємовідношеннями R^X , яка пов'язана з навколишнім середовищем V взаємовідношеннями прямої і зворотної дії R^{VX} і R^{XV} .

Для символічного позначення **структури** екосистеми можна застосовувати запис:

$$S = S(V, X, R^{VX}, R^X, R^{XV}).$$

За допомогою знакового апарату можна **формалізувати функціональну будову** екосистеми. Відповідно до загального визначення поняття роботи системи, функція (F) екосистеми в найзагальнішому вигляді і в повному її обсязі є цілісною сукупністю п'яти законів (за Гільмановим, 1978 – **див. розд. 4**):

$$F = F(F_V, F_X, F_R^{VX}, F_R^X, F_R^{XV}),$$

що описують зміну в часі:

- 1) складу навколишнього середовища екосистеми (F_V);
- 2) структури дій середовища на екосистему (F_R^{VX});
- 3) складу і властивостей екосистеми (F_X);
- 4) внутрішньої структури екосистеми (F_R^X);
- 5) структури зворотних дій екосистеми на середовище (F_R^{XV}).

Зазвичай, закони зміни складу навколишнього середовища (1) і структури його дій на екосистему (2) вивчають не на рівні біогеоценозної екосистеми, а на наступному рівні організації біогеосфери, – на рівні ландшафту. У дослідженні екосистем ці закони або вважають заданими, або формують у вигляді гіпотез на основі наявної ландшафтної інформації, а головні зусилля спрямовують на вивчення законів зміни складу і властивостей F_X , структури внутрішніх зв'язків F_R^X і структури зворотних дій екосистеми на навколишній світ F_R^{XV} .

Вади математичних моделей полягають у зовнішній складності для нематематика символічної логіки. Ця складність частково неминуха, якщо досліджувана проблема складна. Тому, цілком можливо, але все ж не обов'язково, що складним виявиться і математичний апарат, необхідний для її опису. Математика, загалом, наука складна, і труднощі у перекладі результатів з мови математики на вербальну мову, зрозумілу для широкого загалу, відчують не лише нематематики. Відсутність словесної інтерпретації результатів складних методів аналізу – це вада багатьох наукових статей, мабуть, унаслідок того, що це питання обговорюють набагато рідше, ніж відповідні математичні аспекти дослідження. Тому математична псевдонаука процвітає і це можна пояснити тим, що порівняно мало людей утруднюють себе перекладом з мови алгебри на вербальну мову, яка дозволяє легко виявити абсурдність тієї або іншої думки, гіпотези чи теорії.

Найбільша вада математичних моделей пов'язана із тим спотворенням, яке можна привнести в саму проблему, наполегливо відстоюючи конкретну модель, навіть якщо насправді вона не відповідає фактам, а також із тими труднощами, що виникають інколи при необхідності відмовитися від моделі, яка виявилася неперспективною. Математичне моделювання таке цікаве заняття, що аналітику дуже легко відірватися від реальності й захопитися застосуванням математичних мов до майстерних абстрактних форм. Саме тому необхідно пам'ятати, що моделювання у прикладному системному аналізі – це лише один з етапів широкої стратегії дослідження.

10.4. Системне моделювання і комп'ютери

Комплексним методом у системному аналізі є **системне моделювання**, що охоплює сукупність конкретних різновидів моделювання, залежно від об'єкта аналізу. Першочерговим є **атрибутивне моделювання** (систематизація інформації про властивості об'єктів). Для нього використовують класифікації, таблиці, матриці, що надають змогу систематизувати властивості об'єктів, розрізнити головні з них і другорядні. Найважливішими є моделювання структури, організації та функціонування системи. Структурно-функціональне моделювання має за мету дослідження взаємозв'язку структури і функції об'єкта або процесу. Можна також застосувати й випробувальне моделювання на життєвість системи, її стійкість, адаптивність тощо (Wallace, 2015).



Стратегічною метою моделювання загалом є використання, а в найкращому разі удосконалення системи-оригінала так, що в результаті для її реалізації була змога найефективніше використовувати матеріальні й інтелектуальні ресурси.

Ця можливість пов'язана із зміною одного чи кількох компонентів і з нововведеннями, які застосують відповідні фахівці. Тому використання або й удосконалення системи-оригінала завдяки аналізу її моделі сприятиме покращенню практичної діяльності або результативності дослідницької чи іншої справи. Отже, призначенням системного моделювання є не просто здобуття всебічних знань про систему, а її оптимізація. У сутності це пошук оптимуму властивостей системи відповідно до певних прагматичних критеріїв оптимальності.

До оптимізаційних математичних належить задача лінійного програмування. Лінійні задачі відзначаються точністю постановки і формулювання умов. Для їх розв'язування опрацьовано багато доволі допустимих методів. У загальних рисах принцип розв'язування лінійних задач полягає в поетапному послідовному переході від вихідного варіанту програми до оптимального.

В загальному випадку задачу лінійного програмування записують так:

$$Z = C^T \times X = \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \rightarrow \text{extr}(\min, \max).$$

За таких умов:

$$A \times X \geq B,$$

або в згорнутому вигляді



$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \geq b_i, \quad i = \overline{1, m},$$

$$X \geq 0, \text{ тобто } x_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n},$$

де:

m – кількість обмежень;

i – індекс порядкового номера обмежень задачі;

Z – лінійна цільова функція;

j – індекс порядкового номера змінних невідомих величин;

n – кількість (множина) шуканих змінних;

x_j – змінні величини, які треба знайти у процесі розв'язування задачі;

c_j – оцінки змінних величин у цільовій функції;

a_{ij} – коефіцієнти змінних в обмеженнях задачі;

b_i – вільні члени (обмеження);

a_{ij}, b_i, c_j – так звані параметри задачі.

У конкретних задачах X означає розміри досліджуваних об'єктів, елементів чи процесів, обсяги забруднювальних викидів, компоненти природного середовища тощо.

Матриця A містить, наприклад, норми внесення добрив, пестицидів, норми затрат ресурсів на одиницю змінної, нормативи виходу продукції на одиницю змінної, нормативи задоволення екологічних потреб, норм тощо. Величини b_i означають запас виробничих або природних ресурсів, екологічні потреби або завдання тощо.

Розрізняють математичний та екологічний оптимуми задачі, які часто не співпадають. **Математичний** оптимум отримують тоді, коли розв'язок задачі задовольняє всі її три частини (складові, групи). Але часто розв'язок лінійних задач є не адекватним щодо реальної екосистеми. Найчастіше не задовільними є біологічні, агрономічні, зоотехнічні вимоги через їх не повне врахування, або помилкове зарахування недієвих чинників у математичній інтерпретації екосистем. **Екологічного оптимуму** можна досягнути тоді, коли буде знайдений математичний екстремум і він відповідатиме всім екологічним вимогам.

Величезний масив наукової і статистичної інформації сьогодні не можливо опрацювати, впорядкувати і застосувати для дослідницьких цілей і моделювання без сучасної комп'ютерної техніки. Сфери застосування методів **комп'ютерного моделювання** є надзвичайно різноманітними і різнобічними.

Більшість технічних систем, у т.ч. обчислювальних систем – комп'ютерів і мереж, зорієнтовані на методи імітаційного моделювання з використанням імовірнісних підходів.



Визначальним чинником успіху у застосуванні імітаційного моделювання з використанням інформаційних технологій є вдалий вибір програмних засобів і мов такого моделювання. Адже програмні системи моделювання обладнані спеціалізованими засобами, які дозволяють зменшити тривалість розроблення імітаційних моделей, використати ефективні можливості щодо організації модельних експериментів на комп'ютері, враховувати у моделях фактор реального часу.

Спеціалізовані програмні інструментарії моделювання, відповідно до видів моделювання, поділяють на три групи: дискретні, неперервні й комбіновані (дискретно-неперервні або неперервно-дискретні).

Для моделювання дискретних систем широке застосування отримав програмний продукт фірми *Minuteman Software* – *GPSS World* (*GPSSW*, *General Purpose System Simulation World* – світова загальноцільова система моделювання). *GPSS World* розроблена для *OC Windows* і максимально орієнтована на використання сучасних інформаційних технологій проектування систем, які забезпечують високу інтерактивність і візуалізацію інформації. Система *GPSS World* базується на мові імітаційного моделювання *GPSS*, яка створена у компанії *IBM* професором Дж. Гордоном. *GPSS World* є подальшим розвитком *GPSS/PC*. Але система *GPSS World* має розширені можливості, оскільки дозволяє моделювати як дискретні, так і неперервні процеси (блок *INTEGRATE*). Для усіх класів об'єктів і змінних у *GPSS World* реалізований динамічний багатовіконний інтерфейс для візуального представлення статистичної інформації у режимі реального часу.

Система *GPSS World* володіє важливими автоматизованими інструментальними засобами проведення дисперсійного (*ANOVA*) і регресійного аналізів, а також здійснення власного експерименту користувачем на основі методології оптимального планування експериментів. Убудована процедурна мова *PLUS* разом з іншими інструментальними засобами дозволяє будувати моделі під час проведення експериментів і створювати користувачем власні бібліотеки процедур. Система має великий набір команд для керування процесом моделювання. Їх можна використовувати як в інтерактивному режимі, так і включати у моделі.



11.1. Статистичні моделі й типи змінних параметрів

Залежно від мети статистичного дослідження виокремлюють два типи моделей: описові (описові або аналітичні) та якісні (поведінки). *Описова модель* дає змогу отримати інформацію про статистично вірогідні взаємозв'язки між найважливішими змінними параметрами екосистеми. Реалізують такий тип моделі методами стохастичного моделювання, заснованого на інструментах теорії вірогідності і математичної статистики.

Розділяють *статичні методи*, що не враховують час як змінну (проста і множинна лінійна й нелінійна кореляція і регресія; дисперсійний, дискримінантний і факторний аналізи, методи оцінки параметрів), і *динамічні методи*, які враховують тимчасову змінну (аналіз Фур'є, кореляційний і спектральний аналіз, вагові й передавальні функції). Подібні моделі, що є регресійними й іншими емпірично встановленими кількісними залежностями, не претендують на розкриття механізму процесу, тому й отримали назву описових.

Якісні моделі поведінки з'ясовують динамічний механізм процесу, котрий вивчають, і вони здатні статистично відтворити спостережувані динамічні ефекти у поведінці системи. *Імітаційні моделі* конкретних складних систем, що враховують всю наявну інформацію про об'єкт, дозволяють прогнозувати поведінку систем або вирішувати оптимізаційні завдання їх експлуатації.

Не претендуємо розглянути всі типи моделей, тому зупинимося лише на тих із них, які системні аналітики використовують найчастіше, а саме динамічні, компартментальні, матричні, багатовимірні, оптимізаційні й інші моделі. Найефективнішими та найпоширенішими в екології є такі типи моделей: динамічні, матричні, стохастичні (просторовий розподіл, дисперсія, регресія тощо), багатовимірні (описові та прогностичні), оптимізаційні.

Огляд елементарних понять статистики, які лежать в основі будь-якої процедури математичного аналізу даних, дозволить нам з'ясувати основні

допуски більшості статистичних методів, призначені для розуміння "чисельної природи" об'єктів і явищ, і привернемо увагу на "функціональних" аспектів обговорюваних понять.

Числові властивості систем виражають параметрами, які називають **змінними** або **варіантами**. Змінні – це певна обмежена кількість вимірів ($x_1, x_2, x_3, \dots x_n$), які називають **обсягом сукупності** (n). Їх можна отримати лише зі всієї **генеральної сукупності** вимірюванням або спостереженням за цілісною системою, яку вивчаємо (популяція, екосистема тощо). Варіанти можна ще змінювати в дослідженнях. Традиційними є вивчення залежностей та експериментальні дослідження. Більшість емпіричних досліджень змінних можна зарахувати до одного із зазначених типів моделей. У першому варіанті аналітик вивчає кореляції та не впливає на змінні, а лише вимірює їх і хоче знайти важливі залежності. В експериментах, навпаки, дослідник корегує деякі змінні та вимірює вплив цих корекцій на інші змінні, а саме: виявляє кореляції між варіантами, на які власне він впливає, і варіантами, на які впливає ця дія. Отже, експериментальні дані дають якіснішу і ширшу інформацію.

Незалежними змінними називають параметри, які дослідник коригує, тоді як **залежні змінні** – це дані, які він лише пасивно вимірює або реєструє. Залежні й незалежні (регресійні) змінні застосовують, здебільшого, в експериментах, де дослідник маніпулює деякими змінними, і в цьому сенсі вони "незалежні" від реакцій і властивостей, притаманних об'єктам дослідження. Натомість інші змінні, згідно з робочою гіпотезою, повинні "залежати" від дій дослідника або від експериментальних умов. Іншими словами, залежність виявляється у реакції-відповіді досліджуваного об'єкта на вчинену на нього дію.

Змінні відрізняються також тим "наскільки добре" вони можуть бути встановлені або, іншими словами, як багато вимірюваної інформації забезпечує шкала їх вимірювання. Іншим чинником, який визначає кількість інформації, що міститься в змінній, є тип шкали, за якою виконане вимірювання. **Типи шкал** установлені такі: номінальна, порядкова (ординальна), інтервальна, відносна (шкала відношення). Відповідно, поширені чотири **типи змінних**: номінальні, порядкові (ординальні), інтервальні й відносні.

Номінальні змінні використовують лише для якісної класифікації систем. Це означає, що такі варіанти можуть бути виміряні лише в термінах приналежності до певних, істотно різних класів (варіант: вид, стать, колір, маса, температура, токсин тощо), і водночас не можна визначити кількість або упорядкувати ці класи. Часто номінальні змінні називають категоріальними.

Порядкові змінні дають змогу ранжувати (упорядкувати) об'єкти, вказавши, які з них більшою чи меншою мірою володіють якістю, вираженою конкретною змінною. Проте, вони не можуть сказати "наскільки

більше" або "наскільки менше". Порядкові варіанти інколи також називають ординальними.

Інтервальні змінні дають змогу не лише упорядковувати об'єкти вимірювання, але й чисельно виразити і порівняти відмінності між ними (метри, градуси Цельсія, кілограми тощо).

Відносні змінні подібні на інтервальні. Водночас їхньою особливістю є наявність певної відправної точки – абсолютного нуля. Наприклад, температура за Кельвіном утворює шкалу відношення. Інтервальні шкали (наприклад, шкала Цельсія, шкала кутових градусів) не мають такої властивості.

11.2. Властивості зв'язків між змінними і статистичні критерії

Незалежно від типу, дві або більше змінних пов'язані між собою, якщо виявлені значення цих змінних розподілені не випадково, тобто їхні параметри систематичним чином погоджені один з одним у спостереженнях. Завершальна мета будь-якого дослідження або наукового аналізу полягає у знаходженні кореляцій між варіантами. Адже немає іншого способу представлення інформації, окрім як у показниках залежностей між кількостями або якостями, вираженими якими-небудь змінними. Розвиток природничих наук полягає у знаходженні нових зв'язків між змінними, і ці зв'язки підтверджують взаємодію або взаємозалежність між елементами системи.

Одними з простих моделей збільшення чисельності популяції організмів є експоненціальна та логістична, задані диференціальними рівняннями:

$$dy/dt = \beta \times y, \text{ або } dy/dt = \beta \times y(1 - y/k),$$

де: y – щільність популяції у момент t ; β – константа; k – сталий рівень популяції. Один із прикладів біотичного процесу, який можна представити подібною моделлю, – це ріст дріжджів до того, як почне виснажуватися середовище. Швидкість росту в будь-який момент часу за сталості поживних речовин та інших чинників дорівнює постійній частці від щільності популяції в цей момент. Виразити цей зв'язок можна також рівнянням:

$$y = y_0 \times e^{\beta \times t},$$

де: y – щільність популяції у момент t ; y_0 – щільність в момент $t = 0$; β – константа; e – основа натурального логарифму. Головне в тому, що рівняння показує чітко встановлену логічну залежність між чисельністю популяції та часом її розмноження. Врахування інших змінних, наприклад, зменшення поживи чи конкуренцію (рівняння Лотки-Вольтерри), розширює "інформаційну потужність" математичної моделі.

Традиційно розрізняють дві найпростіші **властивості зв'язків** між варіантами: величина залежності та надійність залежності.

Величину залежності легше зрозуміти і виміряти, ніж надійність. Проте **надійність** ("істинність") взаємозалежності надзвичайно важлива. Цей показник пов'язаний із репрезентативністю **вибіркової сукупності** або **вибірки**, на основі якої будують висновки про цілу систему. Надійність говорить про те, наскільки вірогідно, що знайдена екологом залежність буде знову виявлена іншими дослідниками і підтвердиться на даних іншої вибірки, котра буде отримана із тієї ж власне генеральної сукупності (того ж об'єкта дослідження). Потрібно пам'ятати, що остаточною метою майже ніколи не є вивчення власне конкретної вибірки – вона становить інтерес лише настільки, наскільки надає інформацію про всю генеральну сукупність властивостей – об'єкт, процес, явище як систему.

Якщо дослідження відповідає деяким спеціальним критеріям, то надійність знайдених залежностей між варіантами вибірки можна кількісно оцінити і представити за допомогою стандартної статистичної міри (так званий *P*-рівень або статистичний рівень (критерій) значущості). **Статистична значущість** результату є оціненою мірою упевненості в його "істинності", тобто "репрезентативності вибірки". Її показник *P*-рівень – це індекс, що перебуває в низхідній залежності від надійності результату. Вищий *P*-рівень відповідає меншому ступеню довіри до знайденої у вибірці залежності між варіантами. Саме *P*-рівень є показником вірогідності помилки, пов'язаної з поширенням спостережуваного результату на всю генеральну сукупність. Наприклад, $P = 0,05$ (тобто $1/20$) показує, що є 5%-а вірогідність, коли знайдений у вибірці зв'язок між змінними, є лише випадковою особливістю цієї вибірки. Іншими словами, якщо певна залежність у генеральній сукупності відсутня, а подібні експерименти проводити багато разів, то приблизно в одному з двадцяти повторень можна сподіватися на таку ж, або тіснішу залежність між змінними. Вірогідність повторення результатів, які показують наявність залежності у генеральній сукупності, називають **статистичною потужністю плану**. У багатьох дослідженнях *P*-рівень = 0,05 розглядають як прийнятну межу ризику помилки.

Вибір певного рівня значущості, вище за який результати відхиляють як помилкові, є досить довільним. На практиці остаточне рішення зазвичай залежить від того, чи був результат передбачений апіорі (тобто до проведення досліду) або виявлений апостеріорно в результаті багатьох аналізів і порівнянь, виконаних із масою даних, а також на підході в певній галузі досліджень. Зазвичай у багатьох галузях результат $P < 0,05$ є прийнятною межею статистичної значущості. Проте потрібно пам'ятати, що цей рівень все ще містить велику вірогідність помилки (5% – рис. 10.1).

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ В АГРОЕКОЛОГІЇ...

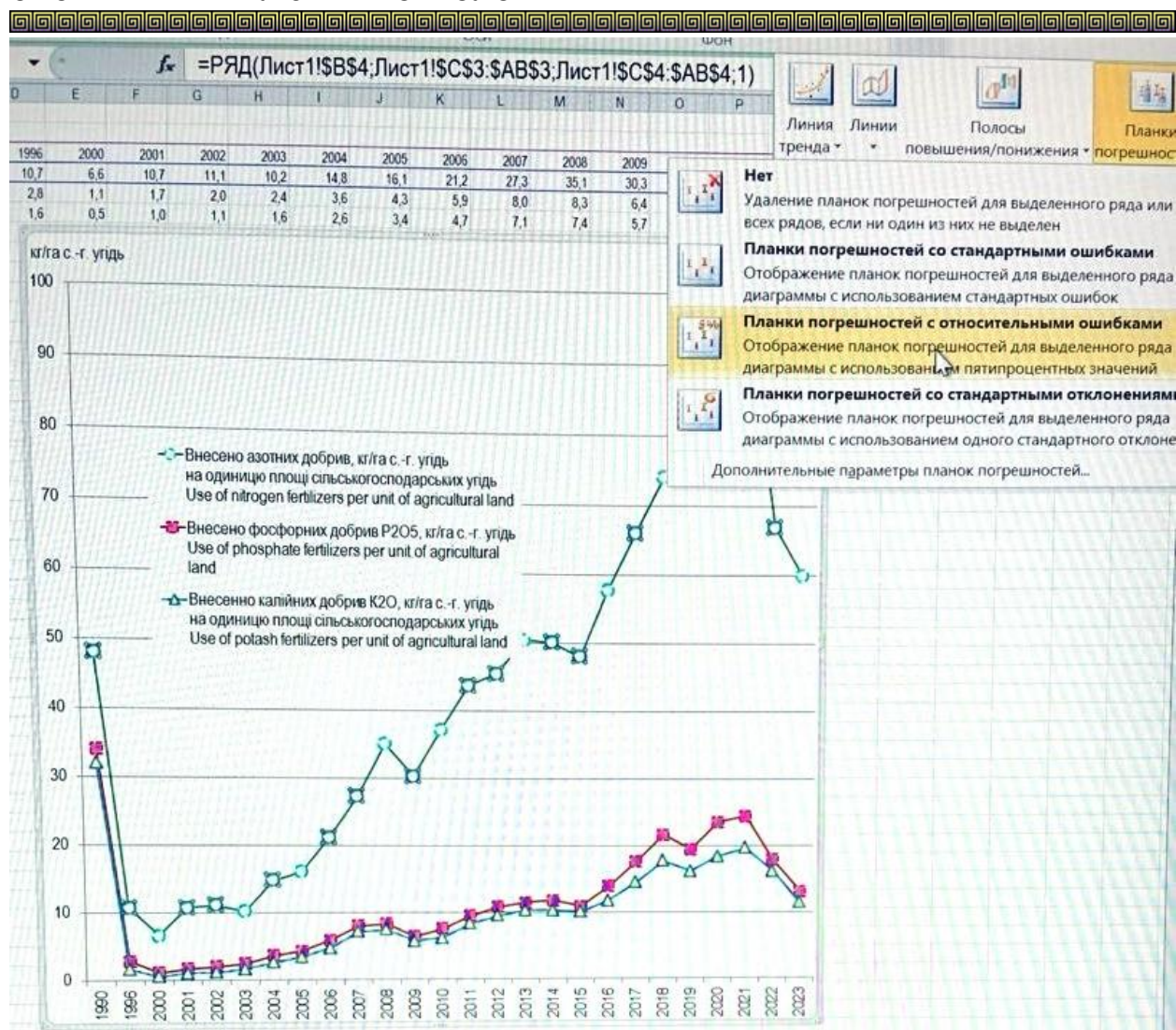


Рис. 11.1. Відображення планок 5% помилки засобами пакету MExcel

Результати на рівні $P < 0,01$, зазвичай, розглядають як безсумнівно статистично значимі, а результати з рівнем $P < 0,005$ чи $P < 0,001$ як вагомо значущі. Водночас потрібно розуміти, що така класифікація рівнів значущості досить довільна і є неформальною угодою, прийнятою на основі практичного досвіду в тій або іншій галузі.

Чим більша величина залежності (зв'язку) між варіантами у вибірці звичайного обсягу, тим вона надійніша. У різних обсягах вибірки одна і та ж залежність може виявитися як вагомо значущою, так і не значущою зовсім. Слабкі зв'язки можуть бути значимо доведеними лише на великих вибірках. Якщо ж залежність "об'єктивно" дуже тісна, тоді її можна виявити з високою мірою значущості навіть на дуже маленькій вибірці. Відсутність зв'язків потрібно завжди розглядати як значимий результат дослідження.

Статистики розробили багато різних мірил взаємозв'язку між змінними. Вибір певного критерію в конкретному дослідженні залежить від кількості варіантів, використовуваних шкал вимірювання, природи залежностей

тощо. Більшість критеріїв підпорядковані загальному принципу: вони призначені оцінити спостережувану залежність, за порівняння її з "максимальною уявною залежністю" між конкретними варіантами, або порівнювати те, що є в них загального, з тим, що потенційно було б у них загального, якби ці варіанти були абсолютно залежні (рис. 11.2).

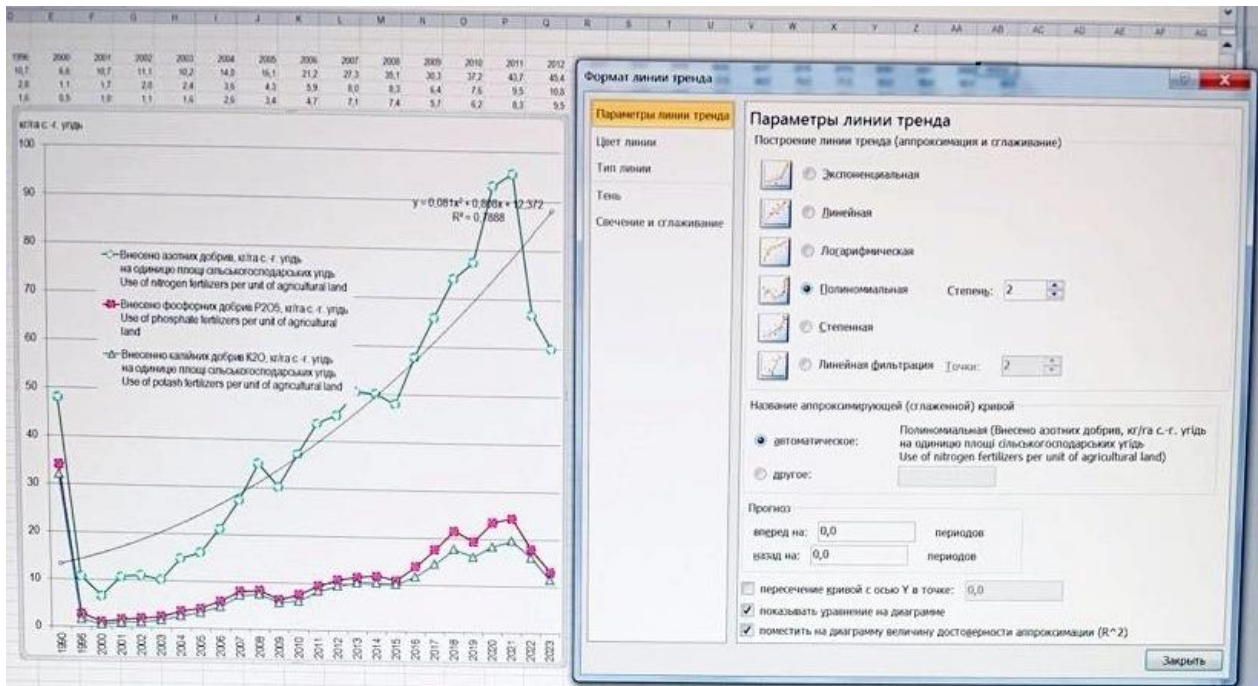


Рис. 11.2. Відображення поліноміальної регресії та індекса апроксимації теоретичної кривої до фактичної динаміки змін засобами пакету MExcel

Регресійне рівняння показує тренд динаміки внесення добрив, а теоретична лінія візуалізує ідеальний хід подій. Індекс R^2 (від 0,0 до 1,0) показує, якою мірою ці дві лінії подібні.

Будь-який хороший критерій залежності повинен охоплювати повну мінливість індивідуальних значень у вибірці і оцінювати залежність за тим, наскільки ця мінливість пояснюється залежністю, яку вивчають.

Оскільки остаточна мета більшості **статистичних критеріїв** полягає в оцінюванні залежності між варіантами, більшість статистичних тестів є відношенням загальної для цих варіантів мінливості до повної мінливості.

Як обчислюють рівень статистичної значущості? Припустимо, що вже обчислена міра зв'язку між двома змінними. Наступне питання – наскільки значуща ця залежність? Потрібна така функція, яка представляла би залежність між "величиною" і "значущістю" залежності між змінними для кожного обсягу вибірки. Ця функція



Карл Фрідріх Гаусс
(1777-1855)

вказує точно "наскільки ймовірно отримати залежність цієї величини (і більше) у вибірці певного обсягу, якщо є припущення, що в генеральній сукупності такої залежності немає". Іншими словами, ця функція дає рівень значущості (P -рівень), і, отже, вірогідність помилково відхиляти припущення про відсутність певної залежності. "Альтернативну" гіпотезу, яка полягає в тому, що немає залежності між варіантами, називають **нульовою гіпотезою**. Нульова гіпотеза – це початкова точка, з якою зіставляють емпіричні результати.

Більшість функцій, що дають рівень значущості, пов'язані з дуже важливим класом розподілів, який назвали нормальним розподілом Гауса (рис. 11.3).

Нормальний розподіл важливий з багатьох причин. Він є однією з емпірично перевірених істин стосовно загальної природи дійсності, тому його потрібно розглядати як один із фундаментальних законів природи. Точна форма нормального розподілу – дзвоноподібна крива, визначається лише двома параметрами: **генеральним середнім** (середнім арифметичним вибірки) $\bar{X}$ і **стандартним відхиленням** σ .

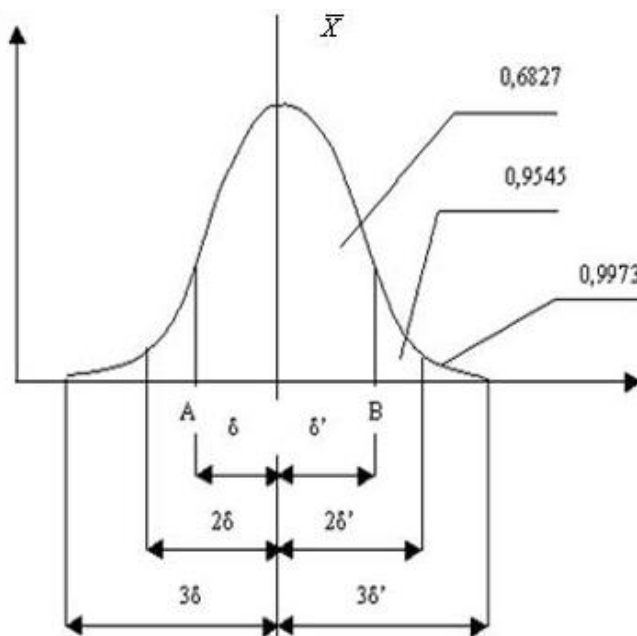


Рис. 11.3. Нормальний розподіл (розподіл Гауса)

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}$$

Особлива властивість нормального розподілу полягає в тому, що приблизно 68% всіх його спостережень лежать у діапазоні $\pm 1\sigma$ стандартне відхилення від середнього, а діапазон $\pm 2\sigma$ стандартних відхилень містить приблизно 95% значень. Іншими словами, за нормального розподілу стандартизовані спостереження менші за -2σ або більші за $+2\sigma$, мають відносну частоту менше ніж 5%.

Стандартизоване спостереження або нормоване відхилення будь-якої змінної означає, що з вихідного значення віднято середнє і результат поділений на стандартне відхилення (σ – корінь квадратний із **дисперсії** σ^2).

Більшість статистичних критеріїв мають нормальний розподіл, або мають розподіл, пов'язаний із нормальним і обчислюваний на його основі. З них такі відомі, як t , F :

$$t = \frac{x - \bar{X}}{\sigma}; F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2};$$

або χ^2 -розподіл, розподіл Пуассона. Зазвичай ці критерії вимагають, аби аналізовані змінні самі були нормально розподілені в сукупності. Багато спостережуваних варіант дійсно нормально розподілені, й у багатьох випадках можна використовувати тести, засновані на припущенні нормальності, якщо **обсяг вибірки** (n) досить великий. Така можливість ґрунтується на надзвичайно важливому принципі, а саме:



за зростання обсягу вибірки форма розподілу сукупності, тобто розподіл вибіркової статистики критерію, наближається до нормальної, навіть якщо розподіл досліджуваних змінних не є нормальним.

Проте, у міру збільшення обсягу вибірки, використовуваної для здобуття розподілу вибіркового середнього, цей розподіл наближається до нормального. Зазначимо, що за обсягу вибірки $n = 30$, вибірковий розподіл є майже нормальний.

11.3. Основні статистичні методи у дослідній справі

Кореляція Пірсона (1896) – найчастіше вживаний аналіз даних, який також називають лінійною залежністю, оскільки вона вказує міру прямих зв'язків між варіантами. Коефіцієнт кореляції може змінюватися від -1.00 до $+1.00$. Значення -1.00 вказує на обернену кореляцію, значення $+1.00$ – на пряму, значення 0.00 – на відсутність кореляції. **Кореляція** означає міру, за якою значення двох змінних пропорційні одне одному. Коефіцієнт кореляції Пірсона між векторними змінними $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ та $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ обчислюють за формулою:

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}) \times (y_i - \bar{Y})}{n \times \sigma_x \times \sigma_y},$$

де $\bar{X}$ та $\bar{Y}$ – середні значення змінних $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ та $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ відповідно.

Найточнішу кореляцію між змінними можна встановити, коли обсяг вибірки n є в інтервалі від 20 до 100 пар. Для оцінки тісноти кореляції за

обчисленими коефіцієнтами застосовують різні шкали. Найпростішою є шкала Чеддока (Chaddock R. E. Principles & methods of statistics. Boston, New York. 1925. 471 p.). В залежності від значень коефіцієнта кореляції зв'язок може мати вербальну оцінку (табл. 11.1)

Таблиця 11.1. Шкала оцінки сили лінійної кореляції Р. Е. Чеддока (1925)

Коефіцієнт кореляції Пірсона (1896), r	Зв'язки
менше 0,10	відсутні
0,11 ÷ 0,30	слабкі
0,31 ÷ 0,50	помітні
0,51 ÷ 0,70	помірні
0,71 ÷ 0,90	тісні
0,90 ÷ 1,00	вельми тісні

Графічне зображення кореляції Пірсона – це пряма лінія на площині у просторі двох координат, яка задається рівнянням

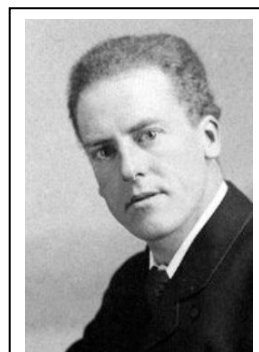
$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x.$$

Змінна $\hat{y}$ може бути виражена через константу (β_0) і кутовий коефіцієнт (β_1), помножений на змінну x . Константу інколи називають також вільним членом, а кутовий коефіцієнт – регресійним або бета-коефіцієнтом. Така одностороння стохастична лінійна залежність між випадковими величинами показника (регресанта) Y і фактора (регресора) X називається парною лінійною регресією.

У багатомірному варіанті, коли є більше, ніж одна незалежна змінна, зв'язок між залежною змінною Y та незалежними змінними $X_1, X_2, \dots, X_m$ називають множинною (поліноміальною) регресією, і процедури множинної регресії потрібно оцінювати за параметрами лінійного рівняння такого виду:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \times X_1 + \beta_2 \times X_2 + \beta_3 \times X_3 + \dots + \beta_m \times X_m.$$

У природничих і суспільних науках надзвичайно широко використовують множинну регресію. Загальне призначення **множинної регресії** полягає в аналізі зв'язку між кількома незалежними змінними (регресорами або предикторами) і залежною змінною. Вона дозволяє аналітику поставити питання й отримати відповідь на те, "що є кращим сильнішим предиктором для y ". Наприклад, в екології дослідник міг би побажати встановити, які чинники є кращими предикторами для успішного й швидкого знешкодження токсикантів у довкіллі тощо.

Карл Пірсон
(1857-1936)

Наведемо приклад з'ясування тісноти зв'язку для оптимізації екоумов при вирощуванні рослин (табл. 11.2).

Табл. 11.2. *Результати дослідження росту сіянців сосни у розсаднику*

Місяць	Сума температур вище 10°C	Вологість, %	Висота, см
	x_1	x_2	y
IV	390	62	1,5
V	446	76	1,9
VI	853	85	3,5
VII	1450	80	4,2
VIII	1991	75	5,6
IX	2757	84	6,3
X	2310	88	6,7

Необхідними для них є поживні речовини, волога, оптимальний газовий склад і вологість повітря, світло і тепло тощо. Для сіянців різних порід дерев, що вирощують у розсадниках, існують оптимальні параметри більшості цих факторів. Якщо ці параметри не вдається забезпечити за рахунок місцевих природних кліматичних ресурсів, то застосовують відповідні агротехнічні засоби. Від кількості сонячної енергії, як відомо, залежать теплозабезпечення і великою мірою відносна вологість повітря приземного шару ґрунту. Розглянемо вплив цих факторів на ріст сосни звичайної, тобто залежність росту сіянців сосни від теплозабезпечення та вологості.

Попередніми дослідженнями (Дрейпер, 2007) встановлено, що цю залежність найкраще описує рівняння логарифмічного типу:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln x_1 + \beta_2 \cdot \ln x_2,$$

де y – висота сіянців; β_0 – вільний член; β_1, β_2 – коефіцієнти; x_1 – сума температур більше +10°C за період вирощування, x_2 – відносна вологість. Дослідні дані задачі представлені в табл. 11.1.

Рівняння регресії для цієї задачі таке:

$$y = -17,53 + 2,46 \cdot \ln x_1 + 1,01 \cdot \ln x_2,$$

а коефіцієнт детермінації $R^2=0,98$. Отже, розрахунки підтверджують тісний кореляційний зв'язок росту сіянців сосни з параметрами вологості й температури в умовах розсадника.

Основною метою *дисперсійного аналізу Фішера* (1920), який тепер називають ANOVA, є дослідження значущості різниці між середніми двох і більше виборок. Якщо порівнювати середні в двох вибірках, то дисперсійний аналіз дасть той же результат, що і звичайний t -критерій для незалежних виборок (якщо порівнюються дві незалежні групи об'єктів або

спостережень) або T -критерій для залежних виборок (якщо порівнюються дві змінні на одній і тій же множині об'єктів або спостережень).

Обсяг вибірки (n) при застосуванні дисперсійного аналізу повинен становити від 3 до 8, а кількість порівнюваних вибірових сукупностей (груп – варіантів досліду) – не перевищувати 15. Такі умови сприяють найбільшій точності аналізу. Для вибірки (n) дисперсію обчислюють як суму квадратів відхилень від вибіркового середнього за формулою:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x - \bar{X})^2}{n - 1}.$$

В основі дисперсійного аналізу лежить розчленування дисперсії на компоненти. Перевірка значущості різниць у дисперсійному аналізі заснована на порівнянні компоненти дисперсії, зумовленої міжгруповим розкидом (середнім квадратом ефекту) і компоненти дисперсії, зумовленої внутрішньогруповим розкидом (середнім квадратом помилки). Якщо підтвердиться нульова гіпотеза (рівність середніх у порівнюваних вибірових сукупностей), то можна чекати порівняно невелику різницю вибірових середніх через суто випадкову мінливість. Тому за нульової гіпотези внутрішньогрупова дисперсія практично збігатиметься із загальною дисперсією, підрахованою без урахування групової приналежності. Отримані внутрішньогрупові дисперсії можна порівняти за допомогою F -критерію, який указує чи дійсно відношення дисперсій є більшим чи меншим за одиницю.



Якщо відмінність між вибіровими сукупностями значуща (F -критерій > 1), то нульову гіпотезу відхиляють і приймають альтернативну – про наявність різниці між середніми вибірових сукупностей.

Далі здійснюють обчислення точності досліду, **найменшої істотної різниці** та абсолютної чи відносної різниці між середніми для інтерпретації результатів експерименту.

Інтервальний прогноз індивідуального значення визначається як:

$$Y - t_{\alpha} \cdot \sigma_n \leq Y_0 \leq Y + t_{\alpha} \cdot \sigma_n,$$

або

$$Y - t_{\alpha} \cdot \sigma_u \cdot \sqrt{1 + X_0^T \times (X^T \times X)^{-1} \times X_0} \leq Y_0 \leq Y + t_{\alpha} \cdot \sigma_u \cdot \sqrt{1 + X_0^T \times (X^T \times X)^{-1} \times X_0},$$

де: X_0 – матриця очікуваних пояснювальних змінних; σ_u – стандартна похибка; t_a – критичне значення t -критерію при $n - m$ ступенях свободи та рівні значущості α .

Дисперсійний аналіз дозволяє вивчати реакцію кожного елемента системи за зміни властивостей іншого чи інших елементів. Це, насправді, і є основною причиною його більшої статистичної потужності, адже для здобуття значимих результатів потрібні менші обсяги виборок. З цієї причини дисперсійний аналіз навіть на невеликих вибірках дає статистично значущі результати. Ще більше можливостей надає багатофакторний дисперсійний аналіз, але найбільше плідним він може бути лише до трьох факторів.

Метод **кластерного аналізу** охоплює набір різних алгоритмів класифікації. Загальне питання, яке постає перед дослідниками в екології, в тому, як організувати отримані дані в наочні структури, тобто розгорнути таксономії. Наприклад, виникає потреба розподілити рослини чи тварини екосистеми на різні групи за ролями, аби змістовно описати їхні екофункції. Фактично, кластерний аналіз є не стільки статистичним методом, скільки набором різних алгоритмів розподілу об'єктів по кластерах. Методи кластерного аналізу використовують тоді, коли немає яких-небудь апіорних гіпотез стосовно класів, але реалізується описова стадія дослідження. Потрібно розуміти, що кластерний аналіз визначає найбільш можливо значуще рішення. Тому перевірка статистичної значущості насправді тут не актуальна, інколи, недоречна.

Основна мета алгоритму деревоподібної кластеризації полягає в об'єднанні об'єктів у групи з використанням певної міри подібності, яка реалізована у формі відстані між цими об'єктами (див. рис. 3.1 розд. 3). Графічним результатом такої кластеризації є ієрархічне дерево – **дендрограма**. На **діаграмах** осі представляють відстань об'єднання. Ці відстані можуть бути визначені в одновимірному або багатовимірному просторах. Найпростіший шлях обчислення відстаней між об'єктами в багатовимірному просторі полягає у з'ясуванні **евклідової відстані**. Якщо кластеризація зроблена у дво- або тривимірних координатах, то цей показник є реальною прямою відстанню між об'єктами x_1 та x_2 в просторі. Евклідова відстань – це найзагальніший тип відстані, є геометричною відстанню у багатовимірному просторі. Її обчислюють за формулою:

$$L(x_1, x_2) = \left\{ \sum (x_1 - x_2)^2 \right\}^{1/2}.$$

Евклідову відстань обчислюють за початковими, а не за стандартизованими даними. Цей спосіб обчислення має певні переваги, оскільки відстань між двома об'єктами не змінюється при введенні в аналіз нового об'єкта, який може виявитися не співрозмірним. Проте, на відстані можуть вагомим впливати розмірності осей, по координатах яких обчислюють ці відстані. Наприклад, якщо одна з осей виміряна в сантиметрах, то перевід

її в міліметри вагомо змінить остаточну відстань. Іноді стандартну Евклідову відстань зводять до квадрату, щоби надати більшої ваги віддаленішим один від одного об'єктам.

Головними завданнями **факторного аналізу** є: 1) зменшення кількості змінних (редукція даних); 2) визначення структури взаємозв'язків між змінними, тобто класифікація змінних. Підтверджуючий факторний аналіз дозволяє перевіряти гіпотези про факторну структуру для множини змінних в одній або кількох вибірках. Аналіз відповідностей – це описово-розвідувальний метод, призначений для опрацювання дво- і багатовходових таблиць, що містять певні взаємозв'язки між рядками і стовпцями. Результати цього аналізу дають інформацію, подібну на ту, яку надає факторний аналіз, і дозволяють вивчити структуру категоріальних змінних, що входять у таблицю. Якщо дві або кілька взаємозалежних змінних об'єднані в один чинник, то за головною ідеєю факторного аналізу здійснено аналіз головних компонент. В основному процедура виокремлення головних компонент подібна до обертання, яке максимізує дисперсію вихідного простору змінних.

11.4. Перспективи нейронних мереж та суперкомп'ютерів

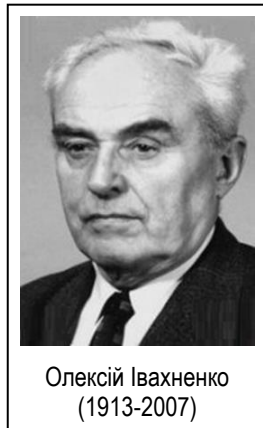
Із поширенням застосування комп'ютерної техніки в агросекторі та сфері збереження довкілля набув популярності метод штучних **нейронних мереж**. Цей метод раніше був застосований у хімічних дослідженнях, медицині, молекулярній біології.

Лише упродовж 2022-2023 років штучні нейромережі стали повсякденністю. Сьогодні наші задачі вирішують Chat GPT, Midjourney, DeepCode – загалом 13 найпоширеніших поширених нейромереж із різних категорій.

Штучні нейронні мережі ("штучний інтелект" – ШІ або англ. *artificial intelligence*, AI) описують, як здатність комп'ютерного або керованого комп'ютером робота виконувати завдання, які зазвичай можуть виконувати розумні істоти. Цей термін застосовують для розроблення систем, спроможних, на перший погляд, на інтелектуальні процеси, властиві людині: міркувати, означувати, узагальнювати, вчитися на минулому досвіді. Назвати роботу комп'ютерів інтелектуальним процесом можна з великим перебільшенням, тому дефініція "штучний інтелект" більше медійна чи художньо-літературна, ніж науково-технологічна, тому виважено буде брати її у лапки.

Із часу розроблення в 1940-х роках цифрових комп'ютерів вони були запрограмовані на виконання дуже складних завдань, таких як виявлення доказів математичних теорем або гри в шахи.

Український вчений математик-інформатик, творець наукової школи індуктивного моделювання і засновник глибокого навчання нейромереж Олексій Івахненко запропонував метод групового урахування аргументів (МГУА). Він був розроблений для індуктивного моделювання, розпізнавання та прогнозування складних процесів і систем. МГУА є унікальним підходом до розв'язання проблем *штучного інтелекту* і навіть новою філософією наукових досліджень, які стали можливими завдяки сучасним комп'ютерам. Новий підхід "від даних – до загальної моделі" полягає у тому, що після введення даних дослідник тільки вибирає клас моделей, тип генерації моделей і задає критерій вибору моделі. Цей підхід можна розглядати як одну з реалізацій тези про штучний інтелект, яка стверджує, що комп'ютер може діяти як порадник для людей.



Олексій Івахненко
(1913-2007)



Джеффри Гінтон
(народ. 1947)

Незважаючи на постійний прогрес у швидкості комп'ютерного оброблення даних та в об'ємах пам'яті, до нині немає програм, які могли б хоч наблизитися з людською інтелектуальною спроможністю та обсягом спеціальних, чи повсякденних знань. Проте, деякі програми досягли рівня ефективності експертів і професіоналів у виконанні певних конкретних завдань, тому "штучний інтелект" навіть з нинішніми обмеженими спроможностями можна знайти в таких різноманітних програмах, як медична діагностика, комп'ютер, пошукові системи, розпізнавання голосу чи рукописного тексту. 1989 року "штучний інтелект" вперше описав Джеффри Гінтон (Hinton, 2013).

Дослідження "штучного інтелекту" тривають двома різними і певною мірою конкуруючими методами: символного (або "зверху вниз") підходу та коннекціоністського (або "знизу вгору") підходу. Низхідний підхід відтворює інтелект шляхом аналізу пізнання незалежно від біологічної структури мозку, з точки зору обробки символів ("символьна мітка"). Підхід "знизу вгору", з іншого боку, передбачає створення штучних нейронних мереж для імітації структури мозку (коннекціонізм). Для ілюстрації різниці між цими двома підходами, розглянемо завдання побудови системи, обладнаної оптичним сканером, який розпізнає літери алфавіту.

Підхід "знизу вгору" зазвичай передбачає навчання штучної нейронної мережі шляхом представлення їй букв одну за одною, поступово покращуючи точність та ефективність шляхом "налаштування" мережі. Налаштування регулює реакцію різних нервових шляхів людини на різні подразники.

Підхід "зверху вниз", зазвичай, передбачає написання комп'ютерної програми, яка порівнює кожну літеру з їхніми геометричними описами. Простіше кажучи, нейронні дії є основою підходу "знизу вгору", а символні описи – основою підходу "зверху вниз".

Ідея нейронних мереж виникла в результаті спроб змодельовати поведінку живих організмів, які сприймають ефекти зовнішнього середовища і навчаються на отриманому власному досвіді (Gates, 2023). Такі ідеї на полях інтеграції різних галузей знань властиві сучасній науці.

Стисло опишемо ідею нейронних мереж.

Ключовим поняттям у такому моделюванні, запозиченим у біології, є нейрони – особливі нервові клітини, які приймають, перетворюють і поширюють сигнали. Аби нейромережа правильно обробляла інформацію, її потрібно навчати. Цей процес відбувається за допомогою методу зворотного поширення помилки (backpropagation). У 1989 році цей метод описав Джефрі Гінтон.

Щоб зрозуміти принцип роботи методу, потрібно розібратися з кількома термінами:

- 1) нейрон – в комп'ютері **персептрон**, структурна одиниця та основний "будівельний складник" нейромережі. Він отримує інформацію, обробляє її та передає значення іншим персептронам;
- 2) шар – своєрідна система, в яку збираються персептрони;
- 3) поріг – це показник, що визначає, чи буде персептрон активним;
- 4) вага – коефіцієнт, який визначає силу сигналу при з'єднанні **персептронів**. Простіше кажучи, вага показує наскільки сильно один **персептрон** впливає на інший;
- 5) функція активації, або передавальна функція – це залежність, яка показує, як вхідний сигнал нейрона впливає на вихідний.

Отже, у комп'ютері штучний нейрон – це **персептрон**. Їх, зазвичай, у ньому дуже багато і вони сполучені між собою за допомогою спеціальних волокон, подібно до нервових, які передають більший, або менший електричний потенціал у середину тіла персептрона. Коли потенціал перевищує визначний поріг, персептрон отримує настільки потужний сигнал, що надсилає його по вихідному провідниковому волокну.

Окремі персептрони сполучають один з одним різноманітними методами. Це дозволяє створювати різноманітні штучні персептронні мережі з різною архітектурою, правилами навчання і можливостями. Багатошаровий персептрон може імітувати функцію практично будь-якого ступеня складності.

11.5. Системна робота штучних (комп'ютерних) нейромереж (*artificial intelligence*)

Нейрокомп'ютер – це обчислювальна система з архітектурою материнської плати типу MSIMD (паралельно-векторна модифікація), в якій реалізовані два принципових технічних рішення: спрощено до рівня нейрона процесорний елемент однорідної структури і стрімко ускладнені зв'язки між елементами; програмування обчислювальної структури перенесено на зміну вагових зв'язків між процесорними елементами. Загальне визначення нейрокомп'ютера може бути представлено таким чином.



Нейрокомп'ютер – це обчислювальна система з архітектурою апаратного і програмного забезпечення, адекватною виконанню алгоритмів, представлених у нейромережевому логічному базисі.

Опишемо просту модель *персептрона*, яка працює, нейрон мозку людини. Отже, нейрон має кілька вхідних каналів, які називаються дендритами, і одним із каналів виведення інформації є аксон. Аксони нейрона людини комунікують з дендритами інших нейронів за допомогою синапсів. При спрацьовуванні нейрон посилає електроімпульс уздовж свого аксона. Через синапси сигнал передається іншим нейронам, які своєю чергою можуть бути збуджені або, навпаки, перебувати в стані загальмованості. Такі біологічні аналогії природно описують процес навчання, створюючи контекст для математичних міркувань.

Нейрон людини збуджується, коли сумарний рівень сигналів, що надходять в нього, перевищує певний рівень (поріг збудження або активації). Інтенсивність сигналу, що приймається нейроном, залежить від активності синапсів. Отже, важливе наступне. Нейрон отримує сигнали через кілька вхідних каналів. Кожен сигнал проходить через з'єднання, яке назвали синапсом, яке має певну інтенсивність, або вагу, що відповідає синапсній активності людського нейрона. Існує також стохастична модель нейрона, в якій вихідним сигналом є випадкова величина, яка приймає пару значень, що відповідають гальмуванню, або збудженню.

Взаємопов'язані нейрони утворюють мережу, яка математично визначає складне багатовимірне перетворення, зібране з найпростіших перетворень. Примітно, що за допомогою технічного втілення таких простих перетворень можна апроксимувати дуже складні багатовимірні функції, отже, оцінювати складні залежності.

Виходи нейронів з'єднані з входами інших нейронів, завдяки чому сигнал від одного нейрона передається іншим нейронам (нейрон повідомляє іншим нейронам про свій стан) (рис. 11.3). Звичайно, з математичної точки

зору ми маємо перетворення початкових значень X на вході мережі в значення Y на виході.

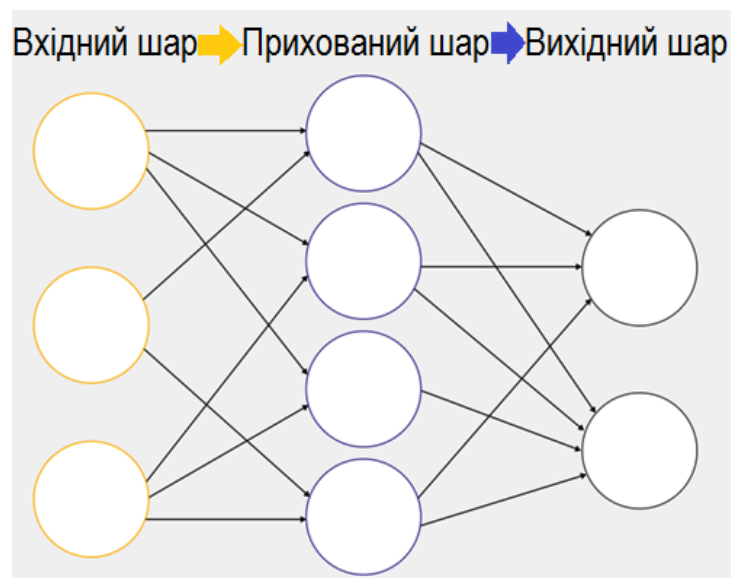


Рис. 11.3. Схема простої нейромережі з двома вихідними шарами

Говорячи біологічною мовою, входи і виходи відповідають чутливим і руховим нервам людини. Крім входних і вихідних нейронів, можуть бути й інші проміжні (приховані) шари нейронів. Найпростіші мережі мають структуру, показану на рис. 11.4.

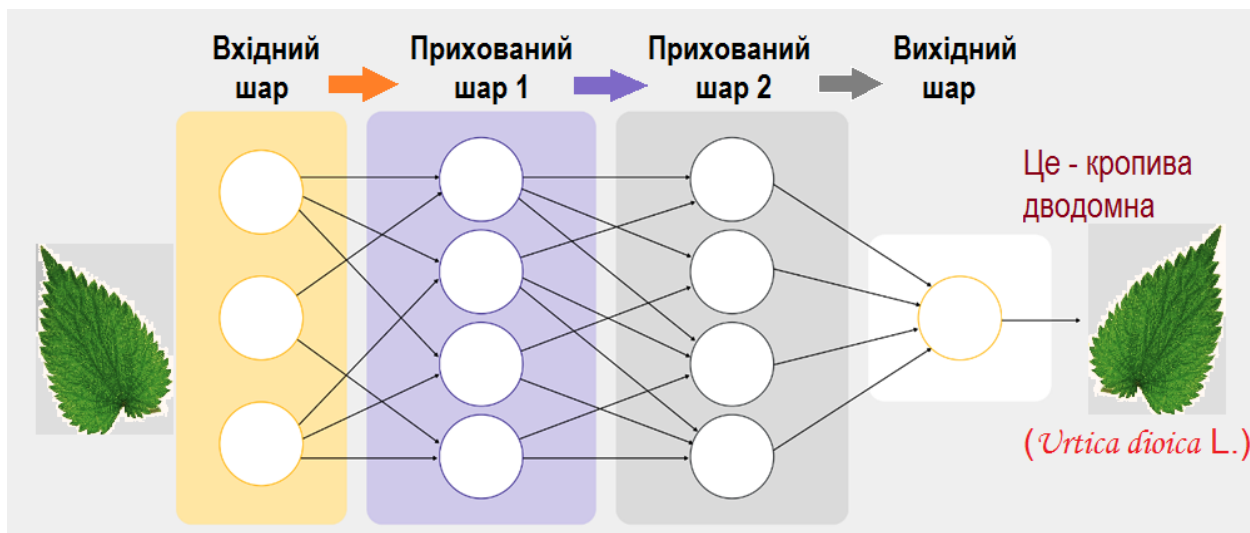


Рис. 11.4. Схема процесу навчання нейромережі з одним вихідним шаром ідентифікувати ботанічний вид рослини

Спрощено процедура відбувається так: користувачі "показують" нейромережі набір входних та вихідних даних. Нейромережа обробляє інформацію і генерує вихідні дані, які збігатимуться з заданими.

Якщо результат неправильний, вхідні параметри змінюється і все повторюється заново. Пряма передача сигналу: сигнали проходять від входів через приховані елементи і в кінцевому підсумку до вихідних елементів (див. рис. XX). Кожен персептрон, як елемент мережі, описується своїм набором параметрів. Вхідний шар використовується для введення значень вхідних змінних, а вихідний шар використовується для виведення результатів.

Приховані вихідні персептрони сполучені з усіма елементами попереднього шару. За подачі на вхідні елементи значень вхідних змінних (вхідний сигнал), збуджуються персептрони першого проміжного шару, потім другого і в результаті перетворений сигнал надходить на вихідний шар (Joly et al, 2014; Yahiaoui et al., 2012).

Нейромережі ефективно використовують для розв'язання наступних задач (Open AI. 2024):

- для прогнозування на основі аналізу часових рядів;
- для ідентифікації об'єктів і класифікації;
- для оптимізації процесів і об'єктів.

Як запевняють N. A. Eckardt, E. A. Ainsworth, R. N. Bahuguna et al. (2023), розвиток штучного інтелекту слід спрямувати так, щоб допомогти нагодувати людство. Але для цього мережу потрібно навчати, або тренувати.

Перед використанням нейромережі проводять її навчання, що є ітераційним процесом налаштування вагових коефіцієнтів. Для навчання використовують спеціальні алгоритми. Найбільше розповсюдження отримали градієнтні методи – алгоритм зворотного поширення похибки (Back Propagation), зв'язаних градієнтів, RProp та інші.

Основна особливість нейромереж полягає в тому, що в процесі навчання вони моделюють складну нелінійну залежність між вхідними і вихідними даними (Teuwen & Moriaikov, 2020).

Для перевірки адекватності побудованої нейромережі використовують спеціальний метод – тестове підтвердження, в якому аналізують відсоткове співвідношення між вірними вихідними значеннями та помилковими. При незадовільному результаті перевірки проводять навчання з використанням інакше підібраної навчальної вибірки даних для потрібної корекції вагових коефіцієнтів.

S. Varela, X. Zheng, J. Njuguna et al. (2025) навели приклад, як навчання нейрокомп'ютера може прискорити біологічні дослідження. Застосування таких інструментів для полегшення з'ясування фази розвитку на основі даних датчиків було обмеженим необхідністю великої кількості навчальних даних для кожного контексту. Це головне вузьке місце, оскільки збір навчальних даних, як правило, є дорогим і трудомістким. Дослідження авторів показало, як підхід навчання може вирішити ці проблеми шляхом мінімізації кількості людського контролю, необхідного для збору

та внесення даних. Авторами було проведено тематичне дослідження для порівняння підходів з використанням зображення від БПЛА для визначення фази квітучості міскантуса на польових ділянках, де вегетують два його види. Автоматичний аналіз аерофотознімків дозволив ідентифікувати посіви приблизно у 9 разів швидше, ніж тривав візуальний огляд полів людьми. Застосування дронної стратегії навчання зменшило потребу в даних, анованих людиною, на 1–2 порядки порівняно з традиційними підходами до навчання з повним контролем.

Пошуки оптимальних технологій тривають і на інших культурах (Kumar, Desai & Balasubramanian et al., 2021).

11.6. Графічні моделі та інфографіка

Для полегшення швидкого сприйняття великого масиву даних символічні моделі доповнюють графічними рисунками (Cairo, 2012; Friendly & Wainer, 2021).



Інфографіка (інформаційна графіка (англ. *Infographics*) – це спосіб графічної візуалізації даних або знань для компактного відображення комплексної інформації.

Типовий метод візуалізації у статистичному аналізі – це використання **категоризованих графіків**: гістограм, діаграм розсіювання, імовірнісних графіків, лінійних графіків, діаграм розмаху, кругових діаграм, графіків пропущених значень і діапазонів, 3D графіків, тернарних графіків, піктографіків.

Одним з найпотужніших аналітичних методів дослідження є розділення ("розбиття") даних на групи (категорії) для порівняння структури отриманих підмножин. Ці методи широко застосовують як у розвідувальному аналізі даних, так і в ході перевірки гіпотез, і відомі вони під різними назвами (класифікація, групування, категоризація тощо). Наприклад, взаємозв'язок між віком і ризиком інфаркту може відрізнитися для чоловіків і жінок (для чоловіків ця залежність тісніша). Або, наприклад, залежність між якістю пального і токсичністю викидів можна відображати для легкових і вантажних автомобілів, або певних марок тощо.

Графічні засоби або категоризовані графіки надають особливі переваги і дозволяють виявити закономірності, які важко піддаються кількісному опису і які вельми складно виявити за допомогою обчислювальних процедур (наприклад, складні взаємозв'язки, виключення або аномалії). У цих випадках графічні методи надають унікальні можливості багатовимірного аналітичного дослідження або "видобутку" даних.

Категоризовані графіки ще називають графіками на решітках. Ці графіки є наборами двовимірних, тривимірних, тернарних або n -мірних графіків. Найтиповіші з них гістограми, діаграми розсіяння, лінійні графіки, поверхні, тернарні діаграми розсіяння тощо.

Гістограми використовують для вивчення розподілів частот значень змінних. Такий частотний розподіл показує, які саме конкретні значення або діапазони значень досліджуваної змінної трапляються найчастіше, наскільки розрізняються ці значення, чи розташована більшість спостережень біля середнього значення, є розподіл симетричним або асиметричним, багатомодальним (тобто має дві або більш за вершину) або одномодальним тощо. Гістограми також використовують для порівняння спостережуваних і теоретичних або очікуваних розподілів.

Двовимірні **діаграми розсіяння** використовуються для візуалізації взаємозв'язків між двома змінними X і Y (наприклад, вагою і висотою). На цих діаграмах окремі точки даних представлені маркерами на площині, де осі вказують змінні. Дві координати (X і Y), що визначають положення точки, відповідають значенням змінних. Якщо між змінними існує тісний взаємозв'язок, то точки на графіку утворюють упорядковану структуру (наприклад, пряму лінію або певну криву). Якщо змінні не взаємопов'язані, то крапки утворюють "хмаринку". На рис. 11.5 поданий приклад **тривимірної діаграми**, на сторонах трикутника якої відображені діапазони часток (%) піску, мулу та глини у ґрунтах.

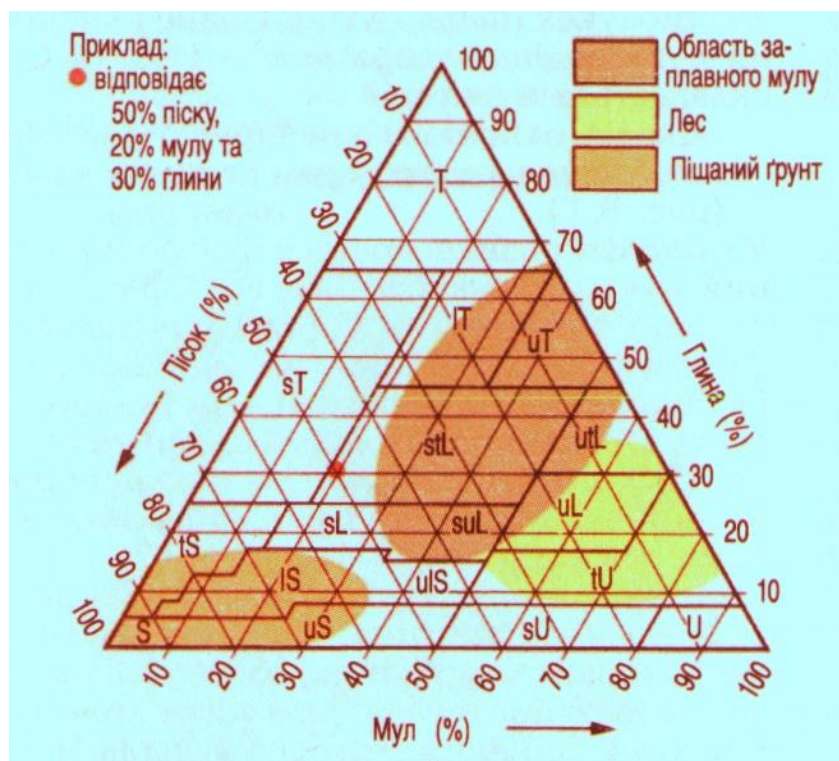


Рис. 11.5. Діаграма типів ґрунту за гранулометричним складом, % (модель "тривимірна діаграма" – проста інфографіка)

Вона візуалізує область властивостей різних за гранулометричним складом їх типів. Наприклад, лес як ґрунтотвірна осадова порода може містити від 50 до 90% мулу, від 15 до 50% глини та до 35% піску. Відповідно до таких пропорцій класифікують різні типи ґрунтів за їхнім гранулометричним складом.

Є три типи категоризованих *імовірнісних графіків*: нормальні, напів-нормальні та з виключеним трендом. Нормальні графіки – це швидкий спосіб візуальної перевірки міри відповідності даних нормальному розподілу. Графіки квантиль-квантиль (або К-К) використовують для пошуку в певному сімействі розподілів того розподілу, який щонайкраще описує наявні дані.

Графіки вірогідність-вірогідність (або В-В) використовують для перевірки відповідності конкретного теоретичного розподілу наявним вихідним даним. На цих графіках для кожного значення категоріальних змінних (X або X і Y) або для заданих умов вибору складних підгруп створюють по одному графіку вірогідність-вірогідність.

На *лінійних графіках* окремі точки даних з'єднують лініями (рис. 11.6).

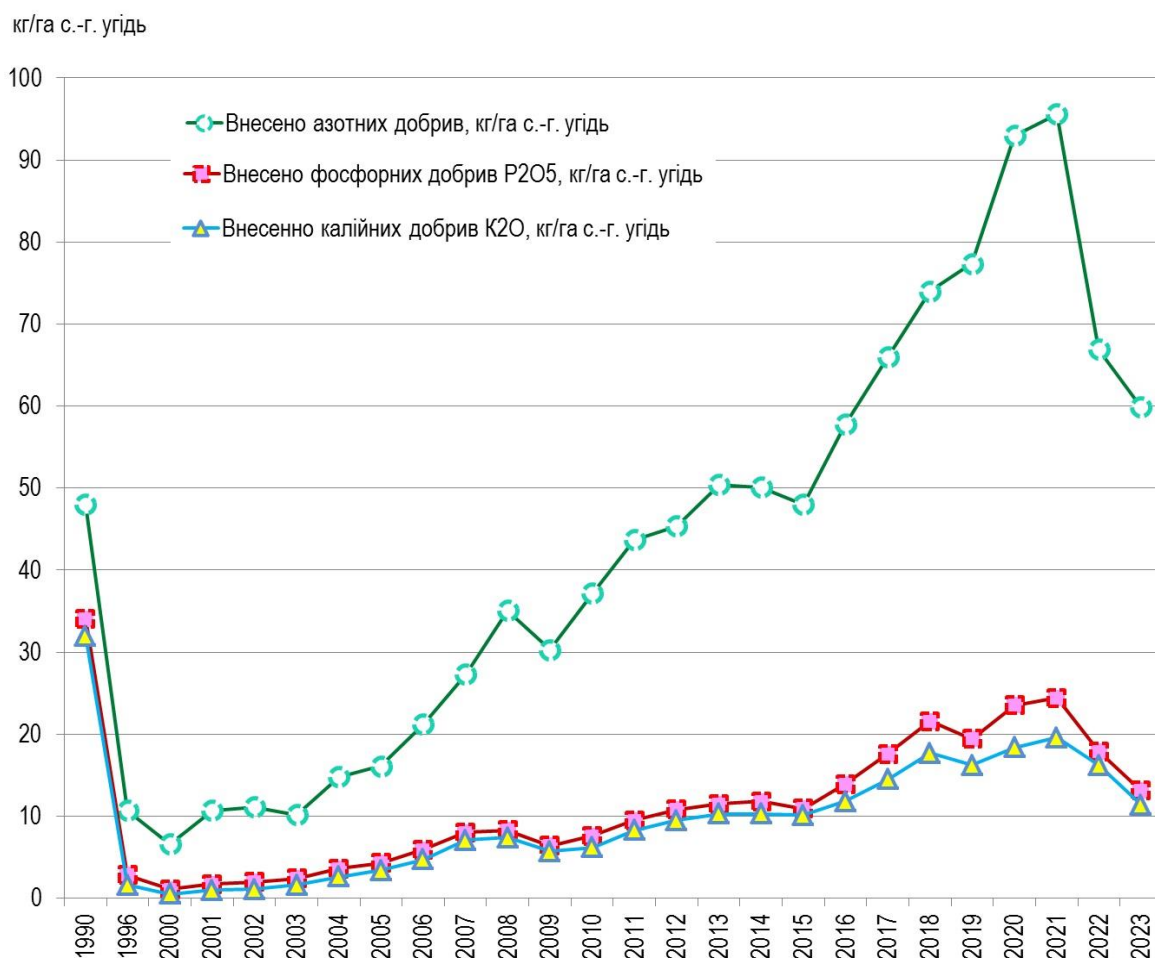


Рис. 11.6. Динаміка обсягів внесення азоту, фосфору і калію в Україні (модель типу "категоризовані лінійні графіки")

Це простий спосіб візуального представлення послідовності значень (наприклад, температура повітря за кілька діб тощо).

Категоризовані лінійні графіки будують у тому разі, якщо необхідно розподілити дані на кілька груп (категоризувати) за допомогою групувальної змінної або за допомогою логічних умов, складених за кількома змінними.

На **діаграмах розмаху** зображені діапазони значень вибраної змінної (або змінних) для окремих груп спостережень. Для виділення цих груп використовують від однієї до трьох категоріальних змінних або набір логічних умов вибору підгруп. Для кожної групи спостережень обчислюють центральну тенденцію (медіана або середнє).

Одним із найширше використовуваних типів графічного представлення даних є **кругові діаграми**, на яких показані пропорції або власне значення змінних. Категоризовані графіки цього типу мають кілька кругових діаграм, де дані розділені групами за допомогою однієї або кількох групувальних змінних (наприклад, зони – рис. 11.7) або категоризовані згідно з логічними умовами вибору підгруп.

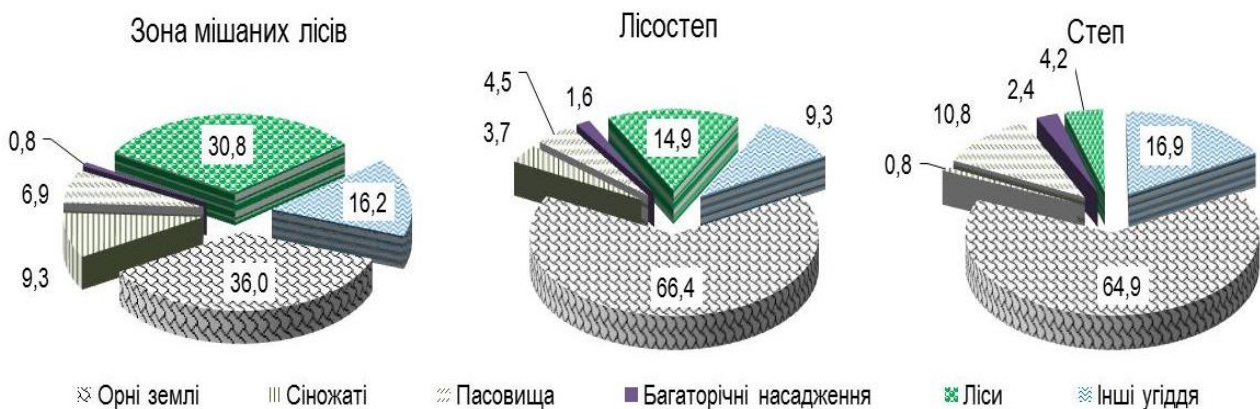


Рис. 11.7. Співвідношення площ у структурі угідь природних зон України, %

(модель типу "категоризовані кругові діаграми")

Тривимірні (3В; англ. аналог 3D – *П.Г.* і *О.С.*) **діаграми** розсіяння (просторові, спектральні й діаграми відхилень тощо), карти ліній рівня і поверхні також можна побудувати для підгруп спостережень, заданих за допомогою вибраної категоріальної змінної або логічних умов вибору (рис. 11.8). Основне завдання цих графіків – спростити порівняння взаємозв'язків між трьома і більше змінними для різних груп або категорій спостережень.

Тривимірні графіки в координатах X-Y-Z відображують взаємозв'язки між трьома змінними. Наприклад, на рисунку 11.8 легко довести синергічну дію двох чинників – внутрішнього (збільшення вмісту зольних сполук у клітинах листків під впливом зовнішніх умов мінерального живлення) та зовнішнього (підвищення температури ґрунту, а відповідно і ксерофілізації

середовища життя рослини), на синтез ліпідів в асиміляційному апараті бука лісового у складних умовах вегетації.

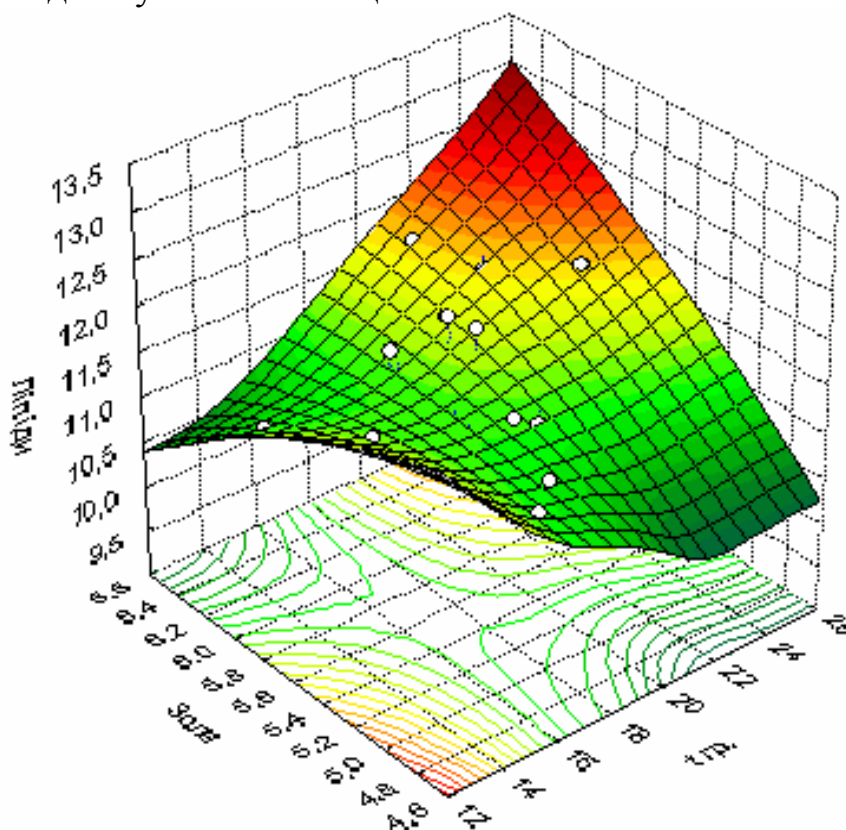


Рис. 11.8. Утворення ліпідів у листках бука лісового залежно від рівня нагромадження зольних елементів і температури ґрунту (°C) у середині вегетації в насадженні вулиці Львова, % у сухій масі (модель типу "тривимірна (3В) діаграма")

На цьому ж рисунку можна бачити виразну негативну дію кожного чинника зокрема за однобічного впливу: нагромадження золи негативно впливає на утворення жироподібних сполук за сталої низької температури, або ж підвищення температури ґрунту в зоні кореневої системи дерев за мінімального засвоєння зольних елементів рослинами теж сповільнює утворення жирів у листках.

За допомогою різних способів графічного моделювання можна комплексно відображати статистику, виниклу проблему, способи та перспективу її вирішення. Прикладом може служити План Єврокомісії України для досягнення нульового забруднення повітря, води та ґрунту, який у формі візуальної інфографіки показаний на рисунку 11.9.

Зокрема, планом дій визначено ключові цілі на 2030 рік:

- покращення якості повітря для зменшення кількості передчасних смертей, спричинених забрудненням повітря, на 55%;
- зменшення кількості пластикового сміття у морі (на 50%) та мікропластику, що викидається в навколишнє середовище (на 30%);

- покращення якості ґрунтів за рахунок зменшення втрат поживних речовин та використання хімічних пестицидів на 50%;
- зменшення на 25% площі екосистем ЄС, де забруднення повітря загрожує біорізноманіттю;
- зменшення на 30% частки людей, що хронічно страждають від шуму транспорту;
- істотне зменшення утворення відходів, зокрема на 50% – залишкових побутових відходів.



Рис. 11.9. План Єврокомісії для досягнення нульового забруднення повітря, води та ґрунту (модель типу "складна інфографіка")

11.7. Системне моделювання в агроєкології та захисті природного середовища

Оскільки представлені у попередніх розділах моделі описують екологічні природні й антропогенні явища, найкращий успіх вони можуть мати, коли будуть інтегровані у систему. Системне моделювання з вербальними методами, зі структурними схемами, математичними й графічними моделями покажемо на прикладі проблемної екоситуації в гавані Сан-Дієго – міста на південному заході США (Південна Каліфорнія, узбережжя Тихого океану), як її описав Б. К. Скірта (1990).



Рис. 11.10. Популяція бурих водоростей роду *Macrocystis* C.Agardh – підводні „ліси“ біля узбережжя Каліфорнії (США).

Вербальна модель проблеми є наступною. Від 1940 року поблизу берегів м. Сан-Дієго внаслідок скидів стічних вод почали зникати популяції бурих водоростей роду *Macrocystis* C.Agardh, що становили основу літоральної акваекосистеми затоки Сан Дієго. Це своєрідні підводні "ліси" (рис. 11.10), що підтримують існування набагато більшого числа видів, ніж будь-які інші рослинні ценози на Землі. Особливо важливі бурі водорості для морських їжаків, молюсків і риб. Фітоценози цих водоростей є притулком для морських видр – каланів, що свого часу зникали і тепер є під охороною Червоного списку МСОП.

Вони споруджують собі спальні з водоростей і живляться морськими їжаками, які є невід'ємним компонентом шельфової акваекосистеми. За відмирання бурих водоростей на оголених ділянках дна стрімко розмножуються морські їжаки (*Echinoidea* N.G.Leske), оскільки вони харчуються як водоростями, так і мертвою органікою. За зменшення популяції морських їжаків водорості швидко відростають. Проте, згодом вияснилося, що ці тварини можуть живитися органічними компонентами, збільшення кількості яких спричинили стоки, які скидає місто у затоку.

Тому їхня популяція втратила залежність від первинної природної кормової бази. Отже неприродний спалах чисельності морських їжаків став катастрофою для фітоценозів бурих водоростей, котрі не могли природно відновлюватися через виїдання молодих рослин їжаками. Екоситуація, що виникла, потребувала вирішення. Спроби врятувати водорості

разовими скиданнями негашеного вапна або штучним розмноженням водоростей не дали позитивного результату. Тільки після припинення скидів у затоку рівновага в акваекосистемі відновилася.

Описану вище екоситуацію можна змодельовати, побудувавши і проаналізувавши *знаковий граф* екосистеми (рис. 11.11). Цей знаковий граф можна представити у вигляді *матриці* E (табл. 11.2), в якій елементи e_{ik} вказують на зв'язок між вузлами u_i та u_k .

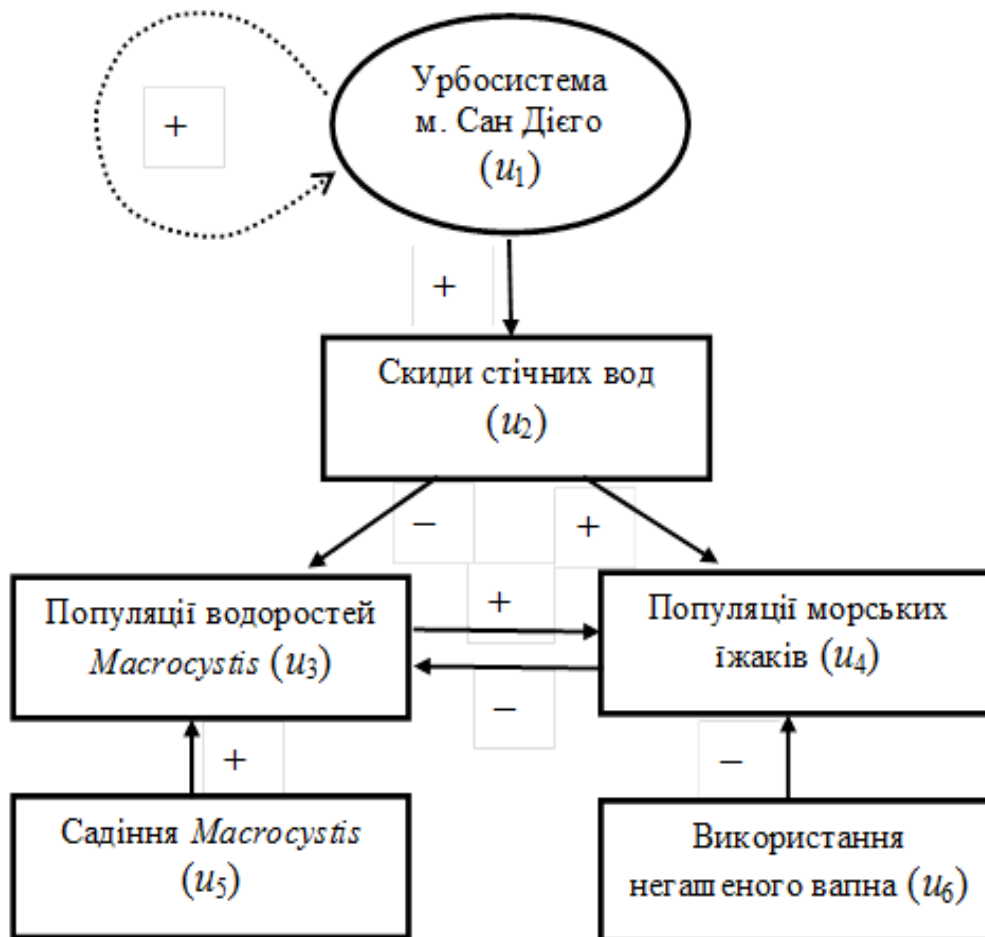


Рис. 11.11. Граф проблеми шкочинності скиду стічних вод урбосистеми м. Сан-Дієго

На практиці аналіз систем на стійкість і прогнозування динаміки зміни їхнього стану ведуть числовими методами, приймаючи, що елементи матриці суміжності орграфа системи є сталими величинами. Процедuru такого аналізу називають *імпульсною процедурою*.

Імпульсна процедура полягає в наступному. Будують орграф екосистеми, виділяючи в ньому лише найважливіші, з погляду експерта, функції.

Орграф – це орієнтований граф, дугам (ребрам) якого присвоюють напрямки. Залежно від глибини задачі й мети моделювання обмежуються побудовою простого, знакового чи зваженого графа, задаючи однакові, або ж специфічні для кожного зв'язку значення часу затримки τ_{ik} . Далі

знаходять найбільший загальний дільник чисел τ_{ik} (позначимо його буквою τ без індексів) і присвоюють кожній дузі відповідне їй число $T_{ik} = \tau_{ik}/\tau$, яке в такому випадку буде цілим числом, пропорційним часу затримання τ_{ik} .

Табл. 11.2 – *Вигляд матриці суміжності $E = (e_{ik})$ урбосистеми м. Сан-Дієго*

Зв'язок	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
u_1	1	1	0	0	0	0
u_2	0	0	-1	1	0	0
u_3	0	0	0	1	0	0
u_4	0	0	-1	0	0	0
u_5	0	0	1	0	0	0
u_6	0	0	0	-1	0	0

Створивши в такий спосіб орграф, будують його матрицю суміжності $E = (e_{ik})$, задаючи початковий стан системи і присвоюючи кожній з вершин початкове значення $v_{i(0)}$.

Далі активізують одну або декілька вершин шляхом присвоєння їм відмінного від нуля початкового приросту $p_{i(0)}$. Іншим вершинам надають нульове значення початкового приросту, покладаючи для них $p_{k(0)} = 0$. Приріст

$$P_{(k)} = (p_{1(k)}, p_{2(k)}, \dots, p_{n(k)})$$

показника вершини відіграє таку ж роль, що і варіація, але на відміну від варіації, приріст є обмеженою величиною. Починаючи від моменту $t_0 = 0$, вісь часу розбивають на однакові відрізки тривалістю τ , утворюючи послідовність моментів часу із загальним членом виду $t_k = k \cdot \tau$.

Потім, спираючись на аналогію між приростом і варіацією, розраховують значення приростів у наступні моменти часу за їхніми значеннями у попередні моменти відповідно до формули:

$$P_{(k)}^T = (t_k - T_{im}) \cdot E \times P_{(k-1)}^T.$$

Якщо всі часи затримки τ_{ik} однакові, то всі $T_{ik} = 1$.

Значення показників вершин розраховують за формулою:

$$v_{i(k)} = v_{i(k-1)} + p_{i(k-1)}.$$

На основі цих даних будують графіки імітації – графіки залежності значень показників вершин $v_{i(k)}$ і приростів $p_{i(k)}$ від номера кроку імітації для всіх i від одиниці до n . Отже, за допомогою цих формул модель, зобра-



жену на рис. 11.11, досліджують математичними методами, а далі будують графіки (рис. 11.12 і 11.13). Вектор-рядок, що активізує граф, має тут такий вигляд: $p_1 = (1-0-0-0-0-0)$ або $p_2 = (1-0-0-0-1-1)$.

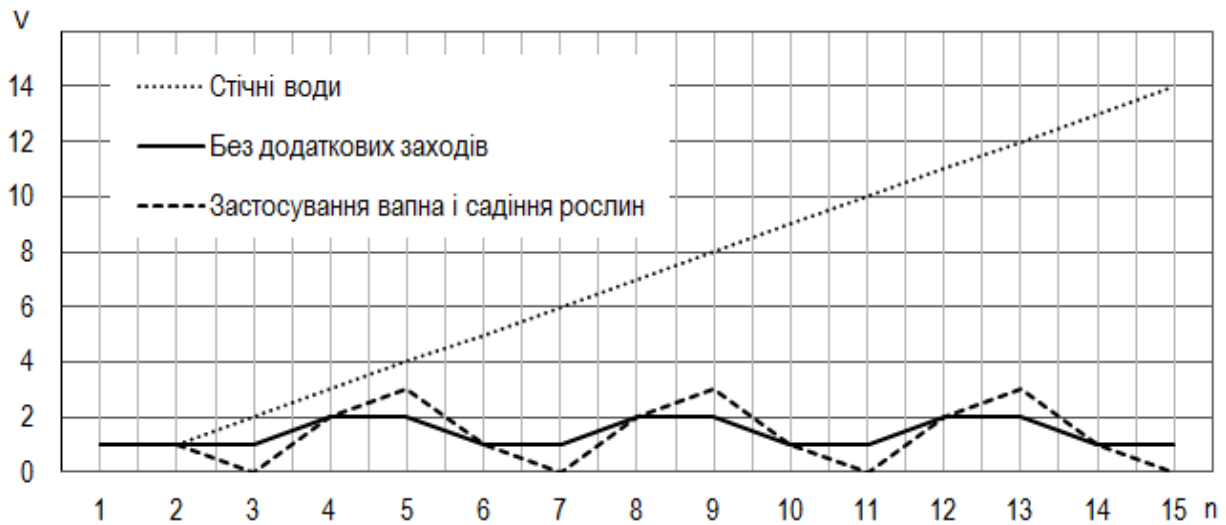


Рис 11.12. Тенденції динаміки популяції бурих водоростей
(*Macrocystis* C. Agardh)

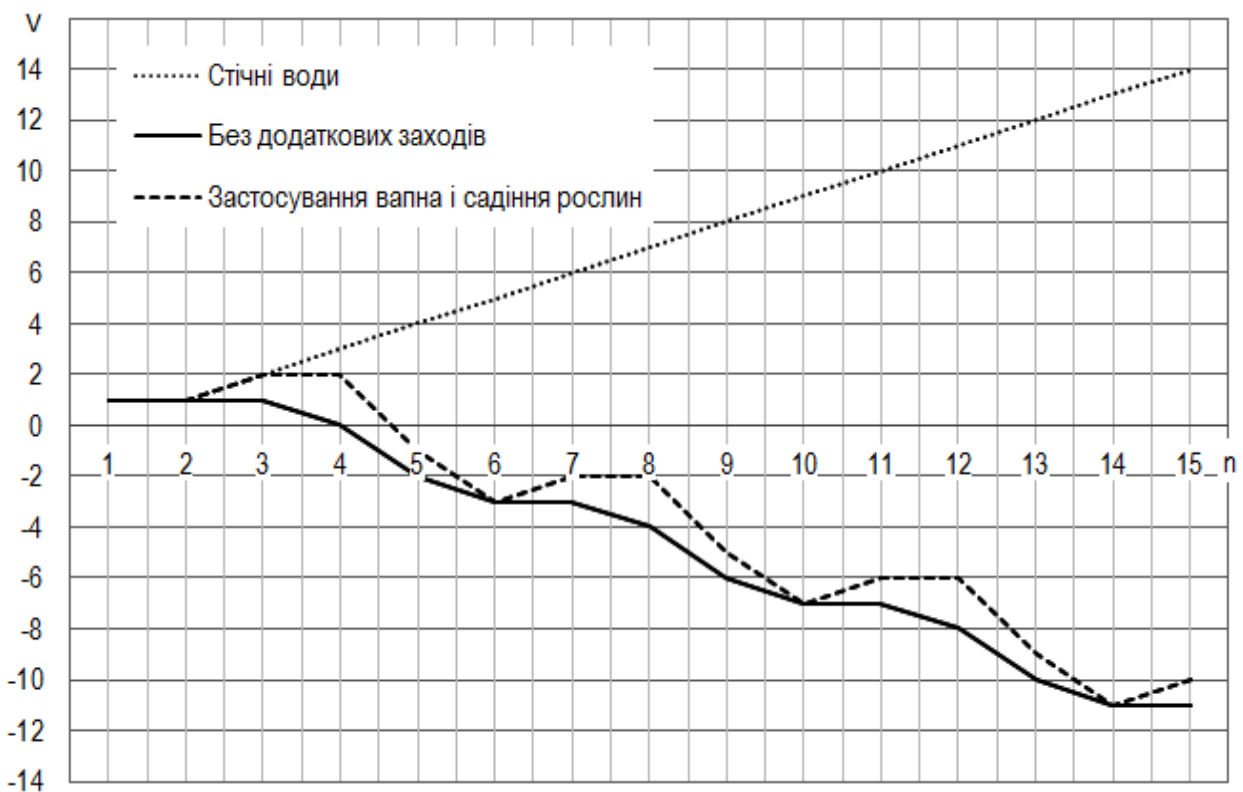


Рис. 11.13. Тенденції динаміки популяції морських їжаків
(*Echinoidea* Leske)

Наступний приклад математичного моделювання стосується захисту природного довкілля від техногенного забруднення.

Поширеною проблемою безпеки довкілля є підвищений рівень шуму, особливо уздовж багатосмугових шосе, автобанів, залізничних колій. У європейських країнах це питання вирішують спорудженням спеціальних шумозахисних щитів, створенням насаджень тощо. У проектуванні й при здачі в експлуатацію шумозахисних інженерних споруд потрібна експертиза для прийняття рішення.

Методика експертизи джерел шумового забруднення ґрунтується на математичному аналізі ситуації на автомагістралях. Алгоритм роботи експертної групи санітарно-епідеміологічної служби наступний.

Перший етап – відбір конкретних відтинків і точок вимірювання шуму на міських автомагістралях за участю проектних і архітектурних організацій. Вибір і кількість точок вимірювань на тій, чи іншій магістралі визначається її довжиною, кількістю перехресть і їх типом, профілем вулиць, складом автомобільного потоку тощо. За відсутності ухилу на рельєфі точку вимірювання вибирають у середині перегону, за ухилу дороги – з боку підйому транспорту.

Слід враховувати розташування об'єктів з підвищеними вимогами до шумового режиму. До них належать: лікувальні установи, школи, дитячі садки, ясла, місця відпочинку, санаторії і тощо. У такому випадку точки вимірювання необхідно прив'язувати до місць розташування цих об'єктів.

Другий етап – вимірювання. Транспортні шуми фіксують на магнітну стрічку або визначають безпосередньо шумоміром. У першому випадку оброблення даних проводять за допомогою статистичного методу в октавних або третьоктавних смугах звукових частот і за кривою корекції. Останнім часом широко застосовують інтеграційні шумоміри, які дозволяють оцінити еквівалентний рівень шуму за певний період часу безпосередньо зі шкали приладу. Значення рівнів шуму, які одержані після опрацювання вимірів на автомагістралі, роблять карту джерел шуму. Для прогнозування шумових параметрів їх слід представляти розрахунковим шляхом.

Третій етап – розрахунковий. Шумовою ознакою потоків автомобільного транспорту є величина $L_{\text{Аекв}}$ (вимірюють в децибелах акустичних – дБА), яку визначають розрахунковим шляхом залежно: від інтенсивності руху упродовж 8 годин в найгучніший період світлого відрізка доби; від частки вантажного і громадського транспорту в потоці; від середньозваженої швидкості потоку; з урахуванням наявності у потоці трамваїв, геометричних особливостей шляху, роздільності смуг руху тощо.

Розрахунок очікуваних рівнів шуму на магістральних вулицях (L_A , дБА) в результаті руху транспортного потоку виконують за формулою:

$$L_A = L_{7,5} + \sum_{j=1}^9 K_j,$$

де: $L_{7,5}$ – розрахунковий (базовий) рівень шуму транспортного потоку (60% громадського й вантажного транспорту з карбюраторними двигунами; середня швидкість руху $40 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$) на відстані 7,5 м від осі найближчої смуги руху на висоті 1,2 м від поверхні проїзної частини прямолінійної, горизонтальної ділянки дороги з асфальтобетонним покриттям за відсутності на відстані 50 м перешкод, які можуть відбивати звук, дБА;

K_1 – поправка на тип вантажних автомобілів і автобусів з карбюраторними двигунами в потоці;

K_2 – поправка на тип вантажних автомобілів і автобусів з дизельними двигунами в потоці;

K_3 – поправка на наявність трамваїв у транспортному потоці;

K_4 – поправка на швидкість транспортного потоку;

K_5 – поправка на ухил дороги;

K_6 – поправка на ширину роздільних смуг;

K_7 – поправка на спосіб руху на перехресті;

K_8 – поправка, яка враховує вплив швидкості руху на різних типах дорожнього заощення;

K_9 – поправка, яка враховує особливості забудови.

Ці поправки вибирають із довідкових таблиць.

Як наступний практичний приклад, представимо математичну модель, яка описує явище поширення забруднень у водотоці з процесами сорбції і десорбції в системі "вода–наноси" та осадження (сорбції) в системі "завислі стоки–донні осади". Ця математична модель поширення стійких речовин побудована на системі трьох диференціальних рівнянь переносу та дифузії у водному потоці, взаємодії забруднень потоку із завислими наносами та донними осадами:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \times \alpha_{(x)} \times \frac{\partial U}{\partial x} - V_{(x)} \times \frac{\partial U}{\partial x} - \lambda_{(x)} \times U + \mu_{2(x)} \times S + f_{(x,t)}, \\ \frac{\partial S}{\partial t} = \lambda_{(x)} \times U - (\mu_{1(x)} + \mu_{2(x)}) \times S, \\ \frac{\partial U}{\partial t} = \mu_{1(x)} \times S. \end{cases},$$

де:

$U_{(x,t)}$ – концентрація забруднювальної речовини у водотоці (в частках від $U_{\text{ГДК}}$ – об'ємної гранично допустимої концентрації);

$S_{(x,t)}$ – концентрація забруднювальної речовини в осадах завислих стоків (в частках від $U_{\text{ГДК}}$);

$V_{(x)}$ – швидкість водотоку, м/с;
 $\alpha_{(x)}$ – коефіцієнт молекулярної або турбулентної дифузії;
 $f_{(x,t)}$ – функція джерела надходження забруднень у водний потік;
 $R_{(x)}$ – функція накопичення забруднюючих речовин в осадах завислих стоків;
 $\lambda_{(x)}$ – коефіцієнт сорбції речовини, що знаходиться у водотоці, у осадах завислих стоків;
 $\mu_{1(x)}$ – коефіцієнт сорбції в донні осади;
 $\mu_{2(x)}$ – коефіцієнт сорбції-десорбції в системі "вода–наноси";
 t – тривалість водотоку;
 x – координата в напрямку водотоку.
 Функція джерела є точковим джерелом викиду забруднюючих речовин за таких умов:

$$f(x,t) = \begin{cases} f(t), & \text{при } x = 0, \\ 0, & \text{при } x \neq 0. \end{cases}$$

Для розв'язання задачі проходження забруднень по руслу, акваторію ріки розбивають на множину ділянок, кількість яких повинна в достатній мірі відображати конфігурацію русла разом з основними гідрографічними особливостями. Систему наведених вище диференціальних рівнянь можна розв'язувати за допомогою скінченно-різницевої апроксимації. Інтегро-інтерполяційний метод (Самарський, 1977) дозволяє достатньо точно визначити значення балансу концентрацій і побудувати різницеву схему.

Що стосуються агроєкологічного моделювання, то ці методи в Україні слабо розвинуті. Агровиробництво пропонує нетривіальний якісний підхід, який може становити теоретичну основу для розуміння агроєкології, спираючись на математичні концепції в "складності" (Vandermeer & Perfecto, 2017; Woodward & Bohan, 2013).

В екології моделювання розвивалася двома шляхами (Vandermeer & Perfecto, 2017). З одного боку фахівці з управління дикою природою і техніки біологічного контролю поєднували польові спостереження, контрольовані лабораторні дослідження та математичні моделі для створення моделей досліджуваних систем, які були подібними до найскладніших витворів інженерів-будівельників. З іншого боку, популяційні генетики працювали з популяціями, що містили нескінченну кількість особин, а екологи угруповань вивчали спільноти з дуже великою кількістю особин одного виду (Vandermeer et al. 2019). Отже, наука екологія напрацювала свою ідеографічну та номотетичну контекстуалізацію.

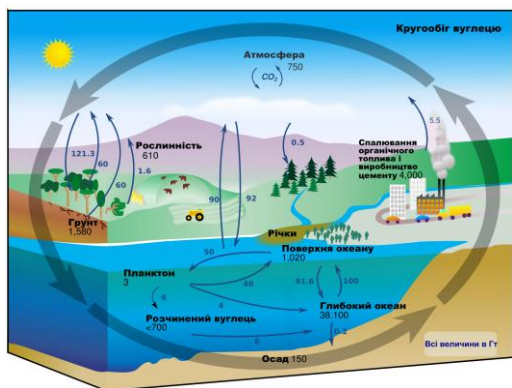
Чи може ця методологія екології бути прийнятною у прикладній екології – агроєкології? Є припущення, що напевно працюватиме на



ландшафтному рівні в багатьох ситуаціях боротьби зі шкідниками, або й фрагментарно за правильного розуміння може забезпечити масштабне керування системою контролю інвазій (Vandermeer & Perfecto, 2017).

Реальна сфера агроєкосистем охоплює всі соціально-політичні проблеми, що стосуються аграрного господарства в усьому світі (Perfecto, Vandermeer & Wright, 2009). Серйозне включення моделювання до аналізу структури складних систем стає актуальною необхідністю.





Частина III

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ

ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ

БІОГЕОСФЕРИ

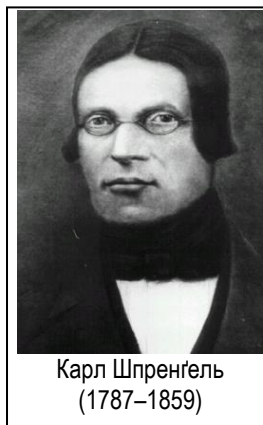


На відміну від природних екосистем, які є самоорганізованими і саморегульованими, функцію керування біотичними процесами у штучних агроекосистемах виконує людина. Без її догляду вони деградують і зникають. Створення ефективних штучних екосистем потребує глибоких знань біотичних та аутокологічних властивостей їхніх живих компонентів – субсистем нижчого рангу, їхніх вимог щодо головних чинників середовища – світла, вологи, родючості ґрунту, алелопатичних взаємовідношень, стійкості до шкідників і хвороб, агротехнічних способів догляду тощо. Шляхом формування й плекання штучних екосистем людина має ту корисну продукцію, якої не може отримати від природних екосистем.

12.1. Первинні й аграрні екосистеми, їх ієрархія

Уже 8 тис. років люди вирощують рослини та приручають тварин, водночас систематично удосконалюючи механізми керування штучними екосистемами. За трипільної системи органічні рештки були вирішальним фактором керування, тому перевагу мав зв'язок рільництва й тваринництва. Суспільний прогрес і підвищення продуктивності праці за період від середини ХІХ до кінця ХХ ст. дозволили підвищити середні врожаї пшениці, жита й картоплі в чотири рази. Натомість частка зайнятих у аграрному виробництві зменшилася від 40 до 5% працездатних.

Німецький агроном і хімік Карл Шпренгель, був, можливо, першим ученим, який рекомендував застосування мінеральних добрив під польові культури. К. Шпренгель, який досконально розвинув гіпотезу свого учня Феліціяна Сипневського – студента *Regenwalde Akademie der Landwirtschaft*, увійшов в історію, як один із основоположників агрохімії, що здійснили епохальні агрономічні дослідження в Геттінгенському університеті від 1821 до 1831 (Ploeg et al). У 1826 році він спростував так звану теорію гумусу (Sprengel, 1826), а 1828 року



опублікував свою теорію мінерального живлення рослин (Sprengel, 1828). У цій статті К. Шпренгель (с. 93), по суті, сформулював "**закон мінімуму**" (рис. 12.1):



"... беззаперечно, коли рослині для розвитку потрібні 12 речовин, вона не буде рости, якщо однієї з них не вистачає, і вона завжди буде рости погано, коли одна з них недоступна в достатньо великій кількості, як того вимагає природа рослини" - С. Sprengel (1828).

Проте тривалий час закон мінімуму був популяризований лише Ю. Лібіхом як наукова концепція. Але після тривалої суперечки у німецьких наукових та агрономічних колах, визнавши доробок К. Шпренгеля, вчені оголосили співзасновником агрономічної хімії, і назвали спірний закон законом мінімуму Шпренгеля-Лібіха (Ploeg et al, 1999).

Окрім відомих елементів С, Н, О і Si, К. Шпренгель розглядав N, Ca, K, Na, Mg, P і S, а також Fe, Mn, Cl і Al, як незамінні компоненти живлення рослин. Він також зарахував Cu, як можливий поживний елемент. Отже, гіпотетичний список К. Шпренгеля містив уже 20 елементів, які він вважав поживними речовинами для рослин, включаючи N, P, K, S, Mg і Ca (с. 432). К. Шпренгель був, мабуть, першим агрономом, який проводив перші експерименти з контрольованим внесенням мінеральних добрив під посіви.

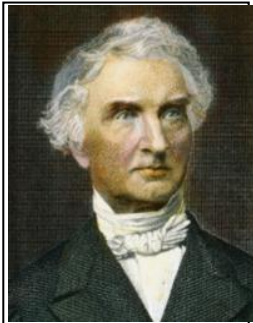
1840 року вже Ю. Лібіх опублікував працю "Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie" (Brock..., 2025). У цій книзі вчений стверджував, що оскільки "... ідеальна агрокультура є справжньою основою всієї торгівлі та промисловості (економіки – **П.Г.** і **О.С.**)", а "... раціональна система аграрного виробництва не може бути сформована без застосування наукових принципів". Досліджуючи хімію ґрунтів, Ю. Лібіх повторно розвінчав "теорію гумусного живлення" рослин, і довів атмосферне походження карбону для фотосинтезу. З іншого боку, вчений помилявся щодо атмосферного азоту (який важливий лише для симбіотичного живлення рослин – **П.Г.** і **О.С.**). Водночас, Ю. Лібіх стверджував, що органіка в ґрунті є важливим прямим джерелом для рослин мікроелементів із продуктів розкладання. Щоб забезпечити більшу ефективність продукування рослинами урожаю, Е. Лібіх від 1845 року розробляв



Рис. 12.1. графічна модель закону мінімуму Шпренгеля-Лібіха



"хімічні добрива". Пізніші дослідження, проведені на Експериментальній Станції Ротамстед у Хартфордширі учнем Ю. Лібіха Дж. Х. Гілбертом разом із землевласником Дж. Б. Лоузом, привели до відкриття суперфосфатів, які згодом застосовували як добрива (Liebig, 1855).



Юстус фон Лібіх
(1803–1873)

З позиції нашого часу ініціативи і здобутки К. Шпренгеля та його пізнішого послідовника Ю. Лібіха можна розцінити, як започаткування експериментальної агрономії, або експериментальної агроекології. Як прямо, так і опосередковано, вчені мали ключову роль у розвитку наукового агровиробництва і, зокрема, у збільшенні виробництва харчових продуктів в умовах зростаючого населення Європи.

Продовольчі ресурси соціального людства формуються на основі потенціалу природних екосистем, які поступово зазнавали перетворення і набували керованості.

Виникнувши як первісні елементарні геосоціальні системи, а за Г. Бачинським (1995), соціоекосистеми – перші стійбища прадавніх людей, поселення, згодом, хутори й села, еволюційно формувалися як самодостатні в соціально-економічному плані сімейні, родинні або племінні територіальні утворення. Вони могли доволі тривалий період самостійно існувати завдяки використанню невичерпних біотичних ресурсів природних екосистем, гідро- й вітроенергетичного потенціалу ландшафтів тощо. Трипільська культура – одна з основних давньорільничих культур кам'яно-мідної доби, у Середньому Наддністер'ї та Надпрутті й Надбужжі, менше у Наддніпрянщині, процвітала 2700 років в умовах теплого м'якого клімату голоценового кліматичного оптимуму. Доки не були виснажені ландшафтні екосистеми і не почав холоднішати клімат (Gimbutienė, 1991) трипільці жили без вождів, війська і зброї, не створювали племінних об'єднань. В цей час південніше і на сході розвивалися скотарські племена, які були войовничими і організованішими для захоплення пасовищних ресурсів ландшафтів.

За збільшення чисельності населення швидко зростала нестача натуральних харчових продуктів. Тому почалася трансформація нативних екосистем, що супроводжувалася нищенням річкових заплавних лук, згодом степів, лісів, розорюванням решти придатних земель. Це спричинило створення і збільшення площ штучних екосистем – аграрних. За збільшення продуктивності праці й матеріальних потреб історично сільські геосоціосистеми розросталися територіально й за населенням. Дотепер у Світі 10–12% суходолу – це агроекосистеми. В Україні рільні (польові) агроекосистеми займають приблизно 53% земельних ресурсів.



Найпростішою **автотрофною агроекосистемою** є найменша суцільна ділянка суходолу, яку людина займає культивованими видами рослин і постійно опікується ними. Кожна окрема культивована особина є унікальною (неповторною, що важливо у сфері індивідуальної селекції) елементарною консорційною екосистемою. У культурі закритого ґрунту окремі рослини можуть бути об'єктом індивідуального піклування (рис. 12.2).



Рис. 12.2. Вирощування томатів на гідропоніці японським методом Хайпоніка – приклад повністю регульованої консорційної агроекосистеми закритого ґрунту (Kumar, Subhash, Gopika & Jaisuriyan. 2024; Rajaseger et al., 2023)



Агроекосистема (агробіогеоценоз) – це створена людиною на обмеженій території аграрна екосистема, базовими структурно-функціональними компонентами якої є окультурений ґрунтовий блок (едафотоп) первинної екосистеми, штучний одно- або багатокомпонентний фітоценоз, а супутніми – природні зоо- та мікробні комплекси, а також атмосфера (з відповідними кліматичними ресурсами місцевості).

Агроекосистема вищого рангу – це сукупність полів, об'єднана у сівозміну з певним набором культур, які регулярно змінюють одна одну в просторі й часі. Об'єднання сівозмін, притаманне для певного типу аграрного підприємства, що займає визначену територію сукупно з іншими штучними (сади, лісосмуги, ставки тощо) чи природними (луки, ліси, ріки й озера)

екосистемами, представляє *ландшафтну* чи іншу територіальну *агроекосистему*.

Найвищий рівень організації агроекосистем – ландшафтний (рис. 12.3).

За узагальненням визначенням,



територіальна **аграрна** (хутірська, фермерська) **ландшафтна екосистема** – це функціональна сукупність природних та антропохорних (здебільшого культурних) живих компонентів (окрім власне людини), освоєних для агрокультури ґрунтів, які перебувають у підтримуваній людиною речовинно-енергетичній взаємозалежності, а також неживих природних і штучних (технічних споруд, комунікацій і помешкань) елементів ландшафту у навколишньому природному середовищі.

Умовою створення ефективної агроекосистеми є утримання стійкого й керованого агробіоценозу.



Агробіоценоз – це сукупність штучного фітоценозу (агрофітоценозу) й гетеротрофної біоти на більш чи менш вдало виокремленій в одне поле за однорідністю ґрунту ділянці землі.

Створюють агробіоценоз для вирощування рослинних харчових продуктів, кормів і сировини. Агробіоценози мають відмінні від природних екосистем структурні й речовинно-енергетичні особливості та специфічні функціональні риси. Агробіоценоз може мати природний або трансформований екотоп, але завжди штучно створений і підтримуваний фітоценоз культурних рослин. Продуктивність і господарський урожай його завжди залежить від вдалого припасування генофонду культурного сорту і тієї частини генопласту природних живих компонентів, яка залишилися від первинної чи сусідніх екосистеми.

Послаблення антропорегуляції агробіоценозу одразу зумовлює активізацію кібернетичних механізмів, спрямованих на відтворення корінних екосистем. Ефективність унесеної в нього антропогенної енергії залежить від знання й розумного використання структурно-функціональних механізмів, які забезпечують максимальне продукування автотрофним блоком потрібних речовин та інгібування консументів інших трофічних блоків. У зв'язку з вилученням частини біотичної продукції разом із мінеральними речовинами біотичного кругообігу агробіоценози потребують компенсації речовинно-енергетичних утрат для підтримання родючості ґрунту.



Агрофітоценоз – це штучно створене угруповання культурних рослин одного чи кількох видів (сортів) у сукупності з супутніми угрупованнями сегетальних бур'янів, які присутні в ґрунтовому банку насіння й вегетативних зачатків.

А)



Б)



Рис. 12.3. Ландшафтні екосистеми: рисових агрорегіонів у різних фазах розвитку основної системотвірної культури (А – о. Балі, Індонезія); лісо-аграрних регіонів Пенсільванії з поєднанням польових, кормових, лісових і тваринницьких агроекосистем (Б – США)

Агрофітоценозами є однорічні посіви культур, сіяні багаторічні трави на сіно й випас (табл. 12.1), багаторічні насадження (виноградники, сади, полезахисні лісосмуги тощо). Агрофітоценози є дуже нестабільними угрупованнями, домінування культурних рослин у якому забезпечує й підтримує людина в економічно доцільних часових рамках.

Табл. 12.1. *Класифікація автотрофних агроекосистем*

Клас екосистеми	Вид (культура)
Лучні	Природні чи штучні травостої
Польові	Пшениця, ячмінь, картопля тощо
Городні	Овочеві, баштанні, зеленні тощо
Плантаційні	Виноградник, хмільник тощо
Садові	Яблуня, черешня, фундук тощо
Закритого ґрунту	Культури закритого ґрунту (теплиця томатів, оранжерея бананів тощо)

За своєю сутністю трансформація природних екосистем в аграрні зумовлює докорінну перебудову їх морфологічної структури й зміну функціональних ознак біоценозів. Агробіогеоценози є відносно простими екосистемами, створеними й керованими людиною для спрямування потоку фізіологічно активної радіації на максимальне акумулювання сонячної енергії у вигляді органічної продукції, придатної для споживчих (харчових, кормових, сировиннотехнічних) і ґрунтотвірних потреб. Перша основна відмінність їх від корінних екосистем полягає у тому, що крім енергії сонця сучасні індустріальні агроекосистеми додатково отримують сторонню енергію машинного палива, органічних і мінеральних добрив, насіння, м'язів людини і робочих тварин тощо. Друга – у тому, що найголовніша функція екосистем – біопродукційний процес в агробіогеоценозах скерований і підтриманий людиною так, щоб не лише отримати, а й вилучити з них максимум цінної в господарському розумінні біомаси. Тому інші функції екосистеми зазнають значних, хоч і небажаних для власне людини, змін. Зокрема з вилученням значної частини біомаси адекватно змінюється енергоаккумуляційна функція, ослаблюються водорегуляційна і ґрунтотвірна (інколи втрачається, з'являється ґрунторуйнівна), зникає саморегуляційна (самоорганізаційна) функція.

Біотичні потенціали рослин і тварин, як основа екопотенціалу біогеоценозів і визначальні чинники їх продукційної функції, в агробіогеоценозах є докорінно зміненими.

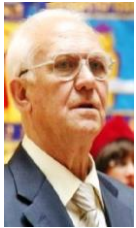


Під **екопотенціалом** розуміють сукупність речовинно-енергетичних ресурсів і властивостей корінних для певної місцевості (нативних) екосистеми, які забезпечують її максимально можливі і самодостатні



структурно-функціональні параметри (енергетичні, організаційні, біогеохімічні, водотрансформаційні, середовищні) (Голубець, 2000).

Екопотенціал таких систем є максимальним обсягом корисних для людини функцій (захисних, продукційних, рекреаційних, естетичних тощо).



Вторинний екопотенціал екосистеми – це сукупність її речовинно-енергетичних ресурсів і властивостей, сформованих під впливом господарського втручання, за якого формуються її поточні структурно-функціональні параметри і корисні функції.

Повне використання екопотенціалу є переважно недосяжним, та й не бажаним, бо означатиме повне знищення екосистеми.

Залежно від напрямку формування вторинного екопотенціалу в агроєкосистемі – спеціалізації поля (чи сівоzmіни), агрофітоценоз як складова агробіогеоценозу, формується з однієї, двох, рідше трьох культур, що функціонують як автотрофний енергоаккумуляційний блок. Якщо активність останнього максимально підтримує людина (розпушування ґрунту, добрива, зрошення тощо), то діяльність гетеротрофного блоку в агробіогеоценозах вона обмежує настільки, наскільки це можливо (застосування пестицидів тощо). Поряд з цим морфологічна структура аграрних фітоценозів обмежена присутністю тільки культурних рослин певних сортів шляхом виполювання (механічно, хімічно) сторонніх компонентів, що присутні тут від первинних екосистем, або стали новим "надбанням" агроєкосистем (сегетальна чи адвентивна флора – рис. 12.4).

Максимальне сприяння продукційній функції автотрофного блоку здійснюється різноманітними агротехнічними заходами, котрі надають екосистемі енергетичну "підтримку" в вигляді додаткових калорій. Ці затрати мають свій економічний еквівалент, який потрібно порівнювати із ціною приросту тієї корисної продукції, котру можна вилучити з екосистеми. Для цього існують так звані: 1) межа економічної доцільності (собівартості) прибирання урожаю та 2) економічний поріг шкідливості хвороб, бур'янів, шкідників тощо. В теперішню добу людські можливості нарощування цим шляхом вторинного екопотенціалу агроєкосистем є обмеженими, оскільки лише дворазове збільшення сучасного аграрного виробництва потребує десятиразового нарощування енергозатрат.

З іншого боку вилучення з екосистеми 50–70% органічної маси з акумульованою у ній енергією у вигляді врожаю культур зумовлює не лише безповоротну втрату цієї енергії для власне системи. Відбувається розбалансування речовинно-енергетичного потоку через гетеротрофний і сапротрофний блоки, що більш важливо не для них (оскільки вони є теж істо-

тно zdeформовані), скільки для продукування і накопичення ґрунтового гумусу (див. рис. 12.4).

Багаторічне ведення рільництва в Україні за ігнорування дисбалансу гумусу призвело до втрати 0,5–1% його вмісту в ґрунтах різних регіонів (Балюк і Шимель, 2024). Величезна шкода ґрунтовому покриву Землі зумовлена ерозійними процесами. Загалом 63% всіх аграрних земель планети уражені ерозією.



Рис. 12.4. Структурно-функціональна схема агроекосистеми з вирощування польових культур за інтенсивною технологією

12.2. Агроекосистемологія: об'єкт, предмет і завдання

У добу масштабного освоєння продуктивних ландшафтів на Землі визріла нагальна потреба узагальнення досвіду й удосконалення способів екобезпечного природокористування, яке сформувалося на традиційних



принципах виснажливої експлуатації екопотенціалу природних суходільних екосистем.



Походження, структуру й функції, способи оптимізації, взаємовідношення внутрішнього та зовнішнього середовища штучних і напівштучних продукційних екосистем досліджує наука **агроекосистемологія**.

Мета агроекосистемології – розробляти екобезпечні способи освоєння, алгоритми функціонування природних і конструювання стійких штучних агроекосистем, що продукують якісну і чисту від ксенобіотиків та інших забруднень харчову й технічну сировину, не впливають негативно на дотичні екосистеми, людину і біосферу загалом.



Об'єктом дослідження агроекосистемології є руко-творні та напівштучні продукційні екосистеми, ново-створені або природні, частково перетворені люди-ною на суходолі, які є джерелом харчових продуктів і технічної сировини.

Предмет вивчення агроекосистемології – природні й антропогенні чинники й закономірності утворення, перетворення, стабільності структур, безпеки й ефек-тивності продукційного функціонування аграрних екосистем, їхні взаємовідношення із навколишнім природним і техногенним середовищем, ієрархія та класифікація.

З головних фундаментальних і прикладних завдань агроекосистемо-логії виокремимо такі:

- розроблення принципів конструювання стійких агроекосистем (обґрунтування функціональної структури, аналіз ефективності харчових ланцюгів, підвищення замкнутості потоків корисних речовини, збере-ження біорізноманіття);
- підвищення в рослинництві ефективності використання культурними видами ресурсів клімату і ґрунту: визначення складу вирощуваних культур (включаючи проміжні й сидеральні), конструювання полікультур і сортосумішей, екологізація і діджиталізація рослинницьких технологій;
- конструювання у рільництві й агрохімії збалансованих сівозмін, еко-логізація і діджиталізація системи обробітку ґрунту та внесення добрив (мінеральних і органічних), активізація біопотенціалу (живого населення ґрунту, що підтримує його родючість);
- екологічна класифікація та оцифрування ґрунтів і полів для визна-чення можливості і способів їх використання;

- у землевпорядкуванні екологічна оптимізація просторової структури агроекосистем (розміщення сівозмін, посівів багаторічних трав, тваринницьких ферм, інфраструктури й ін.) з використанням ГІС-систем;
- у зоотехнії та кормовиробництві обґрунтування величини і структури популяцій свійських тварин, супутніх мікробних і паразитних організмів, оптимізація кормових раціонів для підвищення ефективності відгодівлі, розроблення "зелених конвеєрів" (підбір кормових культур для безперебійного надходження зеленої маси в вегетаційний період) тощо;
- оцінка актуальної і потенційної продуктивності різних типів природних кормових угідь та розроблення прийомів підвищення їх продуктивності засобами систем точного рільництва;
- у сфері селекції (з генетикою і біотехнологією) підвищення ступеня адаптації культурних рослин і сільськогосподарських тварин, підвищення ефективності відгодівлі;
- створення та діджиталізація екобезпечної аграрної техніки, в першу чергу для зниження витрати пального та зменшення негативного впливу на агрофізичні властивості ґрунтів;
- підвищення економічної ефективності аграрного виробництва за найповнішого використання ресурсів клімату і ґрунтів, з урахуванням кон'юнктури ринку і вимог до чистоти продукції та охорони природи;
- розроблення законодавчих актів, що регламентують невиснажливе використання ресурсів ґрунтів, вод, біорізноманіття, виробництво й реалізацію органічної та іншої екобезпечної продукції.

12.3. Алгоритм прикладного аналізу агроекосистем

Висока якість та економіка аграрної продукції підтримується впровадженням сучасних екобезпечних технологій аграрного виробництва. Основою і запорукою отримання доброякісних харчів є вміле конструювання ефективних агроекосистем, організація логістики і матеріальних витрат у чистому від забруднень довіллі. Системний аналіз культурних (штучних) біогеоценозів у рослинництві та тваринницьких комплексів дає змогу моделювати варіанти вирішення цих проблем.



Системний аналіз в агроекології – це методологія дослідження будови та функцій напівштучних і штучних продукційних екосистем з метою з'ясування споживчої якості і безпеки вирощеної продукції, економіки і безпеки агротехнологій для людини і природного довкілля.

Системний аналіз автотрофних штучних екосистем залежно від мети здійснюють на конкретних ієрархічних рівнях їх організації: консорцій-

ному (культурна рослина або поєднання кількох), біогеоценозному (окреме поле сівозміни), сівозміни (система агробіогеоценозів), цілого (індивідуальне, коопераційне тощо) господарства, агроландшафту (самоврядної – сільської, районної, обласної громади), фізико-географічної області (провінції – Північно-Західна Придніпровська височина тощо), чи зони (Лісостепова й ін.).

Наведемо приклад алгоритму аналізу агроєкосистеми на рівні агробіогеоценозу – польової екосистеми картоплі, розуміючи, що видів таких екосистем є стільки, скільки відомо видів польових і кормових культур (в Україні понад 120) (Лихочвор, 2010).

Перший етап агроєкологічного аналізу систем – з'ясування її *функціонального ядра* – автотрофної консорції. У нашому прикладі це буде певний сорт картоплі, садивний матеріал якої – бульби, вже містять облигатні і факультативні консорти першого порядку (гриб фітофтору, комаху колорадського жука тощо). На цьому етапі ми можемо уперше передбачити потребу в пестицидах, як засобів оброблення садивного матеріалу.

Другий етап аналізу – з'ясування основних системотвірних біотичних елементів, просторової організації агрофітоценозу, зооценозу і мікробоценозу, їх ієрархії. Наприклад, за розгляду екосистеми картоплі слід додатково встановити, які організми є консортами першого концентру, другого і т.д., оскільки це хвороби і шкідники, які населяють ґрунт. Також встановлюємо, які рослинні асоціації (переважно бур'яни) присутні в її структурі, яка роль мікробоценозу. В екосистемі бобових культур об'єктами особливої уваги є симбіотичні азотфіксатори як унікальні організми, що розривають надмісний хімічний зв'язок інертного газоподібного азоту й включають його у біотичний кругообіг. Цьому треба всіляко сприяти.

Третій етап дає відповідь на питання, які абіотичні екофактори є вирішальними чи лімітними в існуванні екосистеми. Це – ґрунтова відміна, режим вологи, теплові й світлові ресурси атмосфери. Засобами точного рільництва варто дослідити строкатість властивостей ґрунтів, або одного ґрунту в межах поля. Лімітними чинниками поширення картоплі у зонах рослинництва є вологість клімату й ґрунту, температура і тривалість теплового періоду.

Четвертий етап – дослідження функціонування екосистеми, вагомості й ієрархії внутрішніх та зовнішніх зв'язків (з'ясування особливостей малого біотичного циклу елементів, шкодочинності популяцій небажаних організмів). Важливо мати картограми агрохімічних властивостей ділянок поля.

П'ятим етапом є з'ясування оптимальних внутрішніх умов функціонування (співвідношення ресурсів поживних речовин, вологи, світла і тепла в екосистемі), доцільності чи ефективності привнесених у неї добрив, пестицидів, правильності й екобезпеки прийомів агротехніки й інших

регуляторних засобів. Важливо отримати сканування врожайності бульб по усьому полі.

Шостий етап може мати за мету уточнення оптимальної продукувальної динаміки, що відповідає меті реалізації найбільшого екопотенціалу системи – врожаю бульб. Важливо скористатися вегетаційними індексами різних спектрів.

Сьомий етап відкриває можливості оцінювати наслідки конструктивного (позитивного чи негативного) зовнішнього впливу, з'ясувати результат дії системи за показниками якості й чистоти агропродукції (споживча якість і вміст залишків агрохімікатів, ксенобіотиків тощо). Водночас можна з'ясувати порогові значення регуляторних чинників стосовно зовнішніх впливів агробіогеоценозу на його довкілля або системи наступних ієрархічних рівнів. Важливо зібрати і проаналізувати усі дані сканування поля.

Восьмий етап передбачає можливість теоретично моделювати ідеальну екосистему й експериментувати в подальшому для її реалізації у вигляді ідеального картопляного поля та впровадження в системи вищого рівня. Тут слід наголосити, що отримання, наприклад, органічної продукції рослинництва, городництва, садівництва й виноградарства потребує експериментування з вивчення синергії біотичних, абіотичних та антропогенних факторів й її прикінцевий вплив на економічну ефективність органічного сільського господарства.

Експериментальна агроекологія, що зародилася у надрах рільництва, до тепер не є окремою наукою, але у комплексі з експериментальною агрономією набуває актуальності.

Дещо дистанціюючись від надмети агрономії дати максимальну продуктивність культури за високої якості продукції,



експериментальна агроекологія, яка має екоцентричну мету: обґрунтувати технологію отримання прийнятного врожаю якісної продукції за умови збереження природного балансу у довкіллі й перманентного відновлення властивостей його компонентів (родючості ґрунтів, чистоти вод, повітря, збереження біорізноманіття тощо).

Агрономи – практики і науковці, в кожному окремому випадку здійснюють глибший і детальніший системний аналіз агробіогеоценозу, як і наступних рівнів агроекосистем, для удосконалення технології вирощування різноманітних культур. Проте, еколого-агрономічний аналіз будь-якої технології чи системи тепер є невід'ємною процедурою, що передуює впровадженню сучасних технологій, безпечних для природного довкілля, а вирощеної продукції чи сировини – для людей.



12.4. Системи точного рільництва в експериментальній агроєкології

Способам переходу до нової ощадливої економічної моделі та до «інтелектуального» аграрного виробництва, як її невід'ємної складової, приділяють дедалі більшу увагу світові ділові та політичні кола, займаються національні уряди. «Інтелектуальне» аграрне виробництво (López-Quílez, 2025) ґрунтується на застосуванні автоматизованих цифрових систем прийняття та втілення рішень, комплексної автоматизації і роботизації виробництва в галузях тваринництва, аквакультури, гідропоніки і тепличних технологій, богарної та іригаційної агрокультури. Є аналогічні спроби у технологіях проектування та моделювання екосистем різного рівня складності.



Точне рільництво (*precision farming, precision agriculture*) – це система технологій, які спрямовані на ефективне використання засобів виробництва відповідно до неоднорідності поля та потреби рослин.

Технології культур потребують оптимізації використання зовнішніх (вхідних) ресурсів (пального, добрив та агрохімікатів), відновлення та збереження родючості ґрунтів і якості ґрунтових вод. Новітньою вимогою виробництва і споживання рослинницьких продуктів є також дистанційний інтегрований контроль за дотриманням сертифікаційних вимог органічного рослинництва, овочівництва, садівництва тощо.

У європейських країнах найчастіше використовують термін "Precision Agriculture" як "прецизійна – точна агрокультура" та "precision farming" – як "прецизійне – точне фермерство". Перше означення стосується технологій культур, а друге – технологій ведення фермерства (не тільки поля і культури, а й інфраструктурні складові та логістика) (Іванюк і Гнатів, 2025).

У міжнародній літературі існують численні терміни й визначення, які зазвичай є синонімами або означають основні складові "точного землеробства". Нині у науковій літературі ще не утвердилося загальноприйняте, стандартизоване або таке, яке усіх влаштовує, усталене визначення "точного сільського господарства" і "точного землеробства".

Агрономія та агрономи (агронómія – грец. *αγρος* – поле і *νομος* – закон) були і надалі залишаться основними носіями й донорами теорій і практик рільництва. Проте в новітніх умовах агропродукційного процесу вони набувають незвичних функцій фактичного програмування технологічних операцій як по складниках, так і цілісних технологій. Програмування (від грец. – *προγραμματος* (*próγραμμα*) – вказівка) і програматори – це комплексні алгоритми діджиталізації процесу вирощування врожаїв. Тому

сучасний агроном у найближчому майбутньому стане агрономом-програмером технологій у рослинництві, кормовиробництві, овочівництві та садівництві.

Важливо передбачити результати стрімкого розвитку комп'ютерного моделювання, побудованого на принципах роботи біологічних нейронних мереж, які в ЗМІ та популярній літературі отримали побутову назву "штучний інтелект" – (англ. Artificial Intelligence, AI). Стрімкий прогрес інтелектуальних комп'ютерних систем упродовж останніх трьох років дозволяє прогнозувати, що їхнє проникнення у точне рільництво, фермерство і точну агрокультуру неминучі і будуть мати позитивні результати (рис. 12.5).

Точне рільництво охоплює ключові технології та концепції (Іванюк і Гнатів, 2025). Системи високоточного позиціонування (GPS, GLONASS) є основою точного рільництва.



Рис. 12.5. Схема інтеграції операцій у точному рільництві

Максимальна точність, з якою можуть бути визначені координати сьогодні, становить 2 см. Систематичний відбір проб ґрунту з на полях здійснюють з обов'язковою прив'язкою до точних координат.

Автоматизовані системи рульового управління дозволяють спростити низку завдань, пов'язаних з управлінням агрегатами. Застосовують допоміжні системи рульового управління та автоматизовані системи, які повністю контролюють рульове колесо. Увага оператора може бути зосереджена на роботі інших приладів – на комп'ютері обприскування, на датчиках руху рідини тощо.

Дистанційне зондування сателітами, чи БПЛА і геокартування використовують для створення карт, на яких відображають тип ґрунту, вміст в ньому поживних речовин, засмічення бур'янами або ураження хворобами чи шкідниками.

Датчики і дистанційне зондування потрібні для збору даних про стан ґрунту і культури безконтактним способом. Такі пристрої можуть бути встановлені на різних агрегатах, на дронах.

Невід'ємним елементом точного рільництва є розроблення і застосування вегетаційних індексів. Вегетаційний індекс – це показник, що розраховують в результаті операцій з різними спектральними діапазонами даних дистанційного зондування, який корелює з певними параметрами рослинного покриву поля в певному пікселі знімка.

Вегетаційні індекси мають свої особливості відображення і вони виведені, головним чином, емпірично.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – найчастіше вживаний показник для обчислення кількості фотосинтетичної маси (фіомаси). Це індекс широкого діапазону спектра й оцінювання умов вегетації, стану рослин (відносний рівень рослинного покриву, оцінка продуктивності і врожайності). *ReNDVI (Red edge Normalized Difference Vegetation Index)* – нормалізований диференційний індекс рослинності *Red Edge (ReNDVI)* – це видозмінений *NDVI*, який є більш чутливим до незначних змін концентрації хлорофілу в листі покриву, особливо на стадії старіння. Він дуже чутливий до сукупного впливу площі листового покриву, неоднорідної концентрації листя і вертикальної структури покриву. *ReNDVI* може застосовуватися як у поєднанні з *NDVI*, так і в якості його альтернативи для отримання більш точного оцінювання.

На підставі різних індексів створюють індексні карти, як візуальний відбиток цифрових значень індексів відбиття, котрі кольорами відображають стан асиміляційного апарату рослин. Зазвичай, для відмінного (нормального) розвитку рослин – зелений, слабкого – жовтий, для незадовільного (ушкодження) – червоний.

Електронні системи інтеграції окремих компонентів обладнання на агрегатах або самих агрегатів застосовують для зв'язку з центральним офісом.

Технологія внесення диференційованої норми добрив, висіву насіння, дозування отрутохімікатів зі змінною швидкістю – здатність техніки адап-



тувати параметри роботи відповідно до поточних вимог рельєфу землі, щільності посіву або запрограмованих алгоритмів.

Сучасний світ оперує масивами даних. Організації в агросекторі використовують дані, щоб отримати детальну інформацію про кожен ланку виробництва, від розуміння кожної ділянки поля до моніторингу всього ланцюга постачання продукції, до отримання глибоких даних про процес генерування врожаю (López-Quílez, 2025). Прогностична аналітика на основі нейрокомп'ютерів вже прокладає шлях до агробізнесу. Фермери можуть збирати, а потім обробляти більше даних за менший час за допомогою нейрокомп'ютерів. Крім того, "штучний інтелект" може аналізувати ринковий попит, прогнозувати ціни, а також визначати оптимальну структуру посівних площ, терміни і норми сівби та збору врожаю.

"Штучний інтелект" у аграрному господарстві може допомогти досліджувати здоров'я ґрунту, щоб збирати статистичні дані, стежити за погодними умовами та рекомендувати застосування добрив і пестицидів. Програмне забезпечення для управління фермою підвищує продуктивність разом із прибутковістю, дозволяючи виробникам приймати кращі рішення на кожному етапі процесу вирощування аграрних культур.

Складність агроекосистем вимагає постійної міждисциплінарної співпраці та досліджень для подолання таких бар'єрів, як масштабованість, доступність та динамічна взаємодія екологічних і соціально-економічних факторів.

12.5. Екосистеми тваринництва і довкілля

Одомашнювання тварин сталося приблизно в той же час, що і введення в культуру рослин, тобто близько 10 тис. років тому. Археологи вважають, що першими були одомашнені вівця, коза і собака. Велика рогата худоба і свиня в господарстві людини з'явилися пізніше.

Екосистеми тваринництва ділять на три типи: стійлові, пасовищні та змішані. Стійлові екосистеми ієрархічно поділені на такі види: приміщення (або кошара, секція тощо – один вид тварин, один *агрозооценоз*), ферма (сукупність приміщень з різними видами або віковими групами, а також прилеглі площадки для вигулу й випасання тварин. Комплекс може мати кілька ферм, але це окремий технологічно ізольований об'єкт, що включає приміщення для утримання, випасання, вигулу тварин, а також підсобні об'єкти для приготування й зберігання кормів, перероблення продукції та утилізації й зберігання відходів.

Системний аналіз *гетеротрофних тваринницьких екосистем* здійснюють на таких ієрархічних рівнях їх організації: консорційному (порода свійських тварин), автономне ізольоване приміщення утримання тварин (рис. 12.4), тваринницький комплекс, виробниче підприємство, агроландшафт.

Екосистема тваринницького комплексу функціонує як елемент ландшафту (рис. 12.6), але за великих масштабів може бути і ландшафтовірною.

На цьому рівні слід аналізувати цілісне спеціалізоване тваринницьке господарство (агрозооценоз або декілька різних видів тварин) з прилеглими полями, луками, водоймами тощо. Будь-яка тваринницька екосистема має низку підпорядкованих технологічних і технічних підсистем і як відкрита антропогенна є жорстко керована людиною. Вона має за мету продукувати максимальну кількість корисної біомаси з мінімальними витратами ресурсів.

Сучасні інтенсивні технології тваринництва не є толерантними до природного довкілля і тварин. Тваринництво використовує більше 50% вирощеного зерна, що йде на корм худобі або використовується для виробництва біопалива. Один кілограм яловичини обходиться людству витратою 14-15 тис. л води.

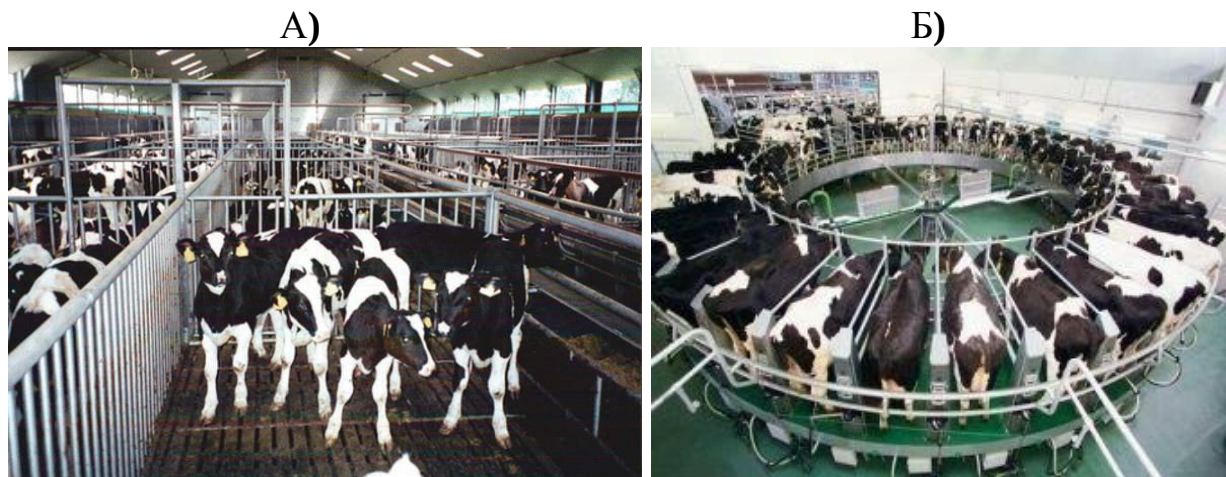


Рис. 12.6. Екосистема приміщення для вирощування молодняка ВРХ (А) та продукції коров'ячого молока (Б)

Середньостатистичний американець чи європеець через споживання м'яса використовує 5 тис. л води щодня. Щораз більшими загрозами стають: евтрофікація водойм, спалахи патогенної мікрофлори та забруднення атмосфери парниковими газами, сірководнем, активними сполуками азоту. Інтенсивність забруднення залежить від обсягів гнойових стоків, до складу яких входять: екскременти тварин, залишки кормів, вовна й шерсть, технологічна вода. Добовий вихід екскрементів може досягати 30 кг на одну тварину.

На забруднення атмосфери впливає технологія зберігання і використання безпідстилкового гною. Рідкий гній містить патогенні організми (бактерії, гельмінти), наявність яких є причиною поширення інфекційних і паразитарних хвороб, за його анаеробного розкладу утворюються шкідливі гази з неприємним запахом. Тваринницькі комплекси забруднюють

поверхневі водойми та підземні води. Біогенні елементи, які надходять в акваекосистеми, спричинюють отруєння гідробіонтів, евтрофікацію і зменшують вміст кисню. Необхідна просторова ізоляція тваринницьких комплексів. Для великих об'єктів санітарно-захисна зона має бути великою. В деяких країнах для птахофабрик вона становить 2,5 км, для комплексів ВРХ – 3 км, для свиноферм – 10-15 км і більше. В Україні найбільша за нормами СЗЗ не перевищує 3 км.

Утилізація і перероблення відходів тваринництва – обов'язкова умова екобезпеки галузі. Стоки тваринницьких комплексів підлягають утилізації: сепарації на фракції, карантинному зберіганню, біотермічному знезаражуванню і вивозу на поля під оранку в разі набуття безпечних властивостей.

Прийнятним для довкілля шляхом утилізації виділень свійських тварин є використання гною як джерела енергії (рис. 12.7). Високий енергетичний потенціал дає можливість використовувати його в якості субстрату для інших організмів і палива. Метанове зброджування гнойових стоків дозволяє отримувати метан та органічне добриво, мікробна переробка – кормову зообіомасу.



Рис. 12.7. Єдиний виробничий комплекс тваринницької ферми і заводу з виробництва біогазу та дигестату – біоконверсії органічних відходів тварин

Біопереробка гною за допомогою дощових черв'яків (вермикультура) дозволяє отримувати біодобриво. Один гектар вермикультури упродовж



теплого періоду переробляє 1300 т гною, з якого отримують 25 т білкового корму і 400 т біогумусу.

Сучасний набір цифрових технологій дозволяє спрощувати роботу тваринників. Діджиталізовані системи, подібні до "розумного будинку", спрощують підтримку мікроклімату на фермі, розвантажують людей для іншої роботи (Paz Rosa et al. 2024), здійснюють постійний моніторинг стану тварин, автоматизують годівлю, доїння. Наявність нашийників з датчиками дозволяє щодня враховувати пройдений твариною шлях. Це дозволяє точно оцінювати стан здоров'я тварини і коригувати раціон, вносячи ті, чи інші біодобавки чи вітаміни.



13.1. Лісова екологія – основа поліфункціонального лісівництва

Витоки й становлення сучасної науки про лісові екосистеми в Україні беруть початок з глибокої давнини. В добу Київської Русі практикували окремі заходи щодо лісовирощування у монастирських лісах під Києвом. Від XVIII ст. на території теперішньої України почали створювати перші штучні насадження – лісові культури, великі парки, здійснювалося лісовпорядження. Від початку XIX ст. почали застосовувати лісівничі заходи і науково упорядковували організацію лісового господарства. У кінці XIX та на початку XX ст. активізувалися роботи зі степового лісорозведення, залісення пісків та яружно-балкових ерозійних елементів ландшафту, як рукотворний чинник стабілізації нестійких аграрних ландшафтних екосистем.

Що ж таке ліс і лісова екосистема?

Петро Погребняк (1940) сформулював екологічне бачення лісу: "Ліс – це взаємопроникний комплекс лісових рослин, тварин і займаного ними середовища..., лише таке розуміння лісу повне, конкретне й істинне". Сучасне наукове визначення лісової екосистеми пропонуємо таке:



Ліс, лісова екосистема – це поєднання особливого типу рослинного покриву на суходолі з домінуванням деревних та асоціюванням трав'яних видів, а також популяцій тварин і мікроорганізмів, пов'язаних між собою та зайнятими ними просторами ґрунту й атмосфери, життєдайними екофункціями, котрі взаємовпливають на біоту, на фізичне середовище свого існування і на довкілля.



Такі складні форми взаємовідношень деревних рослин, супутньої біоти і середовища розглядає лісова екологія. Отже, як наука,



лісова екологія вивчає ліс, як біотичне угруповання з різними (біотичними, хімічними, фізичними, інформаційними) взаємовідношеннями між деревними рослинами й іншими живими компонентами, що його утворюють, а також взаємовідношення між ними та фізичним середовищем, у якому функціонує деревне угруповання.

Об'єктом лісової екології (лісознавства), як вчення про специфічні екосистеми, є унікальні природні утворення – ліси. **Предметом** дослідження й вивчення лісознавства є складна природа лісу, його численні зовнішні і внутрішні функції, взаємозумовлені зв'язками між компонентами рослинного угруповання, тваринним світом і навколишнім середовищем, специфічні біотичні закони поновлення і формування деревостанів.

Глобальна поліфункціональна роль лісів стає з року в рік актуальнішою, бо визначена їх абіотичними (едафічними, атмосферними, водотрансформаційними, літологічними) і біотичними (фіто-, зоо- і мікробіотичними, антропічними) субфункціями (Наближене до природи..., 2014). Конференція Ріо-92 другим документом прийняла "Заяву про принципи керування і захисту всіх видів лісів...". XIII-й Світовий лісовий конгрес (Буенос-Айрес, 2009) визначив основні напрями розвитку лісового сектору у світі. Законодавчо-нормативна система забезпечення наближеного до природи лісового господарства в Україні включає: Конституцію України; Закон "Про охорону навколишнього природного середовища"; Лісовий кодекс України; Земельний кодекс України; Закон "Про природно-заповідний фонд України" й ін.

У Лісовому кодексі (2006) ліси поділені за їхнім екофункціональним і соціально-економічним значенням та залежно від основних виконуваних ними функцій на **чотири категорії**:

I) **захисні** ліси (виконують переважно водоохоронні, ґрунтозахисні й інші захисні функції);

II) **рекреаційно-оздоровчі** ліси (виконують переважно рекреаційні, санітарні, гігієнічні й оздоровчі функції);

III) **ліси природоохоронного, наукового, історико-культурного** призначення (виконують особливі природоохоронні, естетичні, наукові функції тощо);

IV) **експлуатаційні** ліси (основне джерело ділової деревини).

13.2. Будова лісових екосистем і взаємовідношення компонентів

Ліс, як складне природне утворення, навіть на незначній площі має елементарні однорідні одиниці, які отримали назву *компоненти лісу*. У лісі середовищевірним є рослинний компонент. Він умовно поділений на деревостан, підріст, підлісок, живий надґрунтовий покрив, опад, лісовий гумус, ґрунт. В окремих випадках у лісі є позаярусна рослинність у вигляді ліан, лишайників.

Найголовнішим елементом лісової рослинності є *деревостан*, тобто сукупність дерев, які є основою лісового насадження. Це найвищі дерева, що утворюють верхній – перший ярус лісу. Молоде покоління дерев – це *підріст*, який згодом замінює материнське насадження. За походженням підріст буває насіннєвим та вегетативним. Кількість життєздатного підросту, його висота є критерієм для оцінки природного поновлення лісу. Коли ліс росте на відносно багатих ґрунтах, у ньому присутня деревна рослинність у формі кущів, яка утворює особливий компонент лісу – *підлісок*.

Окрім деревної рослинності у лісі є недеревні види, що представлені напівкущами, трав'яними рослинами, мохами, папороттю, лишайниками. Ці рослини утворюють *живий надґрунтовий покрив*, який є особливим для того, чи іншого типу лісу. Ступінь розвитку живого надґрунтового покриву залежить від складу порід деревостану і стадії його розвитку, віку, повноти. У високоповнотних деревостанах живий надґрунтовий покрив часто зріджений або відсутній.

У лісі щорічно відмирає та опадає на поверхню ґрунту частина хвої, листя, трав'яні рослини, гілочки, шматки кори, насіння, шишки, інші органічні рештки. Усі ці органічні рештки прийнято називати *опадом*. Кількість опадів залежить від породного складу, віку, форми лісостану. Так, щорічний опад становить: у сосняках – $3,0 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$; ялиниках – $1,8-2,5$; дібровах – $3,5-4,5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ в абсолютно сухому стані. Із року в рік, не встигаючи перегнити, опад формує *лісову підстилку* (лісовий гумус), тобто шар органічних решток на поверхні з різною стадією їх розкладу (детрит – за Ю. Чорнобаєм, 2000). Запас лісової підстилки залежить від породного складу, віку, форми деревостанів, зімкнутості крон, водного режиму ґрунту, живого надґрунтового покриву, інших зовнішніх факторів. У стиглих листяних лісах запас лісової підстилки, як правило, не перевищує $30 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. У стиглих хвойних він може досягати $60 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Лісова підстилка має велике значення, впливає на хімічний склад рідкої фази ґрунту, регулює його тепловий режим і водно-фізичні. Вона є "коморою" елементів живлення, які поступово вивільняються і надходять до лісового ґрунту, що дозволяє підтримувати певний рівень його родючості.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...

Біогеоценозні лісові екосистеми займають певні площі, що утворюють лісові масиви – лісові ландшафтні екосистеми. Під **лісовим масивом** розуміють значну цілісну територію лісу, яка має природні межі (річки, озера, окремі ділянки гір тощо), або межує на значному проміжку з іншими угіддями (луками, полями) чи населеними пунктами. Площа лісового масиву може коливатися від кількох сотень до багатьох тисяч гектарів. Для будь-якого лісового масиву є загальним поділ на дві морфологічні частини: 1) зовнішню (периферійну), яку називають лісовим узліссям і 2) внутрішню, до якої належить решта території масиву.

Правильно сформоване узлісся є екобар'єром на шляху проникнення у ліс бур'янів, збудників хвороб, шкідників, частково забруднювачів повітря техногенного походження. Усередині лісового масиву лісові насадження часто межують з більшими чи меншими за розміром ділянками без деревної рослинності: вирубками, аграрними угіддями, полянами, галявинами, садибами лісництв та лісовими кордонами тощо.

Ландшафти України від початку голоцену були виключно лісовими майже до нижньої межі Лісостепу (рис. 13.1).

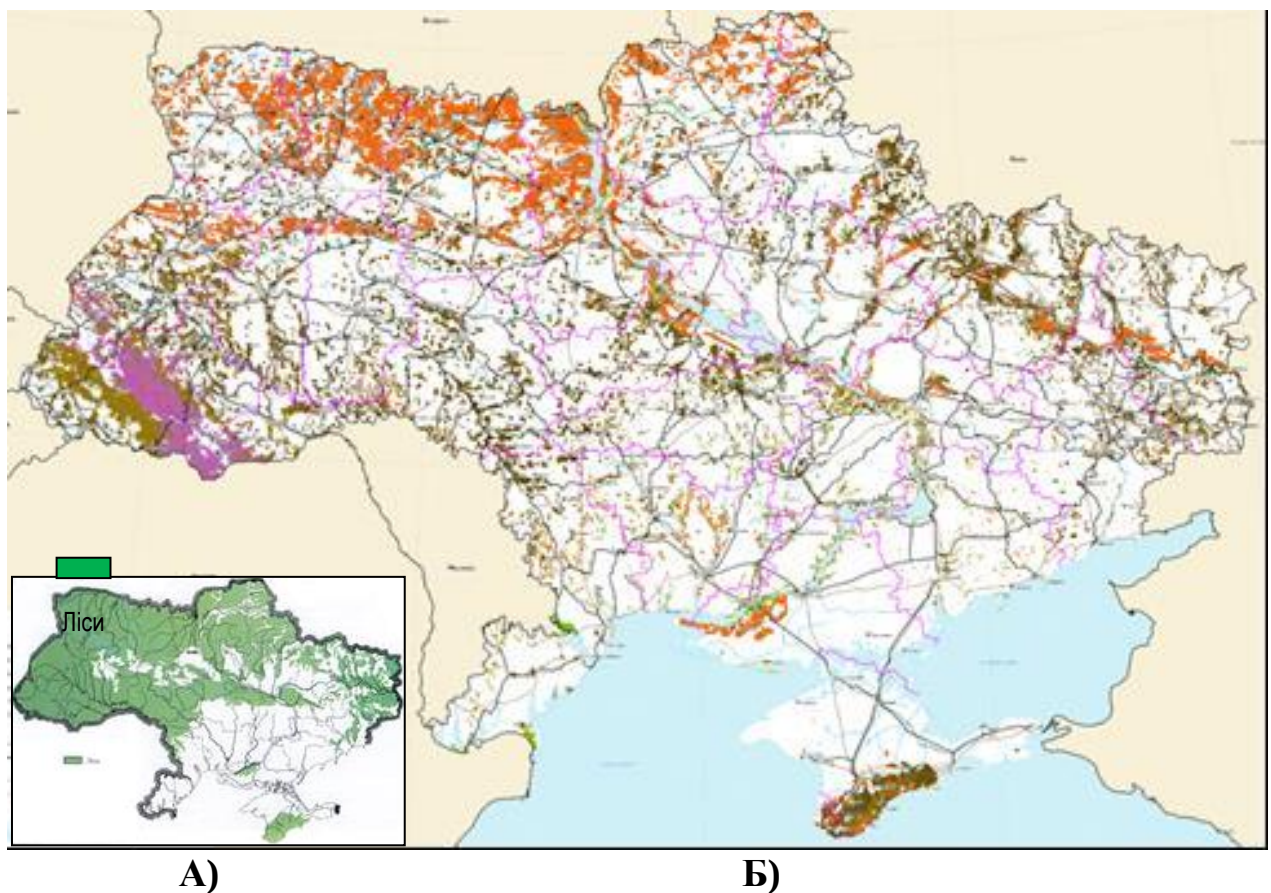


Рис. 13.1. *Поширення лісів на території України в першому тисячолітті після Р.Х. (А) (за С. Генсіруком) і сучасна лісистість (Б – станом на 2011 р.)*



В нашу добу лісистість її території загрозливо низька (за різними даними 15,9-17,2% – рис. 13.2) і не відповідає європейським стандартам (20-30%) оптимальності лісостепових чи лісових ландшафтів (Ткач, 2012). Вона змінюється від 42% у Карпатах до 5,3% у Степу.

Порівняно з середньоєвропейськими показниками в нашій державі рівень лісозабезпечення є одним з найнижчих – на одного мешканця припадає близько 0,2 га лісів. Україна, поряд з Великобританією, Нідерландами, Іспанією, Італією належить до лісодефіцитних країн, тому політика уряду у цій сфері повинна бути спрямована, головним чином, на відновлення лісових площ і ресурсів.

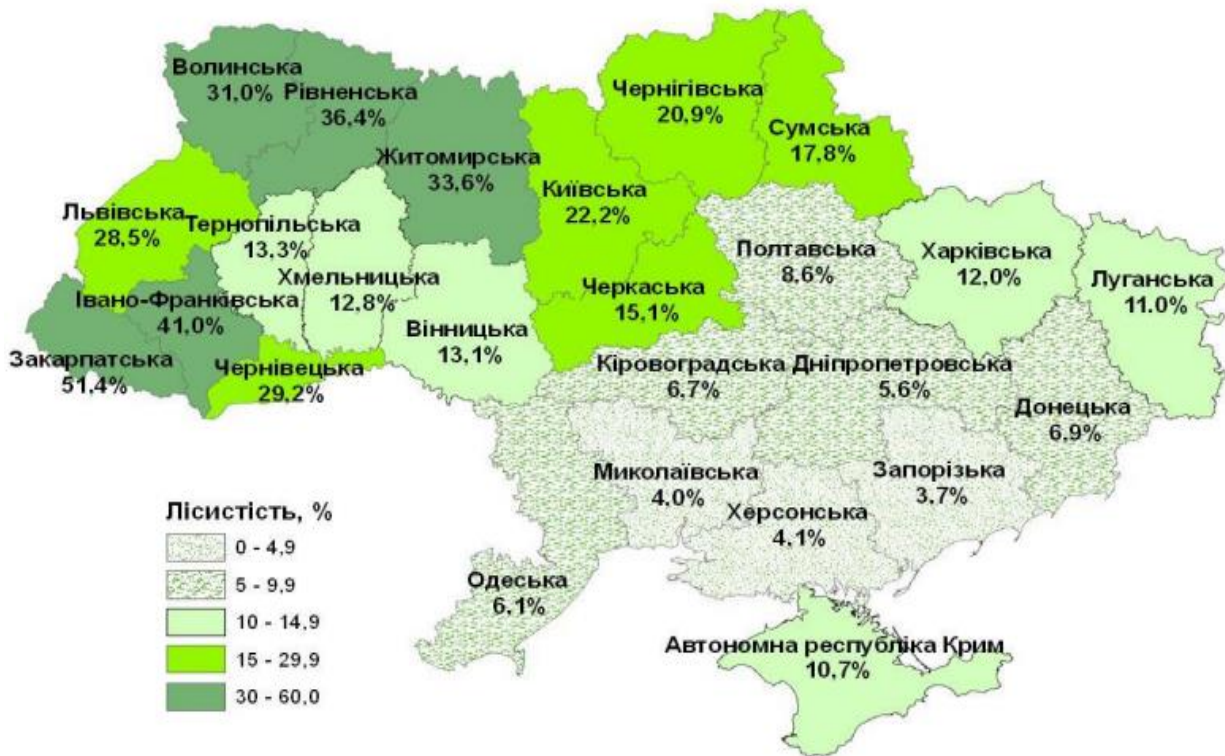


Рис. 13.2. Лісистість території України за станом на 2023 рік

13.3. Лісові екосистемні фактори

Основоположниками уявлення про ліс, як про спільноту лісової рослинності, тваринного світу і мікробіоти, а також відповідного йому середовища життя, були видатні вчені-лісознавці Г. Морозов, Г. Висоцький, В. Сукачов. Єдність панівних у лісі організмів – рослинних, і середовища їхнього існування передбачає, у першу чергу, відповідність їхніх біологічних властивостей умовам середовища. Якщо така відповідність слабка, то швидко змінюється і ліс, тобто зникають одні і з'являються інші деревні види. Але й самі деревні рослини певним чином можуть впливати на середовище, пристосовуючи його до своїх властивостей.



Ліс як спільнота рослин і тварин, що присутні в одному угрупованні, займають спільне навколишнє середовище – певний простір. Ліс існує в єдиному фізичному доквіллі, яке охоплює частину атмосфери і ґрунт, як підземну частину простору. Це середовище – нестатичне, воно безперервно змінюється під впливом потоку сонячної радіації, атмосферних переміщень повітря, зміни ґрунту під впливом погоди, а також від дії самого лісового угруповання на приземний мікроклімат і ґрунт. Лісове угруповання і його місцеоселення разом утворюють самодостатню екосистему, котра фіксує й перетворює променисту енергію Сонця у хімічну своїх вуглеводів і в якій усі складові – живі організми і навколишнє середовище – взаємодіють у малих і великих циклах вуглецю, води й поживних речовин. Елементарною екосистемою лісу є консорційна екосистема, утворена деревним видом-едифікатором та іншими супутніми рослинами й тваринами, які живуть завдяки його середовищевірній здатності.



Лісотвірна консорційна екосистема – це сукупність живих організмів, у якій панує особина домінантного (едифікаторного) автотрофного деревного виду, а решта біонтів пов'язані з нею та між собою функціональними зв'язками, і в цій сукупності тривають постійні речовинно-енергетичні й інформаційні обміни, формується власне специфічне внутрішнє середовище.

У лісах конкретних формацій (дубові, букові, ялинові, соснові тощо) панівними є **види-едифікатори** і, відповідно, **едифікаторні консорції**, від назви яких іменують ліси. Едифікатори і супутні види – **субедифікатори**, є ядрами автотрофних консорцій лісу. Сукупність найменших та останніх у ієрархічному поділі одиниць – консорційних екосистем, утворює парцелярні екосистеми. Найдетальніше вивченим є ієрархічний рівень **біогеоценозної екосистеми лісу**, яка є структурною одиницею ландшафтної лісової екосистеми.

Найвагоміші для лісу **екофактори** акад. П. Погребняк поєднував у три великі групи: абіотичні, біотичні й антропогенні.

Абіотичні фактори ділять на три категорії: кліматичні, едафічні й геологічні. Кліматичні фактори надземного середовища (рис. 13.3) – це атмосферні, сонячна радіація (світло, тепло, інші електромагнітні хвилі), опади (дощ, град, сніг, туман, іній), вологість повітря, концентрація вуглекислого газу, пилові й газові домішки, атмосферне електромагнітне поле й ін. Фізичним чинником ще може бути виробниче втручання в структуру і функціонування ландшафтів, зв'язане з перебудовою геоморфологічної та гідрологічної структури морфо топів, а згодом екотопів.

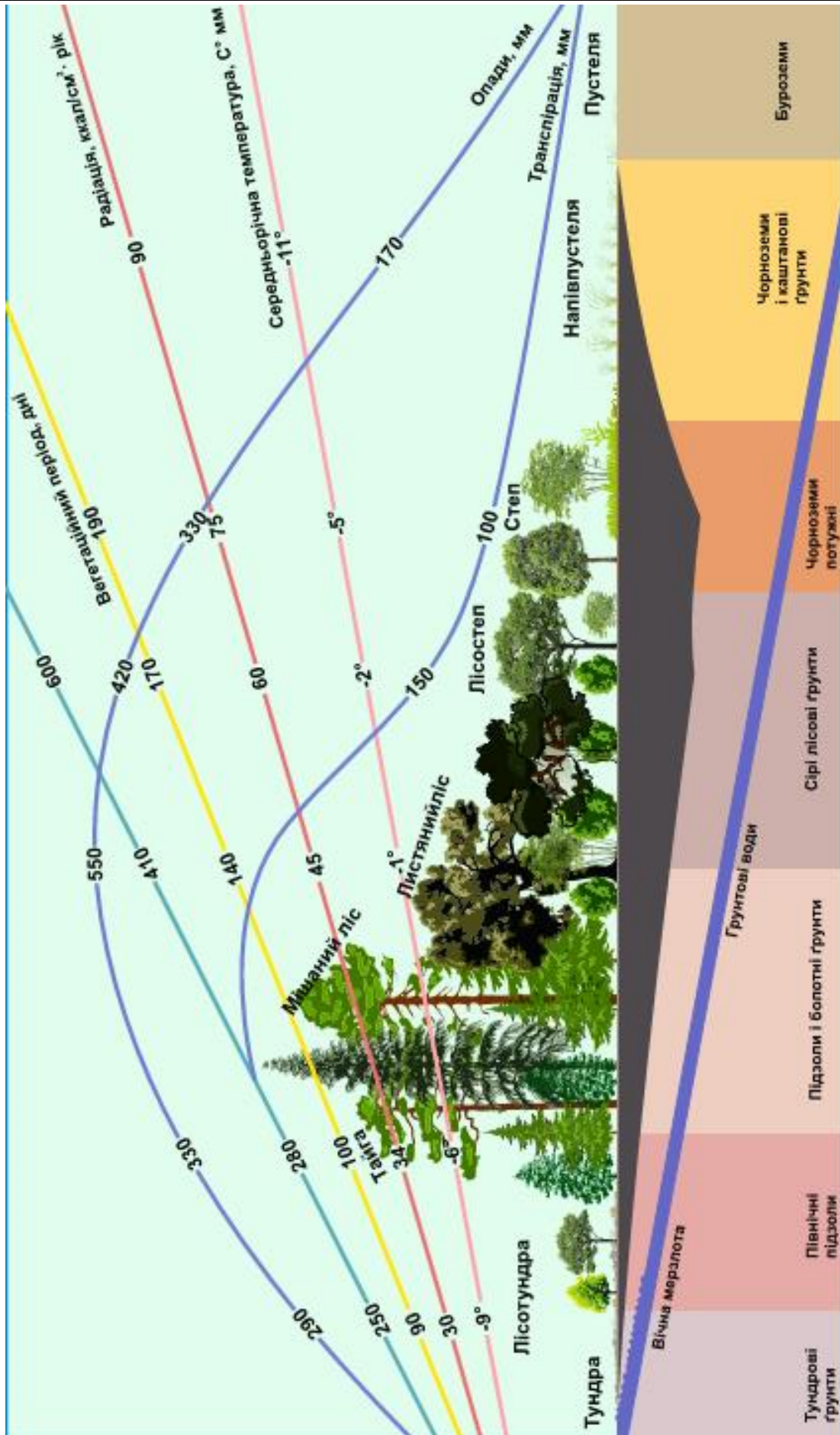


Рис. 13.3. Поширення деревних рослин на Руській рівнині залежно від ґрадiєнтiв кліматичних та едафічних чинників у широтному напрямі (Г. Р. Ейтінген, 1949)



Едафічні фактори, це чинники ґрунтового середовища – ґрунтової родючості, включають вологу з розчиненими у ній поживними речовинами, концентрацію сольового розчину та його кислотність, наявність шкідливих для біоти сполук, фізичні властивості ґрунту – гранулометричний склад, шпаруватість, аерація, теплові властивості, його глибина й доступність для кореневих систем, лісова підстилка тощо.

Геоматичні фактори – гірські породи, що сформували ґрунт, поверхневий стік, ерозія на схилах, повені, алювіальні процеси у заплавах, вплив землетрусів і вулканів. Рельєф розподіляє у просторі світло, тепло, вологу, поживні речовини у ґрунті.

До **біотичних факторів** належать взаємовідношення рослинних, тваринних видів і мікроорганізмів, взаємовплив дерев. Цей вплив називають ценотичним фактором. Активно діють спадкові властивості деревних порід (відношення до світла, тепла, вологості, трофності й ін).

Група **антропогенних факторів** охоплює господарську діяльність, вирубки лісу, лісові підпали, сінокосіння, випас худоби у лісі, нецільове використання лісових земель, людську культуру. Особливо помітний вплив техногенних викидів, водосховищ, які часто підтоплюють лісові ґрунти, або, навпаки, пересушення їх унаслідок необґрунтованої меліорації угідь. Як правило, зазначені фактори діють комплексно. Крім того, з'являються специфічні, похідні від людської діяльності чинники, які проявляються в окремих лісостанах: склад деревних порід, будова деревостанів, інші особливості окремих ділянок.

13.4. Функціонування біоти, не деревні ресурси і контроль шкідників

Окрім деревини лісова екосистема цінна продукцією інших відновних природних ресурсів: харчових й вітамінних продуктів, сировини для виробництва лікарських препаратів, фарбувальних, дубильних, смолоносних речовин, кормів для тварин і птахів, мисливських тварин і птахів. Недеревну продукцію лісових екосистем називають **побічною**, а її заготівлю – **побічним користуванням**. Багато побічних користувань за своїм значенням стали промислом або самостійною галуззю. Запаси лісових ресурсів величезні. Упродовж минулих десятиліть у лісах України заготовляли побічної продукції дикорослих плодів приблизно 130-140 т (на Львівщині до 2 т), березового соку 1200-1300 т (на Львівщині до 8 т), лікарської сировини 60-70 т (на Львівщині до 4-5 т), грибів 5-7 т (на Львівщині до 0,5 т).

Важливими ресурсами природного функціонування лісової біоти є плоди, ягоди й горіхи, як корм для тварин. Водночас, більшості лісових



ягід і плодів притаманні ще й лікувальні властивості, оскільки вони містять у собі біоактивні речовини, мінеральні солі. В лісах України поширені приблизно 2000 видів вищих грибів, з яких до 200 видів – їстівні, проте збирають переважно 10-15 видів. Найціннішими і смачними є білі гриби, рижки, підосичники, підберезники, шампінйони, гливи, лисички, опеньки, печериці. Лісові підприємства України заготовлюють гриби на грибоварно-заготівельних пунктах, які додатково мають 2-4 тимчасові закупівельні пункти. Зібрані гриби якомога швидше доставляють на грибоварний пункт або у консервний цех, де їх негайно переробляють після радіологічного контролю.

Дикорослі **лікарські рослини** привертають дедалі більшу увагу лікарів завдяки рослинним біоактивним речовинам. Препарати рослинного походження вигідно відрізняються від штучно створених тим, що вони метаболічно споріднені з організмом людини й не чинять побічного негативного впливу. Валеріана, конвалія, деякі інші рослини у лікуванні серцево-судинних захворювань просто незамінні.

В Україні з приблизно 200 видів лікарських рослин більшість росте у лісах. Особливо багаті ліси Полісся, Карпат, Криму. Залежно від наявності в рослинах тих чи інших сполук, їх поділяють на **групи**: тонізувальні, заспокійливі, сечогінні, потогінні, жовчогінні, протизапальні, серцеві і т.д. Цілющі речовини є в різних органах рослин, тому збирають лише ті частини рослин, які вміщують найбільшу кількість корисних сполук, і в тій фазі розвитку, коли їх накопичується найбільше. Періодичність заготівель підземних частин рослини повинна бути не менше 5 років; трави – 2 років; листя, квіток, суцвіть – 1 року. Зібрана лікарська сировина потребує негайного висушування. Висушують її на відкритому повітрі, але без попадання на рослини сонячних променів, оскільки вони руйнують активні речовини. Краще сушити рослини на горищах або в провітрюваних приміщеннях. Окремі види лікарської сировини треба висушувати у спеціальних сушарках за певного температурного режиму. Зберігати сировину потрібно у сухих і провітрюваних приміщеннях, окремо отруйні, неотруйні, пахучі, та рослини без запаху.

Обсяг і якість отриманих у лісах **зелених кормів і сіна** залежать від видового складу трав, часу косіння й погоди для сушіння. Сіно потрібне у лісовому господарстві головно для утримання робочих коней та підгодівлі диких тварин узимку за потужного й тривалого снігового покриву. За відсутності підгодівлі й глибокого снігу тварини кормляться молодими лісовими культурами, або об'їдають молоді дерева, що піднімаються над снігом. Своєчасно зібране і висушене у гарну погоду сіно буде ароматним, а на колір – зеленим. Якість сіна знижується і від домішок шкідливих та отруйних рослин. Небажаним є сінокосіння на вирубках, що відведені під природне поновлення: при скошуванні трави ушкоджують і знищують сходи і підріст.

Ліс є оселищем і кормовою базою для *бджіл* і сприятливим ландшафтом для *бджільництва*, яке дає цінні харчові й цілющі продукти у вигляді квіткового меду, прополісу, воску, маткового молочка, квіткового пилку, бджолиної отрути та ін. Бджолиний мед – це унікальний харчовий, дієтичний та лікувальний продукт, який виробляють бджоли в основному з нектару квіткових рослин (Radchenko and Pesenko, 1994). З натурального квіткового меду можна отримати до 300 різних речовин і зольних елементів. Будучи основними запилювачами квіткових рослин, бджоли становлять важливий компонент переважної більшості наземних екосистем.

Пасіку на території України може мати майже кожне лісництво. Їх організують на довготривалий час, тому необхідно провести обґрунтований розрахунок наявності кормової бази для бджільництва у радіусі лету бджіл, яка би забезпечувала взятку не менше 120 кг нектару на одну бджолину сім'ю. Радіус продуктивного лету бджіл становить 2-3 км. *Взяток* бджоли можуть збирати із площі 1,3-2,8 тис. га. 110-150 вуликів. Утримання пасіки є доцільним, коли кожна бджолина сім'я дає щорічно не менше 16 кг товарного меду. Вулики краще розміщувати на невеликих (до 5°) південних і південно-східних схилах (Radchenko and Pesenko, 1994).

За видом взятку квіткові рослини поділяються на 3 групи: нектаропилконосні (бджоли беруть головним чином пилок і меншою мірою нектар – кульбаба, шипшина, горобина); пилко-нектароносні рослини, з яких бджоли беруть в основному нектар і меншою мірою пилок (малина, акація біла, жіночі дерева верб, більшість квіткових рослин); власне пилконоси – рослини, з яких бджоли беруть тільки пилок (ліщина, береза, вільха, тополі, шипшина, сосна, ялина, ялиця та деякі інші породи, звіробій, кукурудза). За термінами цвітіння виділяють 4 групи медоносів (табл. 13.1): ранньовесняні, весняні й ранньолітні, літні, осінні.

Табл. 13.1. Класифікація медоносів за термінами цвітіння
(за А. Ковальовим)

Представники родів у різні пори року			
Ранньовесняні	Весняні та ранньолітні	Літні	Осінні
пролісок, мати-і-мачуха, ліщина, медунка лікарська, вільха, ільмові, верби, рокита, клен, агрус, смородина	кульбаба, акація жовта, глід, малина, конюшина біла, клен татарський, плодові види	липа, гречка, зніт, конюшина біла та гібридна, соняшник, буркун	кульбаба осіння, конюшина біла (отава), верес



Розрізняють взяток підтримувальний, за якого зібраного нектару вистачає лише на харчування бджолої сім'ї, та продуктивний, який використовують для відбору товарного меду. **Продуктивний взяток** є головним і йде там, де у лісах росте багато липи, акації білої, а на полях культивують гречку й соняшник (табл. 13.2).

Для успішного розвитку лісового бджільництва необхідне введення до складу лісових насаджень нектароносних дерев і кущів. Додаткові 3-5 дерев липи на 1 га площі у стиглому віці підвищують нектаропроductивність на 10 кг. Липа серцелиста цвіте якраз у той період, коли бджолої сім'я досягає найвищого розвитку, тому збір нектару найповніший. Важливим є підбір медоносних рослин із врахуванням термінів і тривалості їх цвітіння. Це дозволяє уникнути безвзяткових періодів. Поблизу пасіки на пустирях доцільно робити посіви буркуну, фацелії, синяку тощо.

Важливо завчасно зауважити спалах чисельності популяцій **шкодо-чинних видів** комах, інвазії захворювань, спричинених мікробними організмами, щоб не допустити поширення їх на великі площі.

Табл. 13.2. **Середні показники медопродуктивності** (за В. Поліщуком)

Рослина	Запас меду, кг·га ⁻¹	Рослина	Запас меду, кг·га ⁻¹
Акація біла	500	Клен татарський	300
Акація жовта	125	Клен звичайний	200
Оксамитник амурський	280	Крушина ламка	120
Буркун білий	300	Конюшина біла	120
Верес	200	Липа серцелиста	600
Гледичія	250	Липа широколиста	800
Гречка	90	Маслинка вузьколиста	200
Синяк звичайний	350	М'ята перцева	300
Сніжноягідник	400	Малина лісова	150
Софора японська	300	Цикорій дикий	100
Соняшник	40	Чебрець звичайний	140

У **хвойних лісах**, зокрема сосняках, на бідних піщаних ґрунтах, можуть чинити значну шкоду личинки, що гризуть хвою – сосновий шовкопряд та інші. Їх виявляють за огризками хвої, що осипається навколо стовбура. Із стовбурних шкідників у соснових лісах доволі часто поширені лубоїди. Поширеним шкідником ялини є короїд-типограф. Жуки типографа проробляють довгі ходи вгору й униз стовбуром від вхідного отвору.

У сосняках і ялинниках поширена коренева губка. Збудник її (трутовий гриб) спричинює гнилизну коренів, що переходить у стовбур. Інвазії

поширюються через свіжі пні і за контакту здорових коренів із хворими. Хворі дерева мають зріджену крону, вкорочені пагони і хвою, згодом вони всихають і звалюються вітром. Гнилизну коренів і окоренкову гнилизну багатьох хвойних і листяних дерев спричинює опеньок. У лісах України він частіше уражає ялинові насадження. Соснова губка уражає старі сосняки. Ялинова губка спричинює гнилі стовбурів ялини.

У *листяних лісах* дубові й березові дерева часто уражають шкідники-листогризи – це гусениці непарного шовкопряда, зеленої дубової листокрутки, кільчастий шовкопряд, золотогузка й інші (рис. 13.4). Зі стовбурних шкідників дуба найнебезпечнішими є златка і дубовий вусань. Дубові насадження іноді уражує грибова хвороба – судинний мікоз. Гнилизну стовбурів дуба часто спричинює несправжній дубовий трутовик, що утворює на стовбурах багаторічні плодові тіла. Деревя порослевого походження можуть бути ушкоджені опеньком.

Шкідниками *незімкнутих культур і молодників* є травневі хрущі, довгоносики, клоп. Із хвороб, спричинених комахами, небезпечними є сосновий вертун, звичайне і сніжне шютте. Усі вони особливо небезпечні до повного змикання культур (до 10 років), але шкодять і значно довше. Молоде листя і нездерев'янілі гілки дуба уражає борошниста роса – укриває білим налетом листки, які передчасно відми-

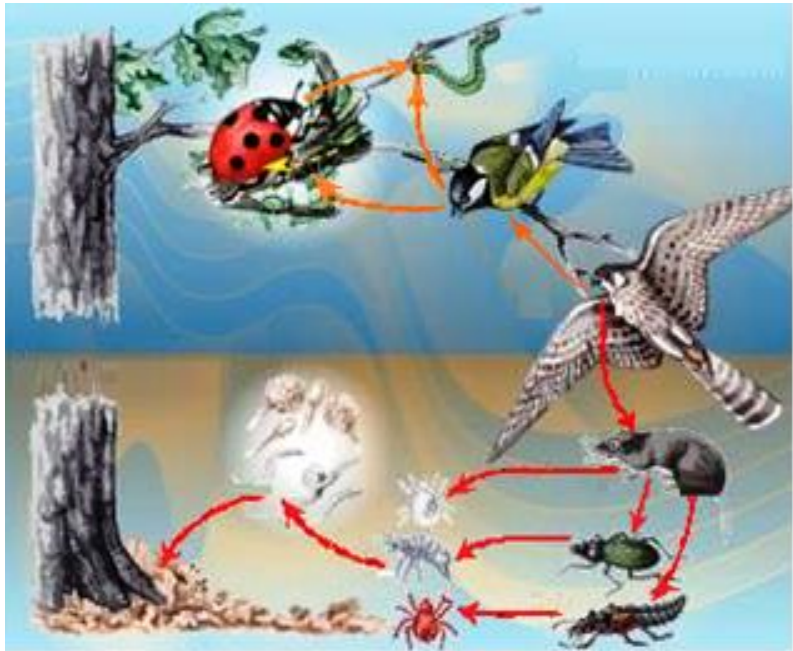


Рис. 13.4. Простий ланцюг живлення у лісовому біоценозі

рають, а гілки не встигають здерев'яніти і гинуть від морозу. Найнебезпечнішими шкідниками соснового насадження є смолух соснових шишок і соснова шишкова вогнівка. Ялині шкодить типова шишкова листокрутка, ялинова шишкова муха й ін. Дубові жолуді ушкоджує довгоносик і жолудева плодожерка. Плоди і насіння інколи уражені грибами, які спричинюють захворювання людини.

Лісівники повинні уважно стежити за санітарним станом лісових культур, плантацій, інших насаджень, а також посадкового матеріалу в розсадниках. Контроль екосистем лісу на предмет *захисту від шкідників і хвороб* провадиться різноманітними методами і технічними засобами, за



допомогою яких можна попередити масове розмноження комах, виникнення і поширення захворювань деревних рослин. Для захисту лісу здійснюють **винищувальні обробки** зі застосуванням хімічних чи біологічних препаратів. Захист лісу передбачає такі групи заходів: спостереження за появою шкідливих організмів; карантин рослин; лісогосподарський захист; біологічний, хімічний і фізичний захист.

Моніторинг (спостереження) у захисті лісу поділяють на розвідувальний і детальний. Перший проводять систематично з метою візуальної оцінки стану лісу, чисельності шкідників і поширеності захворювань. Детальний нагляд супроводжують обліками для одержання кількісних даних, що вказують на обсяг спалахів і прогноз їхнього розвитку. Ці дані потрібні для обґрунтування доцільності застосування тих чи інших захисних заходів, аж до авіаційної обробки біо- чи хімпрепаратами. Виникненню спалахів можна запобігти: відповідним добором посадкового чи посівного матеріалу, регулюванням складу деревних порід, підбором їх стійких форм, високою якістю підготовки ґрунту, науково обґрунтованим проведенням рубок догляду, регулюванням інтенсивності користування лісом для випасу худоби, відпочинку населення тощо.

Біологічний захист від шкідників і хвороб – це використання тих міжвидових взаємовідношень, що існують у природі та які призводять до загибелі шкідливих комах, призупинення розвитку збудників захворювань деревних рослин.

Біологічні засоби захисту рослин не забруднюють навколишнього середовища і діють виключно на шкідників і хвороби. Так, проти шкідників широко застосовують ентомофагів, тобто хижих і паразитичних членистоногих. Наближеним до природи методом є використання комахоїдних птахів та звірів. У багатьох країнах спалахи шкідників і хвороб лісу успішно зупиняють фабричними біопрепаратами. Їх виготовляють промисловим шляхом з використанням відповідних мікроорганізмів.

Хижі комахи і членистоногі надзвичайно різноманітні і численні в будь-якому лісі. Повсюди є павуки і кліщі, які знищують яйця, дрібних личинок і навіть окремих особин шкідливих комах. Хижацький спосіб харчування властивий **жукам і личинкам жуужелиць**, що полюють на гусениць і лялечок різних п'ядунів, листовійок, шовкопрядів й інших метеликів. Дрібніших комах, наприклад, попелиць знищують жуки "божі корівки", золотогузки, хижі клопи. Серед активних винищувачів короїдів відомі жуки-пістряки (типовий представник – мурахожук), верблюдки. Важливу роль у захисті лісу належить рудим лісових мурашкам, що підлягають всебічній охороні і розселенню. Відповідний лісозахисний ефект дає турбота про комахоїдних птахів, кажанів, що потребують створення тимчасових притулків. Корисні у винищуванні шкідливих комах землерийки, миші, кабани. Практично використовують у лісозахисті теленомуса

соснового шовкопряда, а також лісової трихограми, яка уражає яйця багатьох видів хвое- і листогризних шкідників.

Фізичний захист лісу здійснюють з використанням фізичних засобів регулювання кількості шкідників і розвитку хвороб рослин. Класичними прийомами є застосування різних світлових пасток, а також пристроїв, що убивають притягнутих тим чи іншим способом комах електричним зарядом чи іншим способом. У лісовому господарстві використовують також перешкоди для пересування комах у вигляді ловчих каналів, клейових кілець, що накладають на стовбури дерев, тощо.

Жоден з існуючих методів не може в повному обсязі забезпечити ефективний захист лісу. Тому розробляють комплексні системи заходів для конкретних умов і виду шкідливого організму, причому комплекс відповідних методів і прийомів постійно удосконалюють і доповнюють з урахуванням новітніх наукових даних і виробничого досвіду. У критичних ситуаціях застосовують **хімічний захист** лісових екосистем. Використовують, головним чином, синтетичні пестициди, у т.ч. інсектициди, акарициди, фунгіциди, гербіциди, призначені для знищення комах, кліщів, збудників грибних захворювань, бур'янів. Ці засоби застосовують способом розпилення, обприскування, фумігації, приманок тощо. У зв'язку з високою токсичністю хімічних засобів захисту рослин для людини і нешкідливих організмів, що живуть у лісі, застосування їх суворо регламентоване органами охорони здоров'я й охорони навколишнього середовища.

Лісові екосистеми потребують постійного захисту від пожеж, їх профілактики, особливо у широтах з тривалими сухими періодами. Вигорання органічної речовини у лісах зумовлює значні емісії вуглекислого газу й оксидів, інших поживних речовин в атмосферу (рис. 13.5).

В Україні останніми роками лісові пожежі почастишали (рис. 13.6), що частково зв'язано з аномаліями погоди у теплий період року. Дослідження показують, що зміна клімату призвела до збільшення тривалості сезону лісових пожеж, частоти їх виникнення та площі вигорання. Вогненебезпечний сезон значно подовжився через тепліші весни, довші літні посушливі сезони, меншу кількість опадів.

Учені Єльського університету з'ясували, що **лісові пожежі** зумовили глобальне поте-



Рис. 13.5. Сателітарна світлина Греції, де 2007 року палали лісові масиви

пління 3 млн років тому. Такі висновки кліматологи зробили, після того, як підраховали рівні концентрації тропосферного озону, аерозольних часток і метану в епоху Середнього Пліоцену. Виявилося, що їх вміст в атмосфері в три рази перевищував аналогічні показники доіндустріальної епохи.

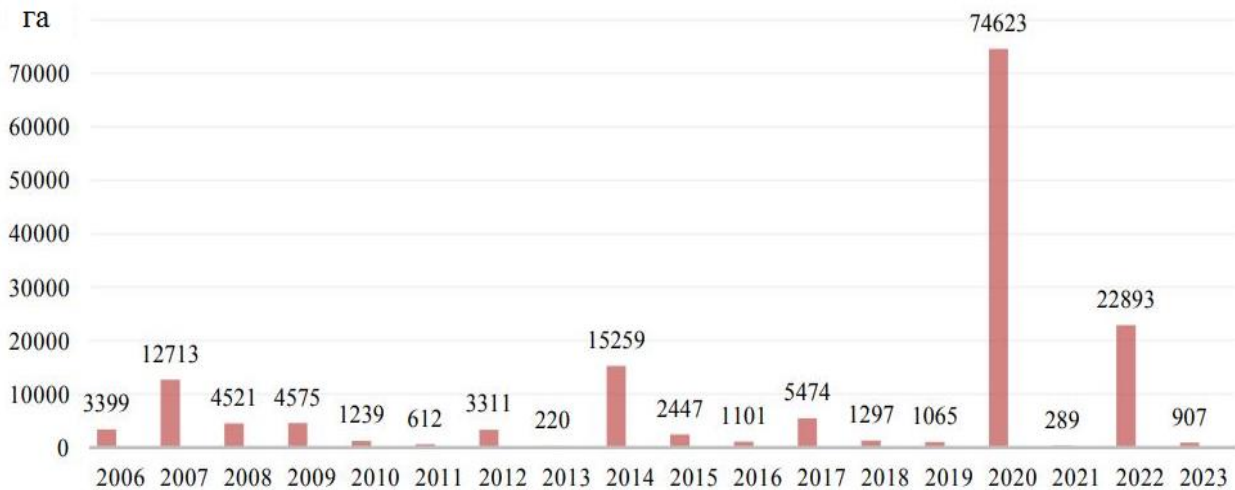


Рис. 13.6. Динаміка площі лісових пожеж в Україні, га

Загрозлива ситуація тепер властива для багатьох регіонів світу. Лісові пожежі стають дедалі поширенішими по всій планеті, спалюючи сьогодні щонайменше вдвічі більше площ, ніж два десятиліття тому.

Науковці з Університету Меріленду дослідили світові дані за період із 2001 по 2023 роки й підраховали, що площа, спалена лісовими пожежами, збільшувалася приблизно на 5,4% на рік за цей період.

13.5. Акваекосистеми – класифікація і поширення

В екології є дві концепції щодо ролі середовищних системотвірних факторів – атмосферного повітря і води. Для акваекосистем вода, як внутрішнє середовище, значно вагоміша для життєдіяльності більшості гідробіонтів. Її не можна порівнювати з повітрям, як середовищотвірним компонентом суходільних екосистем тому, що вода одночасно є і внутрішнім середовищем організмів. Отже вона є внутрішнім простором і акваекосистем і їх окремих біокомпонентів. Такі властивості води, як щільність (вона приблизно у 800 разів більша від повітря), здатність вбирати гази й розчиняти речовини є життєдайними для її мешканців. Для більшості з них у воді є все, що необхідне для нормального функціонування біоценозів, популяцій та окремих організмів.



Вода зумовила виникнення й еволюцію безлічі різноманітних морфо-анатомічних пристосувань для безпечного перебування у просторі водних екосистем. Водне середовище стабільніше й інерційніше за фізичними й хімічними параметрами, ніж атмосферне. Унікальна, порівняно з іншими речовинами, здатність до розширення за охолодження нижче 4°C і замерзання з утворенням льоду, що плаває на водній поверхні, а не тоне, створює сприятливі умови для гідробіонтів у зонах з холодним кліматом.

Життя у водному середовищі – активніше й різноманітніше, ніж на суходолі. У ньому є всі типи тваринного світу. На суходіл поширилися лише деякі з них, а масово оселилися лише членистоногі та хребетні. Трофічні ланцюги й мережі у водних екосистемах починаються з фітопланктону і закінчуються найбільшими на Землі гетеротрофами. В аквасистемах океану за різноманітністю переважає тваринне життя, в наземних екосистемах домінує життя рослинне (Одум, 1986).

Прісноводні екосистеми покривають 0,78% поверхні Землі і містять 0,009% загального обсягу води планети. Вони генерують майже 8% чистої первинної продукції. Прісноводні екосистеми містять 41% усіх відомих у світі видів риб.



Акваекосистемою (гідроекосистемою) є природна чи штучна океанічна, морська або суходільна екосистема, головним середовищевірним компонентом якої є вода, як зовнішня і внутрішня субстанція біонтів, а її границями є донна океанічна, морська або суходільна твердь на глибину поширення живих організмів і поверхня води й освоєний надводний простір, як зовнішнє функціональне довкілля.

Будова акваекосистем на перший погляд проста, але функціонально вона дуже складна й глибоко не вивчена. Дотепер гідробіологи відкривають велику кількість нових видів та екоморф організмів у різних місцях планети. Екологічна класифікація автотрофних і гетеротрофних гідробіонтів передбачає їхній поділ за способом харчування, існування, оселення тощо.

Залежно від місця оселення організми вод ділять на такі екологічні групи:

1) Група Пелагос – організми товщі води (пелагіалі). До них належить нейстон (мешканці поверхневої плівки води, що бігають і плавають), планктон (завислі у воді "пасивні плавці", яких переміщують водотоки) і нектон (активні плавці).

2) Група Бентос – біота дна водойми (бенталі). Це – епібентос (прикріплені до дна організми, або які лежать на ньому) та інбентос (внутрішньогрунтові організми – живуть у товщі донних відкладів).



3) Проміжна група гідробіонтів – Планктобентос (планктон придонної товщі води) і нектобентос (нектон придонної товщі води).

4) Особливі групи гідробіонтів – Епібіоз (Перифітон – група організмів "обростання" твердих субстратів (тіл великих тварин, скель, кораблів тощо) і фітофільні гідробіонти (мешканці прибережних заростей вищих водних рослин).



Водойми Землі належать до двох категорій – внутрішньоконтинентальних прісноводних та океанічних (Світовий океан з усіма пов'язаними з ним морями).

Внутрішні континентальні акваекосистеми розглядаємо як елементарні структурні підсистеми материкових суходільних екосистем. Є дві групи материкових акваекосистем: 1) непротічні води або лентичні екосистеми – озера і ставки; 2) протічні води або лотичні екосистеми – джерела, потічки, канали й ріки. Заболочені ділянки з коливанням рівня води за сезонами й роками – марші й болота, інколи зараховують до акваекосистем, але це за висновками переважної більшості вчених необґрунтовано. Прісноводні екосистеми займають малі площі, але є особливо важливими у функціонуванні суходільних екосистем, у збереженні їх біорізноманіття, а також для стабільності аграрних і лісових ландшафтів.

Океанічні простори, а особливо екологічний стан і приналежність шельфових зон, стають у нашу добу об'єктами особливої політичної уваги прибережних країн, оскільки є джерелами харчових ресурсів. Надмірне виловлювання риби й інтенсивна заготівля інших морської продукції спричиняють економічні й збройні конфлікти, а також привертають увагу природоохоронних рухів. Будову та функції водних екосистем як цілісних утворень, що охоплюють біоту, неживі компоненти й чинники у взаємовідносинах між ними і їхнім довкіллям вивчає **гідроекологія**.

Озерні і ставкові екосистеми зазвичай ділять на три зони (рис. 13.7).

Перша літоральна зона – це мілководдя біля берегів. Дальше від берега є дві зони – відкритої води (профундаль) і зона глибоководдя (гіполімніон). У зоні відкритої води (або освітленій зоні) сонячні промені підтримують фотосинтез у водоростей і приваблюють види, які ними живляться. У зоні глибоководдя харчова база – це рештки, що потрапляють із літоральної або освітленої зон.

Зони в проточних **річкових екосистемах** визначені градієнтом русла (каналу) або швидкістю течії. Річковий басейн (водозбірна площа) обмежений вододілами. Від його границь до верхньої брівки надзаплавної тераси (краю річкової долини) простилається земна поверхня – плакор. Нижній край тераси є границею заплави, яка межує з рипаллю – краєм корінного русла, де починається водна частина річкового ложа. На певній відстані від берега рипаль переходить у медіаль – глибоку частину водотоку. Велика турбулен-

тність води сприяє збільшенню концентрації розчиненого кисню. Відмінності у швидкості течії дають підстави для поділу річок на гірські й рівнинні.



Рис. 13.7. Горизонтальне і вертикальне зонування озерних екосистем (Романенко, 2001)

Харчова база гідробіонтів у проточних екосистемах залежить від дерев (заплавні ліси) або від водоростей і фітопланктону акваекосистем. Трофічні взаємовідношення внутрішніх гідробіонтів суходольних водойм помірного кліматичного поясу відносно прості. Значно складніші взаємовідношення у ландшафтних басейнових екосистемах (рис. 13.8).

Структура **озерної екосистеми** – це перш за все біоценоз. Він охоплює спільноти різних видів тварин, рослин і грибів, і середовища існування, населеного організмами – біотопа. Біоценоз в озера має різноманітні групи організмів: види риб, водоплавних птахів, жаб і черв'яків, з просуванням на південь у внутрішніх водах оселяються хижі рептилії, а до водних біотопів належать птахи, ссавці тощо. До автотрофів озер належать водні рослини, водорості. Біотичні фактори значною мірою визначають динаміку та стабільність озера. Наприклад, хижі риби мають велике значення, оскільки вони контролюють популяції своєї жертви і таким чином підтримують баланс в екосистемі.



Рис. 13.8. Зовнішнє, внутрішнє середовище озernih екосистем (<http://ecology-of.ru/wp-content/uploads/2015/07/e%60kosistemu-ozera1-640x330.jpg>)

Біотоп екосистеми озера формується абіотичними факторами. Ці фактори включають температуру, рН води, кількість світла, що падає на озеро, і багато інших. Разом вони утворюють середовище існування, в якому розвивається та адаптується біоценоз озера. Абіотичні фактори безпосередньо впливають на біоту озера.

Біорізноманіття в екосистемі озера має вирішальне значення для її стабільності та функціональності. Під поверхнею води - різноманіття видів риб, у тому числі хижих риб, планктоноїдів і мешканців дна.

Водоплавні птахи, такі як качки та чаплі, використовують для добування їжі берегові зони та відкриті водойми. Водні рослини та водорості процвітають під поверхнею води та відіграють важливу роль у кругообігу поживних речовин.

Високе біорізноманіття сприяє стабільності та стійкості екосистеми озера. Різні види виконують різні функції, які підтримують рівновагу в екосистемі. Наприклад, хижа риба може контролювати популяцію іншої риби-хижака, тоді як водні рослини завдяки своїм властивостям зберігання допомагають регулювати рівень поживних речовин у воді та виробляти цінний кисень. Харчовий ланцюг в екосистемі озера тісно пов'язаний і включає різні трофічні рівні. Виробники, такі як водорості, водні рослини та фітопланктон, утворюють основу, виробляючи органічні матеріали та кисень з неорганічних речовин і сонячного світла (фотосинтез). Основні споживачі, такі як нехижі риби та водоплавні птахи, харчуються продуцентами. Їх, у свою чергу, споживають м'ясоїдні споживачі, такі як хижа риба та раки. Кінцеві споживачі, які не мають серйозних ворогів, є на вершині харчового ланцюга. Коли живі організми гинуть або утворюють продукти життєдіяльності, вони розкладаються редуцентами, такими як черв'яки та бактерії, які перетворюють органічні компоненти на неорганічні речовини.

Евтрофікація – це процес, під час якого озеро або водойма стає надмірно збагаченим поживними речовинами, зокрема сполуками азоту та фосфору. Ці поживні речовини часто походять від людської діяльності, такої як сільське господарство, стічні води та добрива. Коли ці поживні речовини потрапляють в озеро, вони призводять до сильного росту водоростей і водних рослин. Надмірне накопичення сполук азоту в евтрофному озері значно посилює цикл азоту та змінює біологію озера.

Надлишок азоту сприяє росту фітопланктону, водоростей і водних рослин. Ці організми поглинають амоній і нітрати з води і перетворюють їх на органічні сполуки азоту. Коли ці організми гинуть, вони опускаються на дно озера і розкладаються редуцентами. Цей процес розкладання споживає кисень в осадах, що призводить до виснаження кисню в глибокій

воді, що називається гіпоксією. Такий брак кисню загрожує риbam та іншим водним формам життя.

Захист і збереження екосистеми озера мають вирішальне значення для збереження біорізноманіття та екології цих життєво важливих вод.

13.6. Трансформація і забруднення водних екосистем

Вода, як всепланетна надпотужна геоматична сила, перманентно трансформує довкілля на Землі. Проте людський фактор і в функціях гідросфери залишає свій слід. Водна оболонка планети у різного рівня акваекосистемах дуже багата біотичними ресурсами, які, за прогнозами вчених у майбутньому можуть стати головними у харчуванні людей. Інша важлива функція акваекосистем зумовлена активністю гідробіонтів і корисна вона тим, що забезпечує очищення води як від природного, так і від антропогенного забруднення акваторій. І, нарешті, сама чиста природна вода є щораз більше дефіцитним ресурсом, як питна, так і інша, що створює здорове довкілля.

Усі перші поселення, а нині великі міста світу розташовані на річках, озерах або лиманах, які, зазвичай, перетворені у природні колектори міських стоків. Сотні років гідробіота виконує санаційну функцію.

До початку XIX ст. більшість міст Європи використовували питну воду безпосередньо з річок. З початком третього тисячоліття очищення вод від забруднення стало складною технічною і затратною проблемою.

Водні ресурси великих рік України є потужними й потребують дбайливого ставлення. Найбільшими річками України є Дніпро (з притоками Прип'ять і Десна), Дністер, Південний Буг, Сіверський Донець (табл. 13.1). Найбільшим в Україні джерелом водопостачання є ріка Дніпро, забір води з якої перевищує 60% від загальної кількості води, що використовують у державі. У басейні Дніпра (рис. 13.9) найбільша сумарна довжина річок – 78,5 тис. км. За теперішньої інтенсифікації рибальства й інших морських промислів шельфова зона Світового океану біднішає біотичними ресурсами.

Катастрофічним стає обсяг його забруднення прибережними скидами, цивільними й військовими плавзасобами, умисними захороненнями промислових відходів у морських глибинах, нафтодобувними і танкерними викидами тощо. Проте, найбільше забруднень потрапляє в моря з річковими стоками, що несуть в океан сполуки свинцю, ртуті, міді, цинку, хрому, нікелю, кадмію, а також нітрати, фосфати, вуглеводні, пестициди і радіонукліди.

Основними джерелами забруднення суходільних акваеко систем є енергетичні та промислові комплекси, транспорт, сільське й комунальне господарство.

Табл. 13.1. Найбільші ріки України

Ріка	Плин вод	Довжина, км		Площа басейну, км ²	
		В Україні	Загальна	В Україні	Загальна
Дніпро	Чорне море	1 121	2 201	292 700	504 000
Південний Буг	Чорне море	806	—	—	63 700
Дністер	Чорне море	925	1 362	52 690	72 100
Сіверський Донець	Дон	700	1 053	54 540	98 900
Західний Буг	Вісла	401	772	10 140	73 470
Прут	Дунай	299	967	17 400	27 500
Прип'ять	Дніпро	290	761	69 140	121 100
Дунай	Чорне море	174	2 960	32 350	817 000



Рис. 13.9. Водозбірні ландшафтні екосистеми України
(<http://dpbuvr.gov.ua/category/>)



Інгредієнти забруднення вод і чинники деградації водних екосистем найрізноманітніші: тверді завислі й розчинні забруднювачі, збіднення киснем, зміна pH , порушення температурних режимів і циркуляції води. Усі вони стають причиною деструкції водних біогеоценозів, зменшення їх біорізноманітності й продуктивності, порушення газообміну між гідросферою й атмосферою, і зрештою, водного й теплового режимів біогеосфери.

Масштабними стали геоморфологічні впливи, що спричиняють трансформацію суходільних акваекосистем: кар'єрні роботи, шахтний видобуток корисних копалин, нафто- й газовидобуток, цілеспрямована гідромеліорація, забудови, гідроенергетика.

Прикладом знищення аквальної системи глобального рівня є теперішній стан багатого природними ресурсами Аральського озера (рис. 13.10).



Рис. 13.10. Динаміка акваторії Аральського озера
(<http://www.naturalist.if.ua/wp.jpg>)

Унаслідок багаторічного постійного перехоплення вод рік Сирдар'ї та Амудар'ї на потреби сільського господарства зруйнована ціла ландшафтна екосистема, що спричинило не лише значні мезокліматичні зміни в Середній Азії, а й спричинило гостру соціальну кризу в цілому регіоні, зникнення історичного пласту етнокультур.

13.7. Система басейнового керування водними ресурсами

У світовій практиці для захисту водних систем, як джерела відновних ресурсів, застосовують різні моделі басейнового менеджменту. Керування водним екосистемами за басейновим принципом є одним із трьох типів



менеджменту використання та охорони вод і водних об'єктів. Екосистемне керування водним господарством здійснює держава і суспільство через басейнові управління на основі платного водокористування. Обов'язковою умовою функціонування басейнового принципу є відкритість процедур обговорення та прийняття фінансових рішень для усіх зацікавлених сторін, інформаційний доступ громадськості до басейнової водної політики й екологічних програм на всіх стадіях їх розроблення та впровадження.



Басейновий принцип – це такий спосіб керування водними ресурсами, за яким основною одиницею управління є екосистема річкового водозбірного басейну.

Він враховує усі підсистеми із установленими екологічними й соціо-економічними зв'язками. Такий підхід дає змогу передбачати наслідки людської діяльності для завчасного попередження екологічних і техногенних катастроф. Річковий басейн розглядають як єдину ландшафтну екосистему, де акваекосистеми є одними із багатьох, але пріоритетними системотвірними компонентами. Охорона, збалансоване використання й відтворення їх природних властивостей забезпечують сталий розвиток надсистеми – соціуму (міста, регіону, країни).

Функції системи басейнового керування наступні (рис. 13.11):

1) створення басейнових методик розрахунків і розмірів грошових зборів за:

- ✓ забір води з водного об'єкта;
- ✓ скидання до водного об'єкта нормованих речовин;
- ✓ пропуск води через турбіни ГЕС;
- ✓ використання водного об'єкта водним транспортом;
- ✓ видобування корисних копалин у межах площі водного басейну;
- ✓ користування водними об'єктами для потреб рибного й мисливського господарств;

2) стягнення грошових зборів за водокористування;

4) прийняття рішень про видачу позик і надання субсидій водокористувачам, які ефективно зменшують шкідливий вплив на довкілля;

5) проведення аналізу географічних, геологічних, гідрографічних і демографічних характеристик басейну, а також аналізу землекористування та економічної діяльності;

6) вивчення впливу людської діяльності на стан поверхневих, підземних і морських прибережних вод басейну;

7) економічний аналіз використання води в межах басейну;

8) виявлення всіх ділянок (зон) водних об'єктів, які використовуються для забору питної води;

9) складання реєстру всіх ділянок, які визначені чинним законодавством як такі, що підлягають особливій охороні;

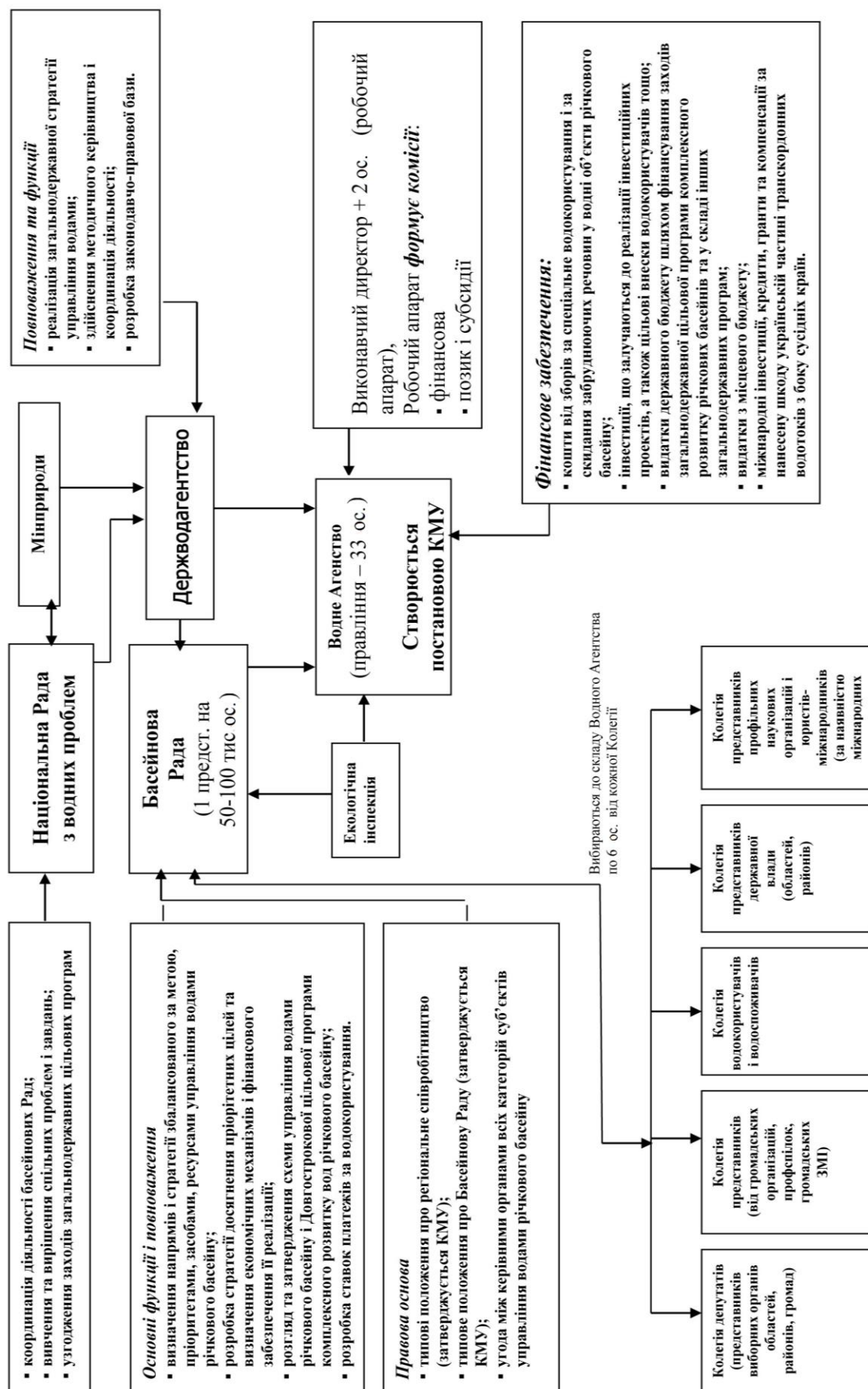


Рис. 13.11. Перспективна схема басейнового принципу керування водозбірними екосистемами України



10) розроблення програми моніторингу стану всіх поверхневих, підземних і морських прибережних вод;

11) розроблення програми спеціального моніторингу стану ділянок (зон), що підлягають особливій охороні;

12) встановлення екологічних нормативів (стандартів або категорій) якості води; розроблення програми заходів, спрямованих на досягнення екологічних цілей, у тому числі нормативів гранично допустимих скидів (ГДС) і регламентів періодичного водовідведення;

13) розроблення водних кадастрів, водно-господарських балансів і планів керування річковим басейном;

14) забезпечення громадськості інформацією щодо проектів плану керування річковим басейном і врахування зауважень;

15) участь у співпраці з іншими компетентними органами в заходах щодо запобігання або зменшення наслідків аварій, які призводять до забруднення вод.



Стратегічна мета басейнового керування – забезпечення басейнової збалансованості водного господарства, охорони вод і відновлення водних ресурсів на основі узгодженості правових засад і керівних дій суб'єктів водокористування за басейновим принципом, спрямованих на оптимальне водозабезпечення населення і галузей економіки, впровадження перспективних технологічних нормативів використання водних ресурсів, запобігання шкідливій дії вод.

Відповідальні за впровадження басейнового принципу – Міністерство екології та природних ресурсів України та Державне агентство водних ресурсів України. Плановою основою басейнового принципу керування є цільова програма використання і охорони водних екосистем, відновлення водних ресурсів у басейні.

В Україні є всі законодавчі підстави для переходу на басейновий принцип керування як такий, що повністю відповідає всесвітньо визнаній політиці збалансованого соціально-економічного розвитку і функціонування водних екосистем.

13.8. Техносистеми й урбосистеми – утворення, взаємовплив

За удосконалення і збільшення виробництва матеріальних благ, харчів і розвитку торгівлі, а також поліпшення популяційного здоров'я, зростання культурних і духовних потреб людини урбанізація є неминучою. Це



історичне соціальне явище зумовлене ростом і розселенням людської популяції. В Україні високий рівень індустріалізації спричинив значний ступінь урбанізації – 8,95% території (Рудишин, 2013). Оскільки індустріалізація та урбанізація – явища соціальні, їх чинники й закономірності створюють конфліктну ситуацію між природною гармонією біосфери і запитами людини соціальної. Міста є рукотворними результатами суспільного розвитку, проте вмонтовуються, як підсистеми в глобальну екосистему – біогеосферу, змінюючи структуру і властивості елементарних нативних екосистем – від консорційних до ландшафтних.

Сучасний великий урбаністичний утвір – це, як правило, низка індустріальних чи інших підприємств і мережа поселень з єдиною інфраструктурою. Тому *урбосистема* (Y_C), за декомпозиції на першому рівні її на підсистеми, є функцією трьох основних компонентів. Формально її можна представити у вигляді залежності:

$$Y_C = Y_C (P_C, C_C, T_C),$$

де: P_C – природна підсистема (в минулому ландшафтна екосистема, а тепер урбоекосистема); C_C – соціальна підсистема (людський соціум); T_C – технологічна підсистема (забудови, виробничі системи, комунікації тощо). На детальнішому другому рівні декомпозиції функціональна формула урбосистеми має значно складніший вигляд, адже кожна з трьох структур має дуже розгалужену будову й особливості функціонування вже на перших підрівнях їх розчленування. Головне, кожна з трьох підсистем має окрему надмету й цілі свого існування, які ніяк не узгоджуються з реалізацією мети двох інших.

Урбосистеми свого часу стали об'єктом вивчення урбоекології (за Кучерявим, 2024), екології міста й інших дисциплін. Предметом їх вивчення претендували стати надскладні закономірності формування стану навколишнього міського середовища з огляду на безпеку й комфорт

Цілком слушними щодо природи урбосистем є міркування Ю. Одума (1986). Взявши методологічний підхід екології, він розглядає місто як неповночленну (з пригніченим автотрофним компонентом) екосистему, більше подібну до гетеротрофної. Така екосистема за Ю. Одумом є реципієнтом енергії, речовин (у вигляді продуктів, матеріалів, води, живих об'єктів і людей) та інформації зі свого зовнішнього середовища. Потреба 1 м^2 міста в енергії становить приблизно 4000 ккал за добу. Щоби стабільно годувати місто з населенням в 1 млн осіб, необхідно приблизно 0,8 млн га землі, а поїти й умити – 7,6 млрд. л води. За такої концепції Ю. Одума місто є "паразитом біосфери", "паразитом свого сільського оточення", проте воно могло би стати "симбіонтом" відносно свого довкілля, оскільки продукує на зовні товари й послуги тощо, збагачуючи усіма ними сільське оточення взамін на імпортовані товари й послуги.



Деякі вчені не вважають людину і людське суспільство (соціопідсистему) компонентом урбосистем. Інші вбачають у цьому риси біологізаторства. Але вибору тут особливого немає. Речовинно-енергетичні й інформаційні обміни між урбаністичними підсистемами потрібно науково пояснювати й вивчати для гармонізації взаємовідношень. За ігнорування таких проблем людство у результаті стихійної урбанізації самознищиться у продуктах своєї виробничої та соціальної діяльності, як спиртові дріжджі у діжці забродженого зрілого вина. За прикладами слід звернутися до середньовічних міст, у яких лютували епідемії, і одна із них – епідемія бубонної чуми у XIV ст., що за оцінками істориків, майже у двічі зменшила чисельність людської популяції у Старому світі, а в Європі – на 60%.

Формалізуючи символічну модель міста на початку розділу (див. підрозд. 15.1 – ст. 293), ми вказуємо на техносистеми, як невід'ємні частини урбосистем. Вони виникли одночасно з урбосистемами й постійно ускладнювалися, удосконалювалися людиною і чинили щораз сильніший вплив на довкілля та екосистеми. Аналогічну символічну модель можна відобразити для технологічних систем (T_C), що існують у самому місті або за його межами. Вона має такий вигляд:

$$T_C = T_C (Ж_C, K_C, B_C, O_K_C, P_C, ?_C, \dots),$$

де: $Ж_C$ – система житлової забудови; K_C – системи різних транспортних комунікацій (дороги, громадський транспорт, водо-, енергопостачання, зв'язок, каналізація); B_C – виробничі системи (підприємства промисловості, побутового обслуговування тощо); O_K_C – освітньо-культурна мережа; P_C – рекреаційна мережа; $?_C$ – різні специфічні техносистеми, властиві для окремих міст. Подальша декомпозиція кожної складової техносистем дозволяє бачити її будову та функції, виявити способи й ланки взаємовідношення їх із іншими системами, у т. ч. соціумом і популяційними чи іншими екосистемами конкретного ландшафту.

Зауважимо, що ця символічна модель має таку ж змістовну суть, як і попередня, якщо "урбо-" вважати житловими (селітебними) зонами.

Технологічні системи у своїй структурі мають технічні підсистеми (машини, апарати та прилади, а також їх комплекси).



Технічна система – це штучно сконструйована сукупність технічних елементів і відношень (зв'язків) між ними, які утворюють цілісну структуру з емерджентними властивостями, що не зводяться до властивостей елементів, і призначена для виконання якісно нових корисних функцій.

Сукупність технічних систем та їх комплексів, сировини, матеріалів і предметів виробництва, перероблення чи транспортування, а також опе-



раторів процесів (люди, автомати чи їх поєднання), програмне забезпечення утворюють технологічну систему. Вона забезпечує виробництво певної продукції чи надання технічних послуг.



Технологічна система – це сукупність функціонально пов'язаних засобів технічного обладнання, предметів виробництва й виконавців для виконання в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів та операцій.

В екології та охороні довкілля ключове питання: як техносистеми впливають на фізичні компоненти чи якість довкілля загалом, екосистеми і, зрештою, саму людину як живу систему? Для цього потрібна спеціальна класифікація техносистем, яка б упорядковувала наші уявлення про суть техносистеми, її безпеку чи небезпеку для довкілля, про динаміку функціонування, способи створення, існування, ліквідації (самоліквідації).

У літературі не знаходимо фундаментальних розробок для вирішення цієї проблеми, тому пропонуємо екоцентричний підхід до класифікації техносистем.

Отже, з позиції екології та захисту довкілля, пропонуємо вважати, що:



Техносистеми – це штучно створене поєднання рукотворних і природних компонентів, основою яких є інженерно-технічні утвори та їхні функції, а довкілля і живі підсистеми (на рівнях організації від окремого організму до цілісної ландшафтної екосистеми) є підпорядкованими і другорядними, з котрими ці техносистеми й у взаємовідношеннях із навколишнім середовищем проявляють себе як реципієнтні (паразитарні) системи, є відносно стійким і самопідтримуваним елементами довкілля виключно завдяки технологічному керуванню людини.

Низка вчених вважає, що природні системи і техносистеми утворюють техноекосистеми, які є цілісними, впорядкованими в просторово-часовому відношенні сукупностями природних і техногенних елементів, що функціонують як єдині системи. Іншими словами, ігноруючи біоцентризм екосистем і виставляючи на перший план системотвірну роль людини (антропогенний чинник), можна сприймати, що:



Техноекосистеми – це сукупність форм і станів взаємодії компонентів природного середовища з інже-



нерними об'єктами та системами на всіх стадіях їх функціонування.

За такого підходу всю територію України, чи іншої держави, можна розглядати як єдину *політехноекосистему*, що збудована із множин техноекосистем як регіонального, так і місцевого рівня. На основі такого підходу, залежно від панівного виду господарської діяльності, виокремлюють такі типи техноекосистем: лісова, аграрна, сельбищна, гірничопромислова, промислова, будівельна, транспортно-комунікаційна, водогосподарська, рекреаційна тощо (Копач та ін., 2013).

Техносистеми, не зважаючи на всі передбачення у фазі їх проектування, все ж мають більший чи менший, позитивний чи негативний вплив на довкілля, ландшафт, людину.

Проте, не менш важливим є врахування ймовірного впливу екосистем, особливо їх біотичного компонента – живих організмів, на техносистеми. Прикладами такого негативного впливу є загрози від збільшення популяцій пацюків та інших гризунів у мережі каналізаційних та інших комунікацій у містах, на великих суднах, складах тощо. Пацюки навіть пошкоджують кабелі електромереж та зв'язку. Птахи загрожують авіалайнерам. Мікробіота "псує" воду у мережах водопостачання, водонагрівних бойлерах, інфікує повітря від неочищених кондиціонерів. Морські гідробіоти, прилипаючи до днища суден, зменшують їх швидкохідність.

Не зупиняючись на специфічних взаємовідношеннях техносистем з екосистемами та природним довкіллям, різнобічні аспекти яких вивчає дисципліна – *техноекологія* (галузеві – будівельна, гірнична, комунальна й інші екології), перейдемо до оцінки синергетичного впливу урбосистем на займані ними ландшафти, середовище і людину.



14.1. Токсини і біоактивні речовини рослин як засоби самозахисту та імунітету

Велика кількість рослин умовно виокремлена в групу так званих отруйних рослин. Ці рослини містять значну концентрацію рослинних токсинів, які, потрапивши в організм тварин і людини, спричиняють отруєння. Більшість отруйних рослин є водночас лікарськими та джерелом сировини для отримання біоактивних речовин (БАР), лікарських препаратів, інсектицидів тощо. До тепер відомо понад 10 тис. видів отруйних рослин, поширених по всій земній кулі. В тропіках і субтропіках їхня кількість більша, а токсичність сильніша.

Чому рослини містять токсичні сполуки?

Фітотоксини – це синтезовані рослинами сполуки, які, здебільшого, призначені для самозахисту від травоядних тварин. У процесі еволюції рослини набули численних захисних пристосувань, зокрема таких, як гіркий чи кислий смак фітомаси, різкий неприємний запах, накопичення надмірної кількості репелентних, їдких, в'язких речовин, отруйного соку тощо. Рослини також нерідко використовують кінцеві продукти свого метаболізму для хімічного захисту від поїдання їх тваринами. Наприклад, представники родів щавлевих (*Rumex* L.), кислицевих (*Oxalis* L.) і ревеневих (*Rheum* L.) накопичують у листках до 1,3% щавлевої кислоти й оксалатів, які призводять до глибокого порушення обміну речовин в організмі травоядних.

Хімічна захищеність (як головне із пристосувань рослин) зумовлена синтезуванням таких природних сполук, як ефірні олії, глікозиди, алкалоїди, глікоалкалоїди, сапоніни, антибіотики, фітонциди, смоли, бальзами, деякі кислоти та їх солі, таніни тощо. Більшість із них у тих чи інших кількостях спричиняє різноманітні специфічні патологічні зміни у структурі й функціях клітин, тканин, органів людини і тварин. Утім, у рослин присутні складні комплекси БАР різної природи й біологічної дії. Нерідко відбувається сумація чи антагонізм ефектів, властивих кожній речовині

окремо. В окремих випадках одні речовини можуть сенсibilізувати організм до впливу інших. Наприклад, тіоглікозиди, сапоніни і деякі алкалоїди подразнюють ШКТ, що сприяє інтенсивному всмоктуванню інших токсинів. Діючі речовини їстівних грибів роду гнойовик (*Coprinus*) не розчинні у шлунково-кишковому середовищі, але розчиняються в алкоголі й спричиняють отруєння тільки в разі споживання спиртного перед їжею. Деякі токсини харчових та лікарських рослин (Воронов, 2010; Лойт, 2006) (наприклад, ефедри, орляка, пікульників, наперстянок), умовно їстівних грибів з анатоксинами (представники родів *Amanita*, *Chlorophyllum*, *Galerina*, *Lepiota*) після кількаразового чи тривалого вживання кумулюють, що призводить до стійких і тривалих розладів багатьох систем організму.

Найдосконалішим і дієвим механізмом самозахисту рослин вважається дистанційний (попереджувальний) "хімічний удар". Коли фітотоксини виділяються у довколишнє середовище, вони діють на упередження – до того, як рослині завдані пошкодження. Наприклад, так може статися запалення шкіри траводіних ефірними виділеннями ясенців, токсинами сумаху їдконого, токсикодендрону, багна звичайного. Отруєння трапляються здебільшого теплої пори року, в спекотливі дні, після дощу. Місцева дія токсинів на шкіру й слизові оболонки спричиняється часто під час контакту з отруйними рослинами. Наприклад, капсаїциноїди плодів стручкового перцю сильно подразнюють слизові оболонки, жалкі волоски кропиви дводомної містять мурашину кислоту, уртицин, гістамін, які спричиняють дерматит. Інколи місцеве ураження призводить до загальної інтоксикації внаслідок високої всмоктуваності хімічних сполук. Наприклад, дафніїн і мезереїн вовчого лика спричиняють опіки шкіри, виникнення судом.

Деякі отруйні рослини підвищують чутливість шкіри до ультрафіолетового чи й до більш довгохвильового випромінювання, спричиняють гіперпигментацію, опіки шкіри. Такий фотосенсibilізувальний ефект виявляється при зовнішньому впливі фурокумаринів псоралеї, борщівника, амі великої, пастернака посівного, смоковниці звичайної, а також при внутрішньому вживанні трави звіробою, якірців і при поїданні тваринами гречки, проса, конюшини тощо. Найуразливіші люди і тварини з індивідуальною чутливістю, білотілі, блондини й альбіноси.

Утворення й кількісний вміст токсинів в отруйних рослинах може змінюватися залежно від географічного розташування, місцеоселення, умов природного середовища: клімату, ґрунту, вологості, освітлення тощо. Рослини, які вирощують в умовах дефіциту вологи, містять більшу кількість токсичних нітратів, ціанідів. Процеси накопичення алкалоїдів у пасльонових інтенсивніші вночі, ефірні олії накопичуються на яскравому світлі. Вирощувані отруйні рослини із південних зон на півночі токсич-

ність втрачають. Також кількісний вміст, а частково й хімічний склад токсинів рослин залежать від пори року, фази розвитку, стадії онтогенезу. У період зимового спокою максимум токсинів містять підземні органи. У чемериці найотрутіші перші паростки, у маку, гірчиці, крушини ламкої – нестиглі плоди. В окремих злаків і бобових молоді паростки насичені ціаногенними речовинами. Фітотоксини бувають розподілені по всіх тканинах рослинних органів рівномірно чи локалізовані у спеціалізованих структурах.

Відомі отруйні медоноси з отруйним нектаром або квітковим пилком, наявність яких надає меду токсичності, може спричиняти лихоманку, нудоту, блювання, діарею. Такі властивості мають роди азалія, багно, рододендрон, хамедафна, лавровишня, вовче лико, чемериця, жовтець, блекота, дурман, беладона, тютюн, авран, анабазис, вороняче око, зірчатка, аконіт, олеандр тощо. Буває, що деякі частини отруйних рослин неотруйні. Наприклад, бульби картоплі, принасінник тису, насіння маку снодійного не є отруйними, хоча інші частини цих видів токсичні.

Найнебезпечніші свіжі отруйні рослини. Після висушування, термічної обробки чи при силосуванні токсичні властивості рослин або не втрачаються, або зменшуються, зрідка зовсім зникають. Отруєння рослинами виникають здебільшого як харчові, або аліментарні, що мають загальнорезорбтивні ознаки.

До фітотоксинів належить також група речовин, об'єднаних загальною назвою **фітоалексини**. Це особливі антибіотики, що утворюються тільки у вищих рослинах. До фітотоксинів належать низькомолекулярні сполуки, які розглянемо нижче.

Синильна кислота (або ціаністий водень – CNS) міститься в рослинах як у вільному виді (наприклад, у насінні яванського дерева), так і складі ціаногенних глікозидів, з яких вона вивільняється в процесі ферментативного гідролізу, при ушкодженні рослинних клітин фітофагами. До кола таких глікозидів належать амігдалін, що міститься в гіркому мигдалі, ядрах кісточок абрикосу, вишні, персика, яблук і в рангунській квасолі.

Кавова кислота, міститься в болиголові, смолі хвойних дерев.

Саліцилова кислота, міститься в коріннях сенегі.

Галова кислота, одна з найпоширеніших рослинних кислот, утримується в різних видах сумаху, дубовій корі, коріннях гранатового дерева

Піперінова кислота, є основним алкалоїдом перцю.

Монофторооцтова кислота синтезується дуже отруйною південноафриканською рослиною – *Dicbapetalum cymosum*.

Мурашина кислота, міститься в кропиві, хвої ялини, у фруктах.

Цикутотоксин і енантотоксин за хімічною структурою є отрути є ацетиленовими діодами та виробляються цикутою й лабазником Останній за свою токсичність ще в давнину називали п'ятипалою смертю.

Гіперіцин є поліциклічним хіноном і міститься у звіробії.

Тимол (компонент багатьох ефірних масел) має сильні бактерицидні властивості.

Загальне групування лікарських видів передбачає три категорії небезпечної дії фітотоксинів на тваринний і людський організм. За цими категоріями рослини можуть бути **дуже отруйні** (найвищий ступінь токсичності), **смертельно отруйні** (середній ступінь), **безумовно отруйні** (низький ступінь токсичності).

Перелік родів і лікарських видів, що належать до отруйних (*****дуже отруйні, **смертельно отруйні, *безумовно отруйні**), наводимо нижче.

*****)** Арум плямистий – *Arum maculatum* L., Бруслина бородавчаста – *Euonymus europaea* L., Рокитник звичайний – *Cytisus scoparius* L., Наперстянки – *Digitalis* L., Образки болотні – *Calla palustris* L., Паслін солодко-гіркий – *Solanum dulcamara* L., Переступень – *Bryonia* L., Рододендрон – *Rhododendron* L., Тис ягідний – *Taxus baccata* L.

****)** Аконіт – *Aconitum* L., Блекота чорна – *Hyoscyamus niger* L., Болиголов плямистий – *Conium maculatum* L., Вовчі ягоди – *Daphne* L., Дурман звичайний – *Datura stramonium* L., Д. індійський – *D. innoxia* Mill., Беладона звичайна – *Atropa belladonna* L., Пізньоцвіт осінній – *Colchicum autumnale* L., Рицина звичайна – *Ricinus communis* L., Сумах – *Rhus* L., Тимелея звичайна – *Thymelaea passerina* (L.) Coss. Ex Germ., Туя – *Thuja* L., Цикута отруйна – *Cicuta virosa* L., Ялівець звичайний – *Juniperus communis* L., Я. казацький – *J. sabina* L.

***)** Анемона – *Anemone* L., Бирючина звичайна – *Ligustrum vulgare* L., Бузина чорна – *S. nigra* L., Гліцинія – *Wisteria* Nutt., Дрік – *Genista* L., Жимолость – *Lonicera* L., Жовтець – *Ranunculus* L., Конвалія звичайна – *Convallaria majalis* L., Ломиніс – *Clematis* L., Плющ – *Hedera* L., Саротамнус віниковий – *Sarothamnus scoparius* (L.) Koch., Адоніс весняний (горицвіт весняний) – *Adonis vernalis* L. та ін. види, Алое – *Aloe* L., Амброзія полинолиста – *Ambrosia artemisifolia* L., Амі велика – *Ammi majus* L., Аралія маньчжурська – *Aralia mandshurica* Rupr. et Maxim., Арека катеку (бетельна пальма) – *Areca catechu* L., Арніка – *Arnica* L., Багно звичайне – *Ledum palustre* L., Барвінок малий – *Vinca minor* L., Б. великий – *V. major* L., Бобівник трилистий – *Menyanthes trifoliata* L., Борщівник Сосновського – *Heracleum sosnowskyi* Manden., Буркун жовтий – *Melilotus officinalis* (L.) Pall., Васильки справжні – *Ocimum basilicum* L., Рапонтікум (маралій корінь) – *Rhaponticum carthamoides* (Willd.) Iljin., Вороняче око звичайне – *Paris quadrifolia* L., Гармала звичайна – *Peganum harmala* L., Гіркокаштан звичайний – *Aesculus hippocastanum* L., Гірчак перцевий – *Polygonum hydropiper* L., Г. почечуйний – *P. persicaria* L., Гірчиця біла – *Sinapis alba* L., Г. сарептська (сиза) – *Brassica juncea* (L.) Czern. (*Sinapis juncea* L.), Г. чорна – *B. nigra* (L.) Koch. (*S. nigra* L.), Гісоп лікарський – *Hyssopus officinalis* L.,

Гледичія триколючкова – *Gleditsia triacanthos* L., Глечики жовті – *Nuphar lutea* (L.) Smith., Головатень звичайний (руський) – *Echinops ritro* L. (*E. ruthenicus* M.B.), Г. шароголовий – *E. sphaerocephalus* L., Гранат звичайний – *Punica granatum* L., Дельфіній – *Delphinium* L., Деревій благородний – *Achillea nobilis* L., Діоскорея (ямс) – *Dioscorea* L., Елеутерокок колючий – *Eleutherococcus senticosus* (Rupr. et Maxim.) Maxim., Ефедра – *Ephedra* L., Женьшень – *Panax ginseng* C. A. Mey., Живокіст лікарський – *Symphytum officinale* L., Жовтозілля – *Senecio* L., Жовтушник сіруватий (розлогий) – *Erysimum diffusum* Ehrh., Ж. лакфіолевидний – *E. cheiranthoides* L., Жостір проносний – *Rhamnus cathartica* L., Заманиха висока – *Echinopanax elatum* Nakai., Звіробій звичайний – *Hypericum perforatum* L., З. плямистий – *H. maculatum* Crantz., Іпекакуана (блювотний корінь) – *Cephaelis ipecacuanha* Willd., Кавове дерево аравійське – *Coffea arabica* L., Картопля – *Solanum tuberosum* L., Барвінок рожевий (катарантус рожевий) – *Catharantus roseus* (L.) G. Don., Кокаїновий кущ – *Erythroxylon coca* Lam., Кола загострена – *Cola acuminata* Schott et Endl., Коноплі – *Cannabis* L., Копитняк європейський – *Asarum europaeum* L., Крушина ламка – *Frangula alnus* Mill., Купина – *Polygonatum* L., Лавровишня – *Laurocerasus officinalis* Roem., Латаття біле – *Nymphaea alba* L., Лимонник китайський – *Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill., Проліска (морська цибуля) – *Scilla maritima* (Torn.) L., Льонок звичайний – *Linaria vulgaris* Mill., Мак – *Papaver* L., Макля дрібнопліда – *Macleaya microcarpa* (Maxim.) Fedde., Материнка звичайна – *Origanum vulgare* L., Мачок жовтий – *Glaucium flavum* Crantz., Мигдаль звичайний – *Amygdalus communis* L., Мильнянка лікарська – *Saponaria officinalis* L., Молочай – *Euphorbia* L., Обвійник грецький – *Periploca graeca* L., Олеандр індійський – *Nerium oleander* L., Омела біла – *Viscum album* L., Осока парвська – *Carex brevicollis* DC., Папороть чоловіча – *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott., Страстоцвіт м'ясо-червоний – *Passiflora incarnata* L., Паслін часточковий – *Solanum laciniatum* Ait., П. чорний – *S. nigrum* L., Пастернак посівний – *Pastinaca sativa* L., Перець стручковий однорічний – *Capsicum annuum* L., Перець чорний – *Piper nigrum* L., Печіночниця звичайна – *Hepatica nobilis* Garsanet., Пижмо звичайне – *Tanacetum vulgare* L. (*Chrysanthemum tanacetum* vis.), Півники жовті – *Iris flavum* L., Півонія незвичайна – *Paeonia officinalis* L., Підмаренник справжній – *Galium verum* L., Маруна червона – *Pyrethrum coccineum* L., Плаун баранець – *Lycopodium selago* (L.) Bernch. ex Schrank et Mert., Полин цитварний (сантонінський) – *Artemisia cina* Berg., Примула – *Primula* L., Псоралея – *Psoralea* L., Раувольфія зміїна – *Rauwolfia serpentina* Benth, Рута – *Ruta* L., Рутвиця мала – *Thalictrum minus* L., Р. смердюча – *Th. foetidum* L., Секуринегі напівчагарникова – *Securinega suffruticosa* (Pall.) Rehd., Скополія – *Scopolia* L., Смоковниця звичайна (інжир) – *Ficus carica* L., Софора – *Sophora* L., Гірчак звичайний – *Polygonum aviculare* L., Стефанія гладка – *Stephania*

glabra (Boxb) Miers., Строфант – *Strophantus* L., Сферофіза солонцева – *Sphaerophysa salsula* (Pall.) DC., Термопсис ланцетолистий – *Thermopsis lanceolata* L., Тирлич – *Gentiana* L., Тютюн – *Nicotiana* L., Унгернія – *Ungernia* L., Фізостигма отруйна – *Physostigma venenosum* Bulf., Хінне дерево – *Cinchona succirubra* L., Хміль звичайний – *Humulus lupulus* L., Хрін звичайний – *Armoracia rusticana* Gaertn., Mey. et Scherb., Циміцифуга (клопогін) – *Cimicifuga* L., Чемериця Лобеля (біла) – *Veratrum lobelianum* Bernh., Чемерник – *Helleborus* L., Чилібуха отруйна (блювотний горіх) – *Strychnos nux vomica* L., Чистотіл звичайний – *Chelidonium majus* L., Шавлія лікарська – *Salvia officinalis* L., Якірці сланкі – *Tribulus terrestris* L., Ясенець – *Dictamnus* L.

Багато рослин (у т.ч. й нижчі) виділяють леткі токсини – **фітонциди**. Вони утворюються в результаті автолізу й окислення речовин в убитих і подрібнених клітинах і, очевидно є захисним пристосуванням проти інфекційного ураження механічно ушкоджених і цілих тканин. Еволюційно рослини так адаптувалися, що фітонцидами вони захищають самі себе і своє довкілля, а тому незрівнянно менше, ніж тварини уражуються бактеріальним захворюваннями.

До складу фітонцидів, природа яких в більшості випадків ще невідома, входять різні речовини: альдегіди, окислені фенольні сполуки (хінони), синільна кислота, глікозиди, лактони кислот та ін. Антимікробні властивості фітонцидів зумовлені вмістом у їхньому складі терпенів й альдегідів, а також кумаринами, які володіють ще й мутагенною активністю, а також деякими іншими сполуками.

Так, сосна і ялина виділяють 5–16% терпенів від їхнього змісту в хвої. При цьому найпродуктивніша хвоя верхньої частини крони. Один гектар соснового лісу виділяє за добу 5 кг антимікробних токсинів (або до 450 кг/рік, у т.ч., 10 кг – антитуберкульозних), або майже 5 кг/добу. Один гектар ялівцевого насадження виділяє до 30 кг/добу. Цієї кількості цілком вистачило би для оздоровлення повітря у великому місті, Проте ялівець зазнає пригнічення від загазованості і втрачає свої антисептичні властивості. Загальна кількість фітонцидів, яку виділяє упродовж року ялиновий ліс, становить 320–415 кг/га, березовий – 190–220 кг/га. У середньому широколистяний ліс щодоби упродовж теплого періоду може виділити 2 кг фітонцидів.

Завдяки антимікробним властивостям фітонцидів у 1 м³ лісового повітря може міститися не більше 500 патогенних бактерій. Це така ж щільність патогенів, яка прийнята за максимальний допустимий рівень в операційних приміщеннях лікарень. Усього 2 м³ фітонцидів здатні очистити від хвороботворних мікробів кілька сотень кубічних метрів повітря.

Фітонциди дуба, черемшини й жасмину вбивають деякі мікроорганізми упродовж 5–6 хв., а берези, тополі й клена – упродовж 20–25 хв. Леткі виді-

лення бруньок тополі знищують вірус грипу, листків дуба й тополі – збудників дифтерії, листків сосни – палички туберкульозу.

Присутність у повітрі формальдегіду найбільше властиве для модринових лісів, хоча він поширений і в інших хвойних лісах. Цей фітонцид з'являється в повітрі під час масового відростання хвої у модрини і сягає максимуму по завершенні формування зеленої фітомаси.

Найбільша концентрація кумаринів у повітрі встановлюється у період найактивнішого росту або цвітіння рослин, а також у період листопаду й розкладу листяного опаду, тобто в літньо-осінній період. Найбільше альдегідів утримується в повітрі березового ($49,2 \text{ мкг/м}^3$), ялинового ($30,2 \text{ мкг/м}^3$) і соснового ($36,9 \text{ мкг/м}^3$) лісів. Виділення летких токсинів рослинами має не тільки сезонну, а й добову динаміку: мінімальним воно буває в ранкові години, а максимальним – удень.

Фітонциди деяких трав (полін, пижмо, буркун та ін.) здатні відлякувати комах-шкідників листків і деревини.

Серед фітонцидів чимало сполук, що належать до похідних терпенів. До їхнього числа зараховують і широко розповсюджений у рослинному світі тритерпеноїд – сапонін. Цей токсин має різнобічний механізм дії на організми, однією з найважливіших сторін якого є вплив при світлі на спектральні властивості фітохрому. Це блакитний пігмент рослин, що належить до групи складних білків – хромопротеїдів. Він бере участь у багатьох фізіологічних процесах: у фоторегуляції проростання насіння, цвітіння, контролює синтез біополімерів, деяких найважливіших фотосинтетичних пігментів, впливає на проникність мембран клітин тощо.

Плоди анісу й кропу, листки м'яти й шавлії, квітки ромашки аптечної багаті пекучими ефірними маслами, токсичними для більшості мікроорганізмів і вищих рослин. Особливо сильною бактерицидною властивістю володіє тимол – компонент багатьох рослинних ефірних масел.

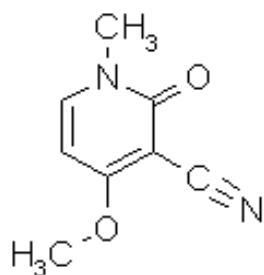
У низки вищих рослин активність токсинів змінюється залежно від сезону й умов вирощування. Наприклад, хінне дерево, культивоване в оранжереї, втрачає свої токсичні властивості. М'ята, що росте поруч із дурманом, знижує зміст алкалоїдів у ньому майже в 2 рази. Козлятник, навпаки, збільшує вміст алкалоїдів у беладони, коли росте поруч із нею.

Деякі рослини отруйні лише в певний період їхнього життя. Так, панагос кормовий (родина Селера), широко розповсюджений у горах Середньої Азії, отруйний тільки до плодоношення (тобто навесні й початку літа). Єгипетський лотос – хліб древніх єгиптян, містить токсини у сім'ядолях і молодих листках. Проте у міру росту листки лотоса втрачають токсичність.

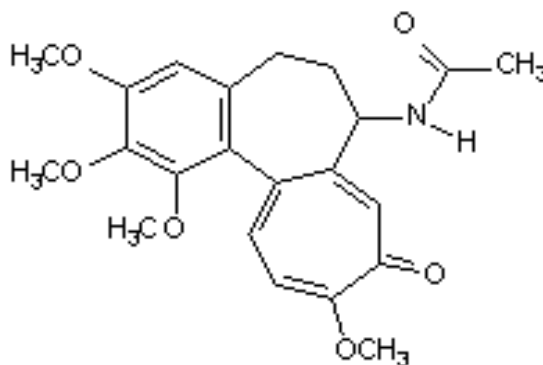


Алкалоїди – азотвмістні органічні основи, що утворюються в ході білкового обміну, а також в інших ланках метаболізму.

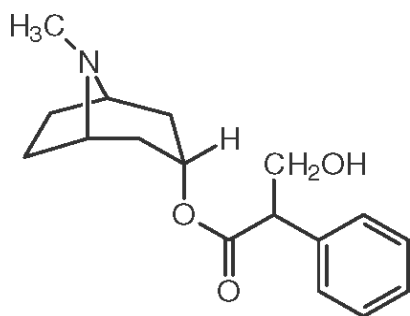
Більша їх частина є третинними аміноосновами, менша – вторинні, а деякі – четвертинні амонійні основи. Багато алкалоїдів, окрім азоту, вуглецю, водню, містять кисень. Останній є присутнім у вигляді гідроксильних, метоксильних, складноефірних, лактонних і карбонних груп (рис. 14.1).



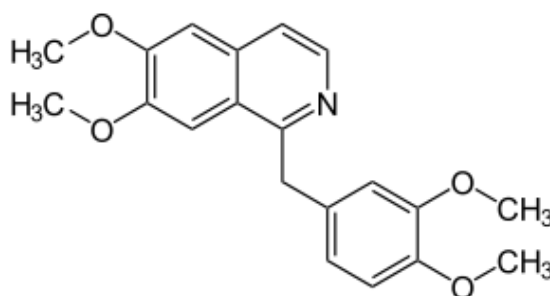
Рицин



Колхіцин



Атропін



Папаверин

Рис. 14.1. Структура алкалоїдів

Алкалоїди отримали таку назву від арабського слова "алкал", що означає луки, оскільки найраніше їх виявили у рослинах лук і пасовищ. З усіх рослинних метаболітів алкалоїди квіткових рослин вважають найбільш біоактивними токсинами. Алкалоїди виробляють вищі, в основному квіткові рослини. У нижчих рослин, мохів і папоротеподібних алкалоїди як правило відсутні. У хвощів і плаунів виявлені алкалоїдовмістні види, але токсини плаунів вважають псевдоалкалоїдами. У голонасінних алкалоїди відомі лише у тиса й ефедрових.

Алкалоїди, потрапивши в організм, мають великий вплив на нервову систему людини і тварин, можуть спричинити важкі отруєння. У малих дозах і за вмілого застосування алкалоїди мають лікувальну дію. Вплив цих біоактивних сполук на живий організм різноманітний.



У рослинах алкалоїди за рідкісним винятком містяться у формі солей з органічними, рідше з мінеральними кислотами. Вміст їх залежить від місця росту, пори року і низки інших причин, тобто він може коливатися. Концентрація алкалоїдів у рослинах, зазвичай, невелика і змінюється у межах від 0,2 до 2%. Алкалоїди є в різних частинах алкалоїдовмісних рослин (корені, стебла, плоди, листки). Особливо багаті алкалоїдами родини пасльонових, макових, жовтецевих та ін.



Соланін – глікоалкалоїд або азотовмісний глікозид, який утворюється в молодих, пророслих бульбах картоплі, в її плодах і паростках, а також у багатьох рослин родини пасльонових.

Кількість соланіну в картоплі залежить від місцевості і клімату, де вона вирощена. У теплих зонах картопля багатша соланіном, порівняно з картоплею, вирощеною у регіонах із помірним кліматом. Світло і сонячні промені сприяють накопиченню соланіну в картоплі. У стебельцях пророслої картоплі з'являється водорозчинний соланін, причому в основі паростків його утримується більше, ніж у середині. Картопля, що містить соланіну 20 мг-% і більше, токсична для людини і тварин, тому варто враховувати ряд умов при згодовуванні пророслої картоплі, бадилля картоплі і помідорів та інших пасльонових.

Сапоніни – доволі поширені отруйні речовини. Вони є безазотистими, аморфними органічними сполуками рослинного походження, володіють пекучим, гірким або гіркувато-солодким смаком. Сапоніни містяться в усіх органах рослин (бульбах, коренях і насінні). Вміст сапонінів у рослинах коливається від слідів до 30–40% (наприклад, у насінні куколю їх міститься близько 6,5%). Сапоніни поділяються на дві групи: кислу і нейтральну. У кожній групі трапляються спиртові і водорозчинні (водяні розчини сильно піняться). Всі сапоніни токсичні як для теплокровних тварин, так і для риб.

Часто трапляються отруєння насінням куколю (*Agrostemma githago*). Смертельні дози: для свиней – 2 г, для птахів – 2,5 г, для телят – 5 г на 1 кг маси тварини, у меленому виді доза в декілька разів менша. Допускаються домішки насіння куколю до 1% у зернофуражі другої групи (тобто фуражі, що згодовують з обмеженнями і під спостереженням ветеринарних працівників).

Рослини містять отруйні сполуки під загальною назвою **глікозиди**, які широко розповсюджені в природі. Ці токсини специфічно і вибірково діють на серцевий м'яз. Вплив їх проявляється з різною швидкістю, силою і тривалістю. Кількість глікозидів в рослинах коливається від 0,3 до 3% і залежить від фази вегетації. Особливо часто отруєння глікозидами відбуваються ранньою весною.

Глікозиди – це тверді, переважно кристалічні, рідше аморфні (без кристалічної будови) сполуки. Лише деякі з них бувають забарвлені. В

більшості випадків вони розчинні у воді. На смак – це переважно гіркі речовини, які зумовлюють гіркий смак рослин. Особливу групу глікозидів складають сапоніни (сапонін-глікозиди). Вони так само як і глікозиди, розпадаються на цукристу і нецукристу частини – сапогенін.

Гірчичні олії у надмірній кількості спричиняють отруєння. Часто трапляються отруєння тварин зерновими відходами і сіном, у яких є домішки польової гірчиці, гірчичними шротами та іншими хрестоцвітими рослинами. Найбільше схильні до отруєнь гірчицею коні і ВРХ.

14.2. Забруднення довкілля та екотоксиканти

Господарська діяльність, що призводить до зміни хімічного складу будь-якого природного компонента довкілля, є за своєю сутністю геохімічною, за охоплення ще й біотичних компонентів – біогеохімічною. Техногенне втручання у природний хімічний склад чи то повітря, чи води, ґрунтів, літосфери, або живої речовини, неминуче, з більшою або меншою швидкістю передається від одного середовища до іншого в процесі їхніх ековзаємовідношень і взаємоперетворень. Тому, із усталених геохімічних та екологічних позицій зміну хімічних властивостей довкілля, пов'язану з господарською діяльністю та іншими антропогенними процесами, розцінюють як забруднення (Гнатів та ін., 2010; 2008; 2006).

З екотоксикологічних позицій під **забрудненням** розуміють будь-які зміни складу повітря, вод, ґрунтів і харчових продуктів, що створюють ризик хронічного чи гострого отруєння, або спричиняють небажаний довготривалий вплив на здоров'я та діяльність людини. Такі ж негативні наслідки цілком очікувані і стосовно інших живих істот.

Шкодочинність або й токсичність забруднювальних речовин визначають три чинники. Перший чинник – це їхня хімічна природа (активність, доступність тощо), тобто наскільки елементи, сполуки або речовини активно вступають у хімічні взаємодії, розчиняються і мігрують у середовищах поширення. Другий – це концентрація, або вміст на одиницю об'єму чи маси повітря, води, ґрунту тощо. Третій чинник – стійкість агента, тобто тривалість його існування в активному стані у повітрі, воді, ґрунті й інших середовищах.

Забруднення з екотоксичними наслідками, що виникають в результаті господарської діяльності людини, узагальнено називають антропогенними. Їх розділяють на **промислові** (від окремих підприємств чи галузей промисловості), **сільськогосподарські** (від внесення добрив, використання отрутохімikatів, безгосподарне скидання відходів тваринництва тощо), **військові** (військова промисловість, військові випробування і бойові дії, наслідки знищення хімічної зброї тощо).



За своєю природою усі забруднення ділять на фізичні, фізико-хімічні, хімічні, біологічні та механічні (Екологічна..., 2006; Гнатів та ін., 2010).



Фізичне забруднення пов'язане зі зміною фізичних властивостей середовища: температури (теплове забруднення); хвильових параметрів (світлове, шумове, електромагнітне забруднення); радіаційних параметрів (радіаційне, радіоактивне забруднення).

Фізико-хімічне забруднення – це аерозольне забруднення повітря дрібнодисперсними рідкими або твердими речовинами (смог, дим).

Проникнення в довкілля хімічних речовин, відсутніх у ньому раніше, або таких, що змінюють природну концентрацію до рівня, який перевищує звичайну норму, класифікують як **хімічне** забруднення. До хімічних належать забруднення важкими металами й іншими токсичними елементами, пестицидами, окремими простими або складними хімічними речовинами.



Біотичне забруднення пов'язане із потраплянням у довкілля і розмноження в природному середовищі небажаних для людини, у т.ч. отруйних організмів. Це може бути також проникнення до природних екосистем "чужих" для їх біоценозу організмів. Особливо небезпечним є забруднення довкілля патогенними мікроорганізмами (Гнатів, 2008).

Засмічення середовища агентами, що роблять його просторові параметри неприродними, мають несприятливу механічну й фізичну дію, є **механічним** забрудненням. Проте, воно практично завжди супроводжується негативними фізико-хімічними ефектами – привнесенням у своєму складі різних ксенобіотиків.

В агроекології об'єктом особливої уваги є елементи, молекули, речовини, що володіють такою властивістю, як біодоступність. Такі агенти здатні взаємодіяти немеханічним способом із живими організмами. Як правило, це елементи чи сполуки, що присутні у середовищі існування організмів у газоподібному або рідкому стані, у формі водних розчинів, адсорбовані на частках ґрунту і різних поверхнях, інколи тверді речовини, але у формі дрібнодисперсного пилу (розміром не більше 50 мкм), нарешті, речовини, що потрапляють в організм з їжею.

За розрахунками фахівців, у природному середовищі знаходиться від 7 до 8,6 млн. хімічних речовин, а їх перелік щорічно поповнюють ще 250 тис. нових сполук. Із багатьох хімічних речовин особливо небезпечні 200: бензол, азбест, бенз(а)пірен, пестициди (ДДТ, елдрин, ліндан та ін.), важкі

метали (особливо ртуть, свинець, кадмій), різноманітні барвники і харчові добавки тощо.

Загалом до переліку екотоксичних забруднювальних агентів довкілля включені забруднювачі повітря – гази: оксиди сірки, азоту й вуглецю; озон; хлор; вуглеводні; фреони; пилові частки: азбест, вугільний пил, кремній, метали. Забруднювач води і ґрунту – це метали, пестициди хлороорганічні (ДДТ, елдрин, диелдрин, хлордан), нітрати, фосфати, нафта і нафтопродукти, органічні розчинники (толуол, бензол, тетрахлоретилен), низькомолекулярні галогеновані вуглеводні (хлороформ, бромдихлорметан, бромформ, тетрахлорметан, дихлоретан), поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), поліхлоровані біфеніли, діоксин, дибензофурані, кислоти.

З усіх нині відомих хімічних речовин і сполук, понад 60 тис. постійно використовує у своїй діяльності людина (табл. 14.1).

Табл. 14.1. Групи речовин, які людина постійно використовує в побуті, харчуванні та господарській діяльності

Групи речовин	Кількість
Різні хімічні сполуки традиційного використання в господарстві й побуті (сполуки, що входять до складу будівельних матеріалів, фарб і барвників, мийних і чистильних, гігієнічних і косметичних засобів тощо)	50 000
Активні компоненти пестицидів та інших препаратів захисту с.-г. рослин	1 500
Активні компоненти та наповнювачі ліків	6 000
Харчові добавки	2 500
Біоактивні добавки, препарати загальнозміцнювальної та профілактичної дії	3 000

Попри велику присутність ксенобіотиків у побуті й середовищі життя людей, основну частку шкідливих хімічних агентів все ж становлять **відходи** різних галузей виробництва. Вони розповсюджені у навколишньому середовищі у формі газів, рідин, твердих частинок. Ці речовини можуть взаємодіяти між собою та з компонентами довкілля, надходити до організму людини з повітрям, водою та харчовими продуктами і, залежно від дози й тривалості надходження, спричинити алергічні реакції, гострі та хронічні отруєння і системні захворювання.

Залежно від походження і шляхів переміщення у довкіллі чужорідні хімічні речовини можна поділити на такі групи:

✓ ксенобіотики промислового походження (органічні розчинники, барвники тощо);



- ✓ важкі метали та інші хімічні елементи, які використовують у промисловому виробництві;
- ✓ агрохімікати й отрутохімікати, що використовують у сільському господарстві (добрива, гербіциди, пестициди, інсектициди);
- ✓ лікарські препарати;
- ✓ побутові хімічні речовини, що використовують як харчові добавки, засоби санітарії, особистої гігієни, косметичні засоби;
- ✓ отрути біологічного походження, які утворюються в організмі тварин, рослин, грибів, у клітинах мікроорганізмів, або за їх розкладання;
- ✓ отруйні речовини масового ураження, засоби хімічної зброї (зарин, іприт, фосген та інші).

Проте, лише екополютант, що накопичився в середовищі в кількості, достатній для спричинення токсичного процесу в біоценозі (на будь-якому рівні організації живої матерії), може бути розглянутий як екотоксикант. Тому, одним із складних практичних завдань екотоксикології є визначення кількісних параметрів, за яких екополютант набуває статусу екотоксиканата (Крамаренко, 2001). У його вирішенні необхідно врахувати, що в реальних умовах на біоценоз діє увесь ксенобіотичний профіль середовища, модифікуючи при цьому біоактивність окремого полютанта, спричиняючи синергетичний ефект. Тому в різних регіонах кількісні параметри трансформації забруднювачів в екотоксиканти є різними.

У регіонах із потужним промисловим виробництвом і щільною урбанізацією, а також інтенсивного аграрного виробництва, відбувається безперервне надходження ксенобіотиків у всі компоненти навколишнього середовища. У складі техногенних і комунальних викидів – сотні неорганічних та органічних хімічних агентів різної концентрації, дисперсності, реактивності, та, врешті решт, токсичності для людини й біоти.

Забруднення мінеральними речовинами зазвичай досліджують за окремими **хімічними елементами**. Від 60-х років XX ст. особливу увагу приділяли групі елементів, уміст яких у природних компонентах менше 0,01% і яку умовно назвали "важкими" металами. До важких металів належать більше 40 елементів із атомною масою понад 50 одиниць: V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Hg, Pb, Bi та ін. Згодом групу доповнили іншими **рідкоземельними (розсіяними)** елементами, яким властиві сильна токсичність, мутагенний і канцерогенний ефекти.

Загалом рідкоземельні (розсіяні), у т.ч. важкі метали, є природними компонентами літосфери і широко розповсюджені в навколишньому середовищі (табл. 14.2).



Табл. 14.2. *Вміст деяких важких металів у компонентах навколишнього середовища та біологічних об'єктах (у частинах на мільйон, ррт)*

Елемент	Гірські породи	Вугілля	Морська вода	Рослини	Тканини тварин
Ванадій	135	40	0,002	0,13–5,0	0,14–2,3
Хром	1,0	60	0,00005	0,3–0,4	0,02–1,3
Кобальт	25	15	0,00027	0,2–5,0	0,3–4,0
Нікель	75	35	0,0045	1,5–36,0	0,4–26,0
Кадмій	0,2	0,26	0,0001	0,1–6,4	0,1–3,0
Ртуть	0,08	–	0,00003	0,02–0,03	0,05–1,0
Свинець	12,5	5	0,00003	1,8–60,0	0,3–35,0

Різноманітні викиди – дими, розсіюваний пил, тверді відходи, стоки, зазвичай містять велику групу елементів. Інтенсивність міграції визначається швидкістю обміну й перерозподілу хімічних елементів між компонентами природного середовища.

Базовим поняттям в екології є **фоновий вміст**, як середній зміст хімічних елементів в природних тілах за результатами дослідження їхньої природної варіації (статистичних параметрів розподілу) (Дмитрук, 2006).



Природний геохімічний фон – це середня величина природної варіації вмісту хімічних елементів у компонентах довкілля, яка сформована до того часу, коли це довкілля зазнало антропогенного забруднення.

Геохімічний фон – поняття первинне, місцеве (локальне, регіональне). Показники концентрації, підраховані за відношенням до геохімічного фону, називають **коефіцієнтами аномальності** (контрастності). Коефіцієнти концентрації (аномальності), підраховані за відношенням до середнього вмісту хімічного елемента в літосфері (кларка), в будь-якій геохімічній системі (грунті, гірській породі, рослинності тощо) або у її таксономічній одиниці (тип ґрунту, тип гірської породи, тип рослинності тощо), називають **кларками концентрації**.

Кларк елемента – це число (у % або г/кг), що виражає середній його вміст у літосфері (чи гідросфері Землі загалом) по відношенню до загальної її маси.

У результаті міграції хімічних елементів по природних транспортних каналах в довкіллі утворюються геохімічні аномалії.



Геохімічна аномалія – ділянка території, в межах якої хоч би в одному з природних тіл, що складають його, статистичні параметри розподілу хімічних елементів достовірно відрізняються від геохімічного фону.

Поява геохімічних аномалій завжди пов'язана з тими або іншими природними і неприродними джерелами дії, що не є обов'язковим компонентом цього типу геологічної структури або ландшафту. Навколо антропогенних джерел забруднення утворюються **антропогенні геохімічні аномалії**. У промислово розвинутих регіонах різних країн вміст деяких важких металів у ґрунтах перевищує фоновий рівень в 30–40 разів, а зони поширення техногенного забруднення в околицях мегаполісів і потужних промислових підприємств сягають 70–80 км. Зоною забруднення зазвичай стають ті частини геохімічної аномалії, в межах яких забруднювальні речовини сягають концентрації, що чинить несприятливий вплив на живі організми.



Локальні аномалії, пов'язані з діяльністю промислових підприємств або транспортних магістралей, накладаються на регіональний агротехногенний фон, який змінюється залежно від ступеня хімізації та інтенсивності використання земель.

Систематичне нарощування обсягів застосування мінеральних добрив на дерново-підзолистих ґрунтах України впродовж 60 років призвело до кількакратного збільшення вмісту в них Pb, Ni, Cr, Cd, Zn, Cu. Водночас для зниження наполовину вмісту таких металів, як Zn, Cd, Cu, Pb необхідно, відповідно 500, 1100, 1500 і кілька тисяч років.

Хімічні елементи в повітрі та воді мігрують у вигляді двох основних форм: розчиненої та завислої. У атмосферному повітрі елементи можуть знаходитися в аерозольній фазі (зависла в повітрі, дисперсна) і парогазовій фазі. У відносно чистих – еталонних фонових умовах, більшість металів (Cd, Co, Cr, Cu, Zn, Pb, і Hg), а також Se, As, Br, Sb містяться в атмосфері, головним чином у парогазовій формі. У атмосферному повітрі селітебних територій великого промислового міста роль суспензій у складі атмосфери для більшості елементів зростає до 70–90%. Проте для низки елементів парогазова фаза, або не уловлювана фільтром субмікронна фракція, становить значну частину змісту (As – 66%, Sb – 67%, Hg – 60%).

Практично для усіх досліджених хімічних елементів на відносно віддалених і порівняно чистих територіях в осадах з атмосфери переважають їх розчинні форми. Поблизу джерел викидів одночасно зі збільшенням загальної маси повітряного пилу і ступеня концентрації в ньому елементів стрімко зменшується частка їх розчинних форм (окрім кадмію).

З іншого боку, осадженнями фіксується усього лише 20–30% маси викидів. Інша частина викиду розсіюється, поступаючи в регіональні і глобальні міграційні цикли, створюючи "фонове" забруднення. Центр найщільніших випадань поллютантів приурочений до джерела викиду. Проте, вплив процесів глобального перенесення антропогенних забруднюючих речовин призвів до того, що зараз, по суті, не можливо отримати надійні дані щодо природного фонового стану повітря і випадань, які мають визначатися ходом вулканічної діяльності й літогенними процесами.

Елементи, що поступають із осадами з атмосфери, концентруються у поверхневій частині ґрунтів (0–20 см і 0–40 см). В результаті техногенних викидів та акумуляції ґрунти починають трансформувати сполуки важких металів, і в ґрунтових горизонтах виникають нові металорганічні сполуки, яких не було до техногенного забруднення. Локалізація та інтенсивність емісії техногенних хімічних елементів зумовлює формування техногенних геохімічних аномалій і біогеохімічних провінцій з різним ступенем екопругеності.



Під дією техногенних викидів відбувається **деградація ґрунтів**. У їх поверхневих пластах вміст мікроелементів, у т.ч. і важких металів, збільшується в десятки і сотні разів відносно фонових концентрацій. Такі забруднені ґрунти самі стають джерелом забруднення довкілля.

На них культурні рослини настільки змінюють свій хімічний склад, що стають непридатними для споживання людини і як фураж для тварин. Хімічне забруднення ґрунтів важкими металами – найнебезпечніший вид деградації ґрунтового покриву, оскільки самоочисна здатність ґрунтів від важких металів слабка. Ґрунт стає геохімічним бар'єром для більшості токсикантів на шляху їх міграції з атмосфери в ґрунтові і поверхневі води.

Поглинання хімічних елементів рослинністю означає їх залучення до малого чи великого біогеохімічного кругообігу речовин. Інтенсивність залучення різних елементів у цей процес неоднакова. Інтенсивність біологічного поглинання хімічного елемента, як частку від ділення його вмісту в золі на вміст у гірських породах А. Перельман (1975) назвав **коефіцієнтом біологічного поглинання** (K_6). Так, наприклад, розрахунки показують, що молібден рослинність акумулює в десятки разів інтенсивніше, ніж титан.

Усі елементи за інтенсивністю біологічного поглинання можна розділити на дві групи. До першої належать ті, концентрація яких у золі більша, ніж в земній корі. Особливо активно рослини поглинають бор, бром, йод, цинк і срібло ($K_6 > 10$). До другої групи належать елементи з низькою інтенсивністю поглинання, що мають $K_6 < 1$. Деякі з них присутні в земній корі переважно у формах, важко доступних для рослин (галій, цирконій,

титан, ітрій, лантан), інші токсичні, тому і надходять у них обмежено (фтор, уран).

Поглинання хімічних елементів рослинами – процес, значною мірою регульований організмом. Доведено, що 19 елементів є необхідними для життя рослин, а ще 12 вважають умовно необхідними. Групу **макро-елементів** становлять O, H, C, N, P, S, K, Ca, Mg, Fe, Si, Al, Na та ін. (вміст у сухій речовині від 0,01% і більше). Незамінними для нормальної життєдіяльності організмів у мікроконцентраціях (менше 0,001%) є **мікроелементи** B, Na, Cl, V, J, Mn, Co, Cu, Zn і Mo. Із умовно необхідних у рослинах присутні у різних кількостях Li, F, Al, Si, Ag, Ti, Cr, Ni, Se, Sr, Cd і Pb, корисність або незамінність яких ще не доведена. Натомість встановлена токсичність багатьох із цих елементів за надходження в рослини у підвищених кількостях. За **фітотоксичністю** важкі метали за однакових концентрацій розташовуються у такій послідовності: Cd>Ni>Zn>Mn>Cu>Pb.

За великих рівнів забруднення інактивація токсикантів у ґрунті стає неповною і потік іонів починає атакувати коріння. Частину іонів рослина здатна переводити в неактивний стан ще до проникнення їх у коріння: хелатувати (зв'язувати) за допомогою кореневих виділень і адсорбувати на зовнішній поверхні коріння. Та все ж значна їх кількість потрапляє в корінь, де частково адсорбується на стінках. Якщо в клітини кореня проникає токсичних іонів усе ж більше допустимого рівня, то починає діяти ще один механізм захисту, який переводить їх надлишок у вакуолі. За переміщення по тканинах рослини, елементи можуть бути поглинуті клітинними стінками, а також нейтралізовані присутніми в клітинному соку органічними сполуками. Для проникнення в клітину листка елементу необхідно здолати клітинну мембрану, тобто як і в коренях тут діє механізм вибіркового поглинання. У дослідях з різноманітними культурними і дикорослими рослинами встановлено, що інтенсивність акумуляції важких металів в органах зменшується у такому напрямку: корінь > листок > насіння. Причому вміст важких металів у тканинах кореня та насіння може відрізнятись в десятки, а іноді – в сотні разів.

Окрім проникнення токсикантів у рослину через коріння із забруднених ґрунтів значна їх частка проникає через листову поверхню, стебла й пагони із газопилових викидів і аерозолів безпосередньо через продиhi, а також просочується із розчином через покривні тканини.

Отже, за збільшення надходження хімічних елементів у природні середовища можлива зміна хімічного складу живих організмів. Мігруючи по харчових ланцюгах, мікроелементи можуть накопичуватися в органах і тканинах рослинних і тваринних організмів у токсичних концентраціях. Цю обставину необхідно враховувати, оскільки кінцевою ланкою трофічного ланцюга є людина. Сільськогосподарська та промислова сировина з перевищенням рівня ГДК мікроелементів можуть виявитися небезпечними

для здоров'я людини при використанні їх в їжу і як сировини для виготовлення медичних препаратів.

Надходження небезпечних хімічних елементів, зокрема і важких металів до організму людини відбувається різними шляхами та за участі інших живих організмів (рослин, тварин). Можливі такі схеми їх проникнення (рис. 14.2):

- ✓ повітря → людина;
- ✓ вода → людина;
- ✓ повітря → ґрунт → вода → людина;
- ✓ повітря → ґрунт → рослина → людина;
- ✓ повітря → ґрунт → рослина → тварина → людина;
- ✓ повітря → ґрунт → вода → водна рослинність → тварини-гідробіоти → людина;
- ✓ повітря → рослина → людина;
- ✓ повітря → рослина → тварина → людина;
- ✓ ґрунт → повітря → людина.

Закономірності акумуляції важких металів необхідно враховувати в регіонах вирощування харчових і кормових культур, риборозведення, де можливе техногенне забруднення повітря, вод і ґрунтів. Присутність елементів-токсикантів у харчових продуктах в кількості, що в 2–3 рази перевищує фонові концентрації, небажана для агропромислового виробництва.

Адже відомо, що із загального обсягу чужорідних хімічних речовин, що проникають в організм людини, 30–80% і більше надходять саме з їжею, що своєю чергою може зумовити розвиток різних захворювань населення, у т.ч., у найчутливіших його верств – вагітних жінок і дітей.

За вимогами Об'єднаної комісії ФАО та ВООЗ такі важкі метали, як ртуть, кадмій, свинець, мідь, стронцій, цинк, залізо, а також арсен взяті під особливий контроль. Вони включені до переліку компонентів, вміст яких відстежують у міжнародній торгівлі продуктами харчування.

Проаналізуємо екотоксичну небезпеку хімічних елементів *першого класу токсичності*.

Кадмій є одним із важких металів, що найнебезпечніший для людини та інших живих організмів. Метал належить до розсіяних елементів і міститься у вигляді домішок у багатьох мінералах. Його середня концентрація у морській воді – приблизно 0,1 мкг/л, а в земній корі – 0,1 мг/кг. Глобальні виділення кадмію з природних джерел представлені в табл. 14.3.

Кадмій застосовують у гальванотехніці для антикорозійних і декоративних покриттів, у виробництві акумуляторів (нікель-кадмієві батареї), використовують як стабілізатор полівінілхлориду, як пігмент у склі та пластмасах, як електродний матеріал, як компонент різних сплавів.

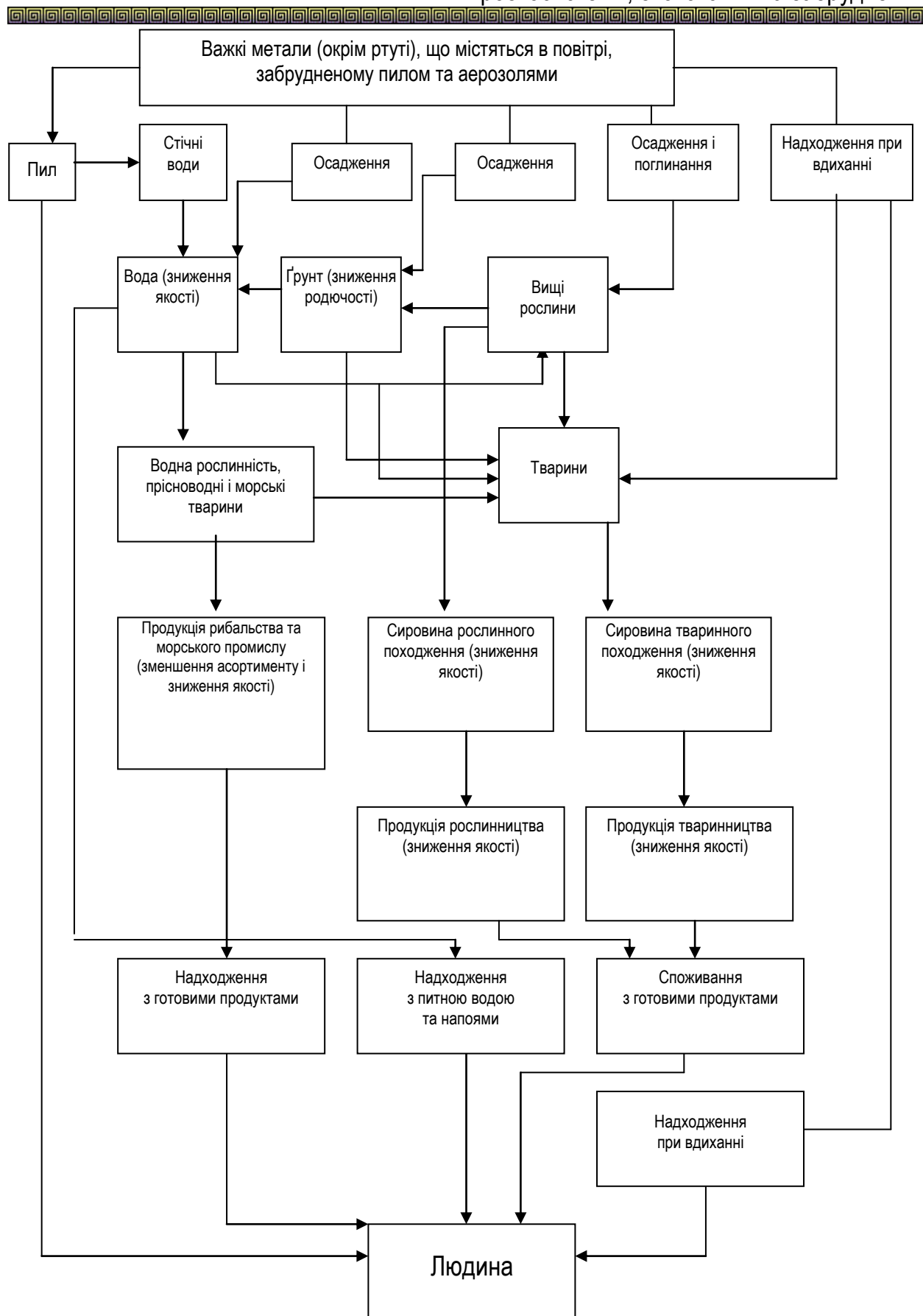


Рис. 14.2. Схема впливу аеротехногенного забруднення на людину

Табл. 14.3. Глобальне вивільнення кадмію з природних джерел (тис. тонн за рік)

Природне джерело	Діапазон величин	Середнє значення
Частинки ґрунту, що переносяться вітром	0,01–0,04	0,02
Аерозолі морської солі	0–0,11	0,06
Вулкани	0,14–1,5	0,82
Лісові пожежі	0–0,22	0,11
Біогенні континентальні частинки	0–0,83	0,42
Біогенні континентальні леткі речовини	0–0,08	0,04
Біогенні морські джерела	0–0,1	0,05
Загальна емісія	0,15–2,6	1,3

Головними джерелами забруднення довкілля кадмієм є: виробництво кольорових металів; спалювання твердих відходів і вугілля; стічні води гірничо-металургійних комбінатів; виробництво мінеральних добрив і барвників тощо. Антропогенна емісія кадмію в біосферу перевищує природну в декілька разів. Наприклад, в повітряне середовище щорічно поступає приблизно 9000 т кадмію, причому 7700 т (тобто більше, ніж 85%) – у результаті діяльності людини. Тільки в Балтійське море кожен рік потрапляє 200 т цього елемента.

Кадмій легко акумулюють багато організмів, зокрема бактерії та молюски, у яких біоконцентрація сягає рівнів декількох тисяч. Найбільший вміст елемента виявляють переважно в нирках, жабрах і печінці гідробіонтів; в нирках, печінці і скелеті наземних тварин. У рослинах кадмій концентрується в основному в корені та меншою мірою – в листках. У прісноводному середовищі кадмій проникає переважно за рахунок абсорбції безпосередньо з води, водночас морські організми, навпаки, нагромаджують кадмій з їжею.

У здоровому організмі кадмій може легко взаємодіяти з іншими металами, особливо з кальцієм і цинком, що впливає на виразність його впливів. Цей елемент здатний заміщати кальцій у кальмодуліні, порушуючи тим самим фізіологічні процеси регуляції поглинання кальцію. Він здатний інгібувати іонний транспорт та індукувати синтез металотіонеїну. Навіть незначна нестача заліза різко посилює акумуляцію кадмію. Токсичні ефекти кадмію широко варіюють залежно від виду, експонованого до його дії, концентрацій, низки умов (температура середовища) і наявності іонів інших металів. Встановлено, що токсичній дії кадмію найбільше піддаються водні організми в ембріональній стадії розвитку. Найсучасніші дослідження на дріжджах і людських клітинах підтвердили канцерогенність кадмію.



Інший шлях потрапляння в людський організм кадмію – продукти харчування (Снітинський і Гребельна, 2008). Солі кадмію використовували як добавку для збереження піни у пиві до 1996 року. У переважній більшості люди отримують вагому частину кадмію від цигаркового диму, коли п'ють забруднену ним воду або вживають харчові продукти, які містять підвищені рівні елемента. Паління зумовлює середнє щоденне вживання організмом цього токсиканта.

До 1997 року, коли ще не брали до уваги ступінь шкідливості цього металу, карбонат кадмію і хлорид кадмію використовували як фунгіциди для обробки полів для гольфу і домашніх газонів.

Середній вміст **арсену** у земній корі становить 1×10^{-4} – $1 \times 10^{-3}\%$. У повітрі індустриальних регіонів він присутній у концентраціях 0,0005–0,02 мкг/м³. У ґрунтових водах фоновий рівень арсену варіює в межах 0,1–200 мг/л, що зумовлено його вмістом у водопровідних геологічних пластах. У районах, де є поклади арсенітових руд, елемент присутній і в природних водах, при цьому з ґрунту у воду проникає до 5–10% загальної кількості арсену. У поверхневих водах середній вміст його – 0,01 мг/л, а в океанічних – $1,8 \times 10^{-8}$ – $0,6 \times 10^{-6}\%$. У природних умовах арсен у вигляді різноманітних сполук поступає у довкілля, головним чином, при виверженні вулканів і ерозії ґрунтів, а також з біогенних морських джерел (табл. 14.4).

*Табл. 14.4. Глобальні виділення арсену з природних джерел
(тис. тонн за рік)*

Природне джерело	Діапазон величин	Середнє значення
Частинки ґрунту, що переносяться вітром	0,30–5,0	2,6
Аерозолі морської солі	0,19–3,1	1,7
Вулкани	0,15–7,5	3,8
Лісові пожежі	0–0,38	0,19
Біогенні континентальні частинки	0,20–0,5	0,26
Біогенні континентальні леткі речовини	0,3–2,5	1,3
Біогенні морські джерела	0,16–4,5	2,3
Загальна емісія	0,86–23,0	12

У природі арсен переважно існує у вигляді арсенідів міді, нікелю і заліза, а також оксидів і сульфідів. У водному середовищі присутній переважно у формі арсенітів і арсенатів. Різнманітні сполуки арсену знаходять широке застосування у сільському і лісовому господарстві як пестициди і гербіциди, застосовуються в медицині і ветеринарії, скляній, керамічній, текстильній і шкіряній промисловості, електроніці, електротехніці, оптиці, при виробництві барвників, дзеркал і в інших галузях. Щорічно у світі промислово виготовляють більше 60 тис. т сполук арсену.

Антропогенні джерела надходження арсену у довкілля – це видобуток і переробка руд, що містять цей елемент, пірометалургія, спалювання природних видів палива – кам'яного вугілля, сланців, нафти, торфу, а також виробництво і використання суперфосфатів, що містять арсен, отрутохімікатів, препаратів і антисептиків.

Метаболізм арсену надзвичайно складний і суттєво відрізняється для органічних і неорганічних його сполук. Деякі види бактерій і грибів здатні трансформувати арсеніти в арсенати і навпаки, а неорганічні сполуки арсену здатні в анаеробних умовах піддаватися біометилуванню та інкорпороватися в ліпіди клітинних мембран.

Ряд тропічних водоростей таким чином нейтралізують арсен, у той час як для подібних водоростей з нетропічних водойм властива токсична дія. Останнє зумовлене великим вмістом фосфатів у таких водах і внаслідок цього нездатності зв'язуватися з фосфоліпідами, що призводить до нагромадження продуктів метаболізму арсену в клітинних білках і загибелі. Абсорбція, трансплацентарний транспорт, поширення в організмі, елімінація і біотрансформація арсену багато в чому видоспецифічні, залежать від шляхів поступлення і хімічної структури сполук арсену (Бондаренко і Чумак, 2004). Водночас доведено, що арсен нагромаджується в організмі ссавців, які є заключними ланками трофічних ланцюгів.

При контакті з організмом людини, арсен поступає в кров, а пізніше виявляється, головним чином, у печінці, м'язовій тканині, нирках, селезінці та шкірі. Сполуки арсену виводяться з організму, в основному, із сечею. Період напіввиведення арсену варіює в межах від 10 год до кількох днів. Тривалентний арсен пригнічує активність багатьох ферментів. Допустима добова доза арсену для людини становить 3 мг.

Неорганічний арсен є документально підтвердженим канцерогеном і за класифікацією Не дивлячись на те, що вплив арсену на різних представників тваринного і рослинного світу достатньо добре відомий, цей елемент, враховуючи важкість зумовлених ним наслідків, поширення в об'єктах довкілля і сфери застосування, є одним із найнебезпечніших екотоксикантів.

Ртуть – розсіяний елемент, що концентрується у сульфідних рудах, і лише невелика його кількість трапляється у самородному стані. Середній уміст ртуті в атмосфері переважно нижчий, ніж 50 нг/м^3 , в земній корі – приблизно $0,08 \text{ мг/кг}$. Глобальні виділення ртуті з природних джерел представлені в таблиці 14.5. Присутність ртуті в ґрунті є незначною, ледве сягає $0,1 \text{ ppm}$. Досліджені її коливання в межах $0,01\text{--}2 \text{ ppm}$. В ґрунтах, забруднених промисловими викидами, концентрація ртуті сягає приблизно 10 ppm . Із добривами в ґрунт надходить мала доза мікроелемента – приблизно $0,2 \text{ ppm}$ у сухій масі. Значна частка ртуті (кілька десятків ppm) міститься в комунальних і промислових стоках, а також в їх осадах.

Табл. 14.5. Глобальні виділення ртуті з природних джерел
(тис. тонн за рік)

Природне джерело	Діапазон величин	Середнє значення
Частинки ґрунту, що переносяться вітром	0–0,01	0,005
Аерозолі морської солі	0–0,04	0,02
Вулкани	0,03–2,0	1,0
Лісові пожежі	0–0,05	0,02
Біогенні континентальні частинки	0–0,04	0,02
Біогенні континентальні леткі речовини	0,02–1,2	0,61
Біогенні морські джерела	0,04–1,5	0,77
Загальна емісія	0,10–4,9	2,5

Рослини засвоюють ртуть із ґрунту, а також із повітря (промислові викиди, випаровування з ґрунту). В природних умовах кількість мікроелемента в рослинах звично становить 0,03 ppm, а в середньому не перевищує 0,2 ppm.

Ртуть по-різному локалізується в живих організмах. Наприклад, у соломі зернових її кількість більша, ніж у зерні завдяки фізіологічним бар'єрам переміщення ртуті від коріння до надземних органів. Тому більшу небезпеку становлять атмосферні викиди, оскільки рослини здатні вбирати ртуть листям. Поглинання рослинами ртуті з ґрунту можна зменшити шляхом його вапнування і підвищення pH до 6,5.

Викиди ртуті у довкілля в результаті діяльності людини доволі значні. Загальна (природна і антропогенна) емісія ртуті в атмосферу становить більше 6000 т щорічно, причому менше половини – 2500 т становлять емісії від природних джерел.

Ртуть надзвичайно шкідлива для людей і тварин. Її негативний вплив полягає перш за все у здатності зв'язуватися з групами сульфгідрилових амінокислот, що призводить до руйнування білків і ферментів. Ртуть акумулюється, головним чином, у нирках, печінці й мозку. Вона пошкоджує нирки, нервову та кров'яну системи, зменшує імунну стійкість організму, зумовлює генетичні зміни.

Використання ртутних препаратів для боротьби зі шкідниками рослин стало причиною масового отруєння людей і домашніх тварин в Іраку і Гватемалі. У Швеції, Канаді, США передпосівна обробка насіння препаратами ртуті зумовила численні отруєння диких птахів (куріпок, качок), які скльовували висіяне зерно. Зафіксовані отруєння людей, які їли м'ясо цих птахів.

Вміст **свинцю** в земній корі становить $1,6 \times 10^{-3}\%$ від її маси. Він концентрується в таких мінералах як галеніт, англезит, церусит. Загальні запаси свинцю на Землі оцінені у 100 млн. т, в основному представлені у вигляді

сульфатів. Середній вміст свинцю в атмосфері $2 \times 10^{-9} - 5 \times 10^{-4}$ мкг/м³. У довкілля щорічно з природних джерел поступає з вулканічними викидами, ґрунтовим силікатним і метеоритним пилом, морськими сольовими аерозолями й ін. до 230 тис. т. Глобальні надходження свинцю з природних джерел представлені у табл. 14.6.

*Табл. 14.6. Глобальні виділення свинцю з природних джерел
(тис. тонн за рік)*

Природне джерело	Діапазон величин	Середнє значення
Частинки ґрунту, що переносяться вітром	0,30–7,5	3,9
Аерозолі морської солі	0,02–2,8	1,4
Вулкани	0,54–6,0	3,3
Лісові пожежі	0,06–3,8	1,9
Біогенні континентальні частинки	0,02–2,5	1,3
Біогенні континентальні леткі речовини	0,01–0,38	0,2
Біогенні морські джерела	0,02–0,45	0,24
Загальна емісія	0,90–23	12,0

Природний вміст свинцю в озерній і річковій воді коливається від 1 до 10 мкг/л. Концентрації свинцю у підготовленій воді (тобто після очищення) зазвичай нижчі, ніж у вододжерелах. Але рівні вмісту в питній воді можуть бути набагато вищі внаслідок використання свинцевих труб або покритих свинцем резервуарів для очищення води. ГДК свинцю не повинна перевищувати у питній воді 0,01 мг/л.

У верхніх шарах ґрунту міститься в середньому 2–200 ppm свинцю (Снітинський та ін., 2004). Найбільше він трапляється поблизу рудних родовищ або ж у зоні промислових або транспортних викидів, де кількість цього важкого металу досягає 3500 ppm, а в деяких випадках – понад 1%. Окрім надходження із материнської породи, свинець потрапляє в ґрунт разом із органічними добривами (до 15 ppm), а також із фосфорними добривами (приблизно 200 ppm) і вапняковими меліорантами (приблизно 1500 ppm).

У рослинах свинець присутній у кількості від слідів до кількох сот ppm у сухій масі (середня фонові концентрація 135 ppm), крайні межі коливань в листі лісових деревних порід < 10–3000 ppm. Вміст свинцю у рослинах уздовж автомобільних шляхів і вулиць з інтенсивним рухом у 5–20 і навіть 100 разів перевищує норму. Поблизу промислових підприємств, пов'язаних із переробкою свинцю, кількість його у хвойних дерев досягає 1280–2342 ppm, а в трав'яних рослин – 350–1200 ppm, тоді як у нормі вміст елемента становить 10–15 ppm сухої речовини.

Свинець, поглинутий з ґрунту, має схильність кумулюватися, головним чином у коріннях, що є вагомим бар'єром до його надмірного накопичення.



Водночас атмосферний свинець нагромаджується у тканинах листків. Інтенсивно акумулюють свинець хвойні дерева і мох. Хоча численні спостереження не підтвердили потребу свинцю для розвитку рослин, доведені факти позитивного впливу невеликих його доз на підвищення врожаю культурних рослин – буряків, моркви, капусти, огірків та яблук.

Для людей і тварин свинець, із-поміж інших важких металів, є надзвичайно шкідливим. Припустима норма свинцю в продуктах – 2 ppm. Концентрується цей елемент в основному в кістках, нирках і печінці. Надлишок свинцю може зумовити малокрів'я, сповільнює дію ферментів, негативно впливає на нервову систему. В дітей свинець може ушкоджувати мозок, зумовлювати мутації.

Нагромадження в ґрунтах уздовж автомагістралей великої концентрації свинцю та отримання з них кормів для дійних тварин робить молоко отруйним. Це ж відбувається і в разі випасання худоби вздовж доріг. Не можна також вирощувати овочі та фрукти на захисних смугах автомагістралей, де навіть комахи-рослиноїди можуть кумулювати свинець у кількості 10–25 мкг/г.

Концентрація свинцю в природних водах переважно не перевищує 10 мкг/л. Рівень загального вмісту елемента в атмосферних опадах переважно коливається від 1 до 50 мкг/л, але в промислових регіонах може сягати 1000 мкг/л, призводячи до серйозного забруднення снігового покриву і ґрунтів.

Вивчення циркуляції свинцю в харчових ланцюгах показало, що перенесення на біоту завислого у повітрі свинцю може відбуватися прямим (засвоєння випадань через надземні частини рослин) і/або фізіологічним шляхом (через ґрунт). Тобто рослини отримують свинець з повітря і з ґрунту, хоча міжвидові відмінності при цьому доволі вагомі. Перенесення елемента від рослин до тварин не є достатньо стабільними і добре вивченим. Натомість люди здебільшого зазнають впливу свинцю від споживання забруднених продуктів і води, а також від його вдихання. Окрім того, діти можуть отримувати свинець через фарби, грудне молоко, а також від заковтування предметів, не призначених для харчування. Особливо слід зауважити, що маленькі діти значно легше, ніж дорослі акумулюють свинець і тому належать до групи великого ризику відносно свинцевих інтоксикацій.

Підвищений вміст свинцю у ґрунті спричинює до зменшення кількості головних представників ґрунтового мікробіоценозу. Стійкими до токсичного впливу сполук свинцю є деякі ґрунтові гриби, а чутливими – актиноміцети й азотфіксуючі бактерії. Останніх можна використовувати в якості біоіндикаторів ступеня забруднення ґрунтів сполуками свинцю.

З-поміж теплокровних найчутливіші до отруєнь сполуками свинцю коні й собаки, резистентні щурі, миші і птахи. В останніх (качки, гуси) токсичні ефекти свинцю проявляються лише при великому його вмісті в їжі – 100 мг/кг і більше. Не дивлячись на те, що всі сполуки свинцю діють

загалом подібно, їх розташовують за зменшенням токсичності наступним чином: нітрат > хлорид > оксид > карбонат > ортофосфат.

Селен в середньому у масі земної кори становить $5 \times 10^{-6}\%$, у морській воді – 4×10^{-3} мг/л. За хімічними властивостями дуже подібний до макроелемента сірки.

Науково доведено, що за нестачі селену як мікроелемента живих тканин, людський організм має слабкий імунітет і ослаблений метаболізм. Елемент входить до складу активних центрів деяких білків у формі амінокислоти селеноцистеїну. Тому, селен в оптимальній кількості зміцнює імунну систему, володіє протипухлинною активністю, захищає від проникнення в організм канцерогенів, протидіє всмоктуванню в кров токсинів, необхідний для синтезу антиоксидантних ферментів. Цей мікроелемент допомагає запобігти серцевим нападам, позитивно діє на нервову систему, пом'якшує алергічні реакції, сприяє дробленню ниркових каменів, відновлює нормальний кров'яний тиск. Його препарати використовують для лікування бронхіальної астми. Хронічна нестача мікроелемента селену в їжі з плином часу спричинює стан тривоги і втомлюваність, сприяє розвитку лейкозу.

Джерелом селену для людини є будь-які морепродукти, фісташки, гриби, соя, кольорова і білокачанна капуста, ріпа, часник, виноград.

З'ясована позитивна кореляція вмісту селену в поверхневих водах і дощових опадах. Тому основними джерелами селену в поверхневих водах є атмосферні опади, тверді атмосферні частки і ґрунтовий селен. Є припущення, що більша частина селену атмосферних опадів може бути ґрунтового походження за рахунок виділення селеновмісних сполук в атмосферу.

Результати комплексних біогеохімічних досліджень вказують на те, що селен-дефіцитні патології у низці випадків не залежать від його рівня в харчовому ланцюгу, а зумовлені техногенними і біологічними чинниками (розведення слабоадаптованих порід тварин, незбалансованість раціону тощо).

Стосовно людини, за теперішнього слабо контрольованого харчування, біохімічні зв'язки між споживанням селену і патологічними порушеннями ще більш складні (Екологічна..., 2005). Тому основним критерієм щодо забезпечення селеном є фактичний його вміст у харчовому меню і добове споживання, а також рівень засвоєння різних селеновмісних речовин. Численні дані свідчать про наявність кореляції між харчовою потребою у селені та вітаміном Е. Недостатність селену у тварин зумовлює ряд захворювань, етіологія яких аналогічна проявам Е-авітамінозу.

Вважають, що більшість людей потребує не більше 0,85 мкг селену на день на 1 кг маси тіла для підтримання максимальної активності тканин організму. Для запобігання ризику інтоксикації селеном рекомендована

денна доза становить 40–45 мкг селену. Рекомендовану потребу покривають: 22 горішки фісташок, 100 г білих грибів, 250 г рису.

Надлишок селену в людському організмі спричинює нудоту і блювоту, випадіння волосся, ламкість нігтів, висипки на шкірі, блідість, зниження функцій нирок і печінки. У результаті тривалого вживання понаднормової дози мікроелемента може виникнути цироз печінки. Ознакою перенасичення організму селеном є виразний "часниковий" запах із рота.

Збагачення раціону тварин селеном (Слободян та ін., 2020) має протекторну дію на організм, зменшує токсичну дію комплексів ксенобіотиків (свинець, кадмій, ДДТ, 2,4-Д-нітрати) за більшістю показників (сорбційні властивості органів і тканин, кількість середніх молекул в сироватці крові). Водночас, за окремими показниками спостерігали підсилення токсичного ефекту (загальний білок крові). Селен натрію може ефективно корегувати порушення функціонального стану нирок за одночасної інтоксикації хлоридами кадмію та алюмінію.

Цинк є поширеним у біосфері елементом. Вміст його в ґрунтах оцінюють від 1 до 300 мг/кг. У 10 т перегною накопичується приблизно 400 г цинку.

Карбонати, оксиди і сульфід цинку погано розчинні у воді. Проте добре розчинні хлоридні й сульфатні солі, здатні до гідролізу з утворенням гідроксиду і карбонату цинку. У результаті цього концентрація цинку в природних водах, як правило, низька. У поверхневих водах України виявлено від 0,005 до 0,02 мг цинку. У підземних водах цинку більше: від 0,007 до 0,1 мг/л. ГДК цинку в водопровідній воді повинна бути не більше 5 мг/л.

Рослини засвоюють цинк у формі іонів Zn^{2+} або хелатів цинку. Вони можуть нагромадити 200–500 г, а деколи понад 2 кг/га Zn. Вміст цинку у рослинах залежить передусім від їх видів. Наприклад, відома усім фіалка може акумулювати до 12000 ppm цинку у сухій масі. Нормальний же вміст цього елемента коливається в межах 20–200 ppm. Виявлена значна різниця вмісту цинку в різних органах рослин. Наприклад, у листі цукрового буряка його вміст 67,8 ppm, а в коренеплодах – 21,85 ppm. Значну кількість цинку містить часник, цибуля, проте дуже мало його у фруктах, моркві та капусті. Роль цинку для рослинних організмів полягає передусім у його участі в багатьох ферментативних реакціях, в яких його дія нагадує дію Mn^{2+} і Mg^{2+} . У рослин цей фермент сконцентрований у хлоропласті, він є каталізатором у реакції води з двоокисом вуглецю. Нестача цинку спричинює низку проблем, таких як хлороз листя між прожилками, здрібнення листкових пластинок, утворення розеток із пагонів у фруктових деревах. Фруктові дерева, яким не вистачає цинку, дають мало плодів, до того ж вони дуже дрібні. Негативно впливає на рослини і надмірна кількість цинку, оскільки його надлишок зумовлює зниження фіксації рослинами фосфору і заліза.

Рослини по-різному реагують на проникнення в організм цинку. Окремі з них дуже толерантно витримують аномальну концентрацію цинку у ґрунті і можуть без особливих ознак інтоксикації нагромаджувати його у своїх тканинах. Шкідливість цинку у довкіллі проявляється за умов його великих концентрацій в зоні промислових викидів. Навіть підвищені концентрації цинку призводили до міжжилкового хлорозу у клена червоного, а дуже великі концентрації зумовлювали в'янення молодого листя і пагонів та некроз тканини листя і пагонів.

За добової дози 150 мг цинку спостерігали порушення метаболізму міді й заліза, оскільки він є антагоністом цих металів. Проте, за адекватного споживання міді й заліза, навіть великі дози цинку не створюють серйозної проблеми. Цинк є метаболічним антагоністом кадмію. Тести на поріг присмаку (Трахтенберг, 2008) свідчать про те, що 5% населення відрізняють воду, що не містить цинку, від води, що містить її в концентрації 4,3 мг/л (у вигляді сульфату цинку). Рівні, при яких виявляються інші солі цинку, дещо вищі.

Вміст **фтору** у ґрунті найчастіше коливається в межах 100–500 *ppm*, але в окремих випадках сягає 1500 *ppm*. Відомі факти, коли в ґрунтах, сформованих із фосфоритної материнської породи або розташованих поблизу джерел промислових викидів, його вміст становив приблизно 500 мкг/г сухої маси. Вміст фтору у ґрунті залежить від гранулометричного складу ґрунту. Натуральним джерелом ґрунтового фтору є деякі мінерали, такі як флюорити, криоліти, апатити. Невелика кількість фтору є в перегної (до кількох *ppm* в сухій масі), дещо більше в мінеральних добривах.

Фтор із ґрунтів потрапляє в рослини, а з рослинною їжею, водою – в організм тварин і людей. Цей елемент міститься в усіх продуктах, проте в деяких його особливо багато (наприклад, риба, м'ясо, сир, овочі, чай тощо). Фтор, який міститься в харчових продуктах, діє менш токсично, ніж той, який надходить з водою. У середньому з водою і їжею людина отримує до 1 мг фтору за добу.

Рослини містять різну кількість фтору – від слідів до приблизно 80 *ppm* в сухій масі. Особливо багато фтору в черешні, винограді, моркві, огірках, квасолі, салаті, капусті, буряку. Малий вміст елемента в сливі, вишні, малині, кавунах. Споживання фтору рослинами залежить від чинників, які впливають на зміни фторових зв'язків у ґрунті. Відомо, що підвищення *pH*, а також більший вміст фосфору, алюмінію, гумусу, колоїдних фракцій знижує всмоктування цього мікроелемента.

Токсичність фтору залежить від форми сполук, які він утворює. Найтоксичнішим є HF (**плавикова кислота**), менше токсичними є NaF, KF, NH₄F, до малотоксичних належить нерозчинний у воді CaF₂. Мікрокількості фторидів присутні в багатьох водах, а більші концентрації часто пов'язані з підземними джерелами. У районах, багатих на фторовмісні мінерали, коло-

дязні води можуть містити до 10 і більше мг фтору на літр води. Найбільший рівень, що наведений у літературі, становить 2800 мг/л. Більшість вод містить менше 1 мг фтору на літр. Іноді фториди можуть надходити в ріки у результаті промислових скидів. Малі концентрації фтору є в більшості поверхневих джерел водопостачання. Вони на 80% використовуються водопроводами. Варто врахувати також і те, що освітлення води коагуляцією зменшує вміст фтору на 10–30%. Кип'ятіння води також зменшує вміст фтору ще на 2–40%. Кількість фтору, який випадає в осад, залежить від твердості води. Чим вища твердість, тим більше фтору випадає в осад.

ГДК фтору у водопровідній воді для I і II кліматичних районів – 1,5 мг/л, III-го – 1,2 мг/л, IV-го – 0,7 мг/л.

У великих дозах фтор гостро токсичний для людини. Патологічні зміни включають геморагічний гастроентерит, гострий токсичний нефрит, ураження печінки і серцевого м'яза. Смертельна доза становить приблизно 5 г для фториду натрію, тобто приблизно 2 г фтору.

Хронічні ефекти в людини при великих рівнях впливу фтору проявляються у вигляді крапчастості зубів і флюорозу, при якому порушується структура кісткової тканини. Початковими ознаками і симптомами інтоксикації є блювота, болі в черевній порожнині, нудота, діарея і навіть судоми. Дослідження, проведені упродовж більше 30 років, не виявили зв'язку між раком і вмістом фтору у воді. Тому не підтвердилися припущення про те, що фтору притаманна мутагенна або тератогенна активність.

З'ясуємо токсичність хімічних елементів **другого класу токсичності**.

Хром належить до елементів із повсюдним поширенням – його вміст у земній корі становить $8,3 \times 10^{-3}\%$. Практично завжди він присутній у тривалентному стані (переважно у вигляді мінералу хроміту). Надходження хрому у довкілля відбувається як із природних джерел (засвоєння рослинами з ґрунту, ерозія гірських порід і ґрунтів, а також у доволі невеликих обсягах з вулканічними викидами). Але найбільше його потрапляє у довкілля у результаті виробничої діяльності (використання хрому, спалювання вугілля, меншою мірою від видобутку руди і виробництва металів).

У рослинних і тваринних організмах хром завжди присутній (він є у хімічній структурі ДНК). Цей елемент, ймовірно, необхідний для вуглеводного і ліпідного обміну, і для утилізації амінокислот деякими системами. Він також можливо має значення для профілактики легких форм діабету й атеросклерозу. У людей, що проживають у районах, де атеросклероз трапляється рідко або практично відсутній, виявлена тенденція до більших рівнів вмісту хрому в тканинах, ніж у людей з районів, де це захворювання є ендемічним. Проте, питання, чи є цей елемент незамінним елементом живлення для біологічних об'єктів до тепер не з'ясоване.

Деякі, зокрема лікарські рослини, здатні його нагромаджувати у значних кількостях. Концентрація хрому у продуктах харчування варіює: у

м'ясі міститься до 60 мг/кг, в деяких видах сирів – до 130, у горіхах – до 140, а в яєчному жовтку – до 200 мг/кг хрому. Дуже велика концентрація хрому у печінці та пивних дріжджах.

Більшість із досліджених сполук **шестивалентного хрому** (проте не тривалентного) володіють вираженою генотоксичністю – вони спричинюють генні мутації у бактерій і в поведінці клітин ссавців, хромосомні аберації й обмін сестринських хроматид, а також клітинну трансформацію *in vitro*. Ембріотоксичні і тератогенні ефекти виявлені в експериментах на тваринах. У дослідях на щурах отримані переконливі докази канцерогенності хромату кальцію і низки відносно нерозчинних сполук шестивалентного хрому (вони спричинюють в основному пухлини легень). Несприятливі для людини ефекти присутнього у воді елемента пов'язані з шестивалентним хромом. ГДК хрому-VI в атмосферному повітрі 0,0015 мг/м³. Тривалентний хром розглядають як форму, есенціальну для людини, тому вважають умовно нетоксичною.

Ґрунти містять **нікелю** від 10 до 100 мг/кг. Багато його солей розчинні у воді, що може призводити до забруднення вод. У поверхневих водах рівень вмісту елемента становить 5–20 мкг/л і може сягати 1 мг/л. У системах водопостачання підземними водами виявлено до 0,13 мг/л нікелю. У підземних водах, які омивають гірські породи, що містять нікель, вміст його може сягати 20 мг/л.

Підвищення концентрації нікелю у харчових продуктах спостерігали лише за умов вирощування сільськогосподарських культур із використанням для зрошення полів води, забрудненої нікелем (недоочищені промислові стоки).

Нікель – необхідний для людини і тварин мікроелемент, зокрема для регуляції обміну ДНК. Його сполуки як каталізатори відіграють важливу роль в кровотвірних процесах. Добова потреба людини в нікелі становить не більше 0,6 мг.

Забруднення нікелем ВООЗ вважає дуже небезпечним. Вільні іони нікелю (Ni^{2+}) приблизно у двічі токсичніші від його сполук. Найпоширенішими у природних водах є сполуки нікелю, в яких він має ступінь окислення +2. Сполуки Ni^{3+} утворюються, зазвичай, у лужному середовищі.

Встановлено, що деякі сполуки нікелю канцерогенні, проте розчинні форми вважають не канцерогенними.

Загальна кількість **міді** у верхніх шарах ґрунту коливається в межах 1–180 ppm, а найчастіше становить 5–50 ppm. У випадку постійного використання фунгіцидів кількість її може зростати до 1000 ppm. Найважливішими джерелами надходження міді вважають гірські породи, стічні води хімічних і металургійних виробництв, шахтні води, різні реагенти, що містять мідь, а також зливні стоки із сільськогосподарських угідь. У ґрунтах, забруднених промисловими викидами, цей показник сягає навіть 5000 ppm.



Природним джерелом міді в ґрунті є мінерали (Cu_2S , CuFeS_2 , Cu_2O , $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$), тому вміст елемента в ґрунті значною мірою залежить від його наявності в материнській породі.

Мідь є необхідним елементом для рослин і тварин. Рослини засвоюють мідь як мікроелемент живлення у формі іонів Cu^{2+} або ж у вигляді хелатів. Кількісні показники залежать від видів рослин, ґрунту й інших чинників, які впливають на її засвоєння, і становлять 20–100 г/га, в окремих випадках – до 200 г/га. Більшу кількість (понад 100 г/га) асимілюють такі культури, як помідори, морква, шпинат, буряки. Концентрація міді в рослинах, порівняно з іншими мікроелементами, є невеликою: 2–20 ppm, зрідка 1–70 ppm Cu в сухій масі. Проте цей елемент виконує важливі фізіологічні функції.

Нестача міді зумовлює різні хвороби рослин, зокрема хлорози. Мідь може надходити до рослин не лише через коріння, але й через листя, тому при нестачі цього елемента в ґрунті застосовують позакореневе підживлення солями міді. Оброблення листя мідним купоросом рятує рослини не лише від грибкових захворювань, а й сприяє їх підживленню.

Сполуки міді можуть виявляти місцеву подразнювальну дію на шкіру, іноді з'являється дрібна червона висипка, що супроводжується свербінням, екзема. Шкіра лиця і волосся у працівників, які доволі довго торкалися сполук міді, можуть забарвлюватися у зелено-жовтий чи зеленувато-чорний колір. На яснах іноді появляється темно-червона крайка.

Кобальту у ґрунті міститься менше, ніж інших мікроелементів (1–40 ppm). Більше його є у важких глинах із присутністю заліза, менше – в ґрунтах гранітового, піщовикового та вапнякового походження, а також у торф'яниках. Отже, кількість кобальту значною мірою залежить від мінеральних ґрунтотвірних і біологічних чинників, наявності в цих ґрунтах заліза й марганцю. З органічними добривами в ґрунт потрапляє до 2 г елемента на 10 т, у фосфатному борошні його вміст сягає 50 ppm.

Рослини використовують кобальт у вигляді іонів Co^{2+} або хелатів у невеликій кількості (0,02–0,50 ppm). Більшість рослин нагромаджує кобальту 1–3 г, лише деякі – приблизно 10 г/га. Кобальт є незамінним мікроелементом для організмів, які зв'язують атмосферний азот, зокрема для бобових рослин, а також для вільхи.

Роль кобальту в метаболізмі рослин різноманітна. Він активізує багато ферментативних реакцій, зокрема дію аргінази, лецитинази, карбоксилази. Виявлено позитивний вплив кобальту на синтез білка, на фосфорне живлення рослин. Невеликі дози кобальту, внесені в ґрунт, підвищують вміст білка (наприклад, у зерні вівса). Відома дія кобальту на синтез деяких вітамінів, зокрема вітаміну PP (нікотинової кислоти). Недобір кобальту жуйними тваринами трапляється у випадку, коли його вміст у

грунті падає нижче, ніж 5 ppm. Добова потреба людини в кобальті точно не встановлена і за даними різних авторів коливається від 0,05 до 0,2 мг.

ГДК кобальту для води відкритих водойм – 1 мг/л, лімітуючим показником є загальносанітарний. Великі концентрації кобальту негативно впливають на діяльність підшлункової і щитоподібної залоз людини. Солі кобальту, які використовують для стабілізації піни у пиві, спричиняють у його активних споживачів кардіоміопатії, тому після доведення фактів захворювання їх використовувати заборонено.

Летальна доза кобальту для тварин становить 25–30 мг/кг. Токсична доза (LD_{50} для щурів) – 50 міліграмів. Особливо токсичні пари октакарбонілу кобальту $Co_2(CO)_8$.

Молібден мало поширений у природі. Вміст його у масі земної кори оцінюють $\sim 3 \times 10^{-4}\%$. У природних водах молібден присутній головним чином у вигляді MoO_4 . Вміст його у природній воді відкритих водойм коливається від 0,0001 до 0,1 мг/л. Невеликий вміст молібдену в підземних водах України – від 0,0005 до 0,005 мг/л. У шахтних водах молібденових родовищ концентрація цього елемента коливалася в межах від 0,01 до 0,07 мг/л, але в окремих випадках сягала 10 мг/л.

Молібден є життєво необхідним мікроелементом для рослин, тварин і людини. Віднедавна молібденові мікродобрива почали використовувати в сільськогосподарській практиці. Від внесення молібдену у ґрунт зростає врожай люпину, кормових, бобів, гороху, а також салату, цвітної капусти, кукурудзи, цукрового буряка. Молібден підвищує активність ферментів, що каталізують перетворення нітратів і потрібний для нормального функціонування азотфіксуючих бактерій. Відновлення нітратів у ґрунті здійснюється мікроорганізмами за допомогою молібден-залежного фермента нітратредуктази. Дефіцит молібдену зумовлює нагромадження нітрозамінів, які володіють канцерогенною активністю.

Надлишкове надходження молібдену з водою або їжею у тваринний організм призводить до порушення обміну речовин – виникає "молібденозис". Захворювання супроводжується анемією, зниженням вмісту міді в печінці, проносом.

ГДК молібдену у питній воді встановлена на рівні 0,25 мг/л за санітарно-токсикологічним показником.

У природі **олово** – розсіяний елемент. Вміст його в земній корі за різними оцінками становить від 2×10^{-4} до $8 \times 10^{-3}\%$ за масою. Трапляється у вигляді руди – олов'яного каменю SnO_2 (до 78,8% олова). У природні води олово надходить внаслідок процесів вилугування мінералів, що містять олово (каситерит, станін). У глинистих ґрунтах олова міститься приблизно $1 \times 10^{-3}\%$, у сухій рослинній масі $5 \times 10^{-4}\%$, у живих тканинах тварин $5 \times 10^{-5}\%$, у воді океанів $7 \times 10^{-7}\%$. У незабруднених поверхневих водах олово міститься

у субмікрограмних концентраціях. У підземних водах його концентрація сягає одиниць мікрограмів в 1 дм³.

У рослинах найбільша кількість олова міститься в насінні соняшника і гороху. У тваринних організмах його найбільше в м'язах тріскових риб і в м'язовій тканині (язик) великої рогатої худоби. Олово є в тканинах і виділеннях людини постійно. У 100 мл крові міститься 0,014 мг олова, основна його кількість знаходиться у складових компонентах крові (0,011 мг) і лише 0,002 – у плазмі. Добовий харчовий раціон людини становить приблизно 17 мг олова. Біологічна роль олова вивчена не достатньо.

Олово в отруйних кількостях діє спочатку збуджуюче, а пізніше має паралізуючий вплив на центральну нервову систему. При отруєнні оловом спостерігали діарею, блювоту, загальну слабкість, а також параліч одних відділів центральної нервової системи і збудження інших, внаслідок чого розвивається атаксія, скутість рухів, іноді судоми. Можливим джерелом надлишкової кількості олова у продуктах є жерсть консервних банок.

Натомість, зі сполук олова олов'яний водень SnH_4 – це сильна отрута, що спричинює судоми. Деякі органічні сполуки олова є отрутами для нервової системи, вони спричинюють паралічі. При хронічній дії оловотетраметилу і оловотетраетилу передусім страждають зорові нерви.

Олово може в помітних кількостях поступати через шлунково-кишковий тракт при вживанні їжі, особливо соків, у разі зберігання в посуді, що містить олово в складі сплавів, з якого він виготовлений. Нерозчинні сполуки олова майже не всмоктуються в шлунково-кишковий тракт, але і розчинні сполуки вбираються дуже слабо і переважно у вигляді сполук із білками. При цьому солі двовалентного олова всмоктуються легше і у великих кількостях порівняно з чотиривалентним оловом.

Олово має тенденцію нагромаджуватися в живих організмах, причому в кількостях не тільки більших, ніж у довкіллі, а й у концентраціях, що зростають у міру просування по харчових ланцюгах.

Йод дуже розсіяний у природі елемент, його вміст у земній корі за масою становить $4 \times 10^{-5}\%$. Найбільші концентрації йоду є в нафтових водах ($3 \times 10^{-3}\%$) і морській воді (0,06 мг/мл). Проте йод у вигляді солей присутній практично всюди. Вміст йоду в артезіанських свердловинах залежить від йодного рівня місцевості й коливається від 0,01 до 100 мкг/л. Вміст елемента в питних вододжерелах коливається від слідів до 25 мкг/л, у ґрунтових колодязних водах – від 1,0 до 128 мкг/л.

Із живих організмів найбільше йоду у водоростях (5 кг на тонну висушеної морської капусти (ламінарії)). Як біофільний мікроелемент, йод має велике значення для організму тварин і людини. Споживання йоду рослинами залежить від вмісту в ґрунтах і від виду рослин. Організми-концентраторами йоду є деякі морські губки (накопичують до 8,5%), морські водорості (до 1%).

Йод концентрується у ґрунтах, мулах, які утворюються за участю організмів, а також міститься у тонкодисперсних породах, багатих на органічну речовину. Крім того, йод розсіяний у вигляді слідів у всіх гірських породах. Отже, і органічна речовина і гірські породи, можуть бути джерелом надходження йоду у природні води. Важливим джерелом йоду в ґрунтах і водах є дощові опади, які захоплюють його з атмосфери, до якої він потрапляє з вітром із боку моря.

Багатими джерелами йоду є морепродукти: морська капуста, оселедець, камбала, лосось; у менших кількостях – шпинат, морква, ананаси. Для мешканців тих районів, де продукти і вода містять мало йоду, дієтологами була спеціально розроблена йодована сіль.

Надлишок йоду в організмі виражається в появі висипки, вугрів на шкірі, періодично виникає нудота, головний біль, зрідка м'язова слабкість, депресії, металевий присмак у роті. Надлишок елемента пригнічує активність щитоподібної залози, тоді виникає уповільнення серцевого ритму, підвищення ваги.

Дуже небезпечним є *радіоактивний ізотоп йоду* – ^{131}I . Йод-131 – це радіонуклід із періодом напіврозпаду 8,04 доби, β - і γ -випромінювач. Накопичення в щитоподібній залозі великих кількостей йоду-131 спричинює радіаційне ураження секреторного епітелію і зумовлює гіпотиреоз – дисфункцію щитоподібної залози. Зростає також ризик злоякісного переродження тканин. Мінімальна доза, при якій є ризик розвитку гіпотиреозу у дітей, – 300 рад., у дорослих – 3400 рад. У жінок ризик розвитку пухлин у чотири рази вищий, ніж у чоловіків, у дітей у 3-4 рази вищий, ніж у дорослих. Забруднення територій йодом-131 від вибуху на ЧАЕС зумовило великі дози опромінення щитоподібної залози у людей, що призвело в наступному до значного збільшення її патології.

Стабільний йод і його сполуки використовують у медицині, аналітичній хімії, а також в органічному синтезі та фотографії.

ГДК йоду у воді 0,125 мг/дм³, в повітрі 1 мг/м³.

Опишемо умови токсичності хімічних елементів *третього класу токсичності*.

Залізо належить до найпоширеніших елементів і вміст його у масі земної кори становить приблизно 4,65%. Загальна кількість елемента у ґрунті може коливатися в межах 0,002–10%, у середньому вона становить приблизно 2%. У воді залізо присутнє головню у двовалентному і тривалентному станах. У добре аерованій воді концентрації заліза рідко бувають великими. Присутність його в природних водах може бути пов'язана з розчиненням гірських порід і мінералів, дренажем кислих шахтних вод, фільтрацією зі звалищ, скидом стічних вод і стоками металургійної промисловості.



ГДК заліза у водопровідній питній воді не повинна перевищувати $0,3 \text{ мг/дм}^3$, за нормами ЄС – $0,2 \text{ мг/дм}^3$. Із цих міркувань залізо належить до III класу небезпеки.

За значень pH , властивих для питних вод, солі двовалентного заліза випадають в осад у вигляді нерозчинного гідроксиду заліза – іржі. Така вода неприємна на смак, зафарбовує білизну, водопровідну арматуру і сантехнічне обладнання. Залізо, що осідає в розподільній системі, знижує плин води і прискорює ріст залізобактерій.

Залізо є поживним макроелементом для рослин. Вони використовують його у формі іонів Fe^{2+} і Fe^{3+} , а також хелатів. Наприклад, рослини поглинають від 2 до 2500 заліза г/га. Одночасно вони виділяють в ґрунт хелатори (наприклад, органічні кислоти), які зв'язують у ньому залізо, утворюючи хелати. На засвоєння заліза рослинами впливає багато чинників, зокрема, кислотність ґрунту, концентрація деяких катіонів. Мідь, яку використовують у вигляді мідного купоросу для захисту рослин, погіршує поглинання ними заліза. Нормальному засвоєнню заліза перешкоджає надмірна концентрація важких металів – Ni, Mo, Zn, Co, V. Залізо у рослинах бере участь у важливих фізіологічних процесах. Якщо в ґрунті концентрується велика кількість Fe^{2+} , рослини можуть проявляти ознаки отруєння. Наприклад, на землях рисових плантацій, а також на землях з великим рівнем засвоєності заліза на листках з'являються бронзові плями, а згодом вони цілком стають бронзовими.

Залізо є мікроелементом для людей і тварин. Понад половина заліза тваринного організму знаходиться в гемоглобіні. Нестача заліза у процесі утворення гемоглобіну призводить до анемії.

При вживанні їжі або води з концентрацією заліза більше $0,3 \text{ мг/л}$ існує загроза появи алергічних реакцій, сухості шкіри, збільшується ризик інфарктів, порушень і патологій репродуктивної системи.

Виділяється залізо з організму в основному через стінки товстого кишечника, а також незначна кількість через нирки із сечею. Обмін заліза в організмі залежить від функціонування печінки. При порушеннях її роботи може розвиватися залізодефіцитна анемія або зворотне явище – надлишкове накопичення заліза в організмі. При цьому вміст заліза в печінці може досягати 20–30 г, а також ймовірна підвищена його концентрація у підшлунковій залозі, нирках, міокарді, інколи в щитоподібній залозі, м'язах, епітелії язика.

Марганець – 14-й елемент за поширеністю на Землі, а після заліза – другий важкий метал, що міститься в земній корі. Вміст марганцю в ній за масою становить 0,1%, у морській воді – $2 \times 10^{-7}\%$, у живій речовині Землі – $1 \times 10^{-3}\%$, в ґрунті – $8,5 \times 10^{-2}\%$.

Марганець є незамінним поживним мікроелементом як для рослин, так і для тварин. Первинним джерелом надходження його у ґрунт є вивіт-

рювання металів і їх біогенне накопичення в едафотопі біогеоценозів. У аграрні землі він потрапляє разом з рослинними рештками та перегноем. Втрати марганцю часто пов'язані з опадами, які його вимивають, головним чином із кислих ґрунтів, де він є у розчинній двовалентній формі. У помірній зоні атмосферні опади вимивають упродовж року приблизно 250 г/га марганцю. За той же період із сільськогосподарських земель разом з урожаєм його вилучають приблизно 100–200 г/га.

Рослини засвоюють двовалентний марганець із його розчинних солей. Кількість марганцю, яку поглинають рослини, коливається в межах 200–1500 г/га, залежно від виду рослин, доступності, а також різних чинників, які впливають на його вбирання корінням. Найбільше марганцю серед сільськогосподарських культур забирають із ґрунту коноплі і буряк. У рослинному організмі марганець розподілений нерівномірно та переважно становить декілька десятків ppm у сухій масі (пшениця: зерно – 34,4; солома – 25,4; жито: зерно – 45,1; солома – 32,1; буряк цукровий: в корені – 22,0; в гичці – 426; у насінні люпину – 143,1; у сіні конюшини – 52,5). Є види рослин, які концентрують марганець – манганофіли. Їх багато серед флори лісів і водойм та порівняно мало серед степових рослин. Потреба рослин у марганці зумовлена різними його функціями в метаболізмі рослин, зокрема, таких важливих, як інтенсифікація процесу фотосинтезу та дихання рослин. У рослинах він прискорює утворення хлорофілу і підвищує їх здатність синтезувати вітамін С. Тому внесення марганцю в ґрунт із добривами помітно підвищує врожайність багатьох культур. Нестача марганцю призводить до різних хвороб рослин (сіра плямистість вівса, хлорози тощо).

Добова потреба людини в марганці становить 5–7 мг. Із усієї кількості елемента, що поступає всередину, всмоктується лише приблизно 3%. Він необхідний для функціонування ферментів, що беруть участь у формуванні кісткової і сполучної тканини, регуляції глікогенезу. ГДК марганцю у водопровідній воді має бути не більше 0,1 мг/л.

За рівнем фізичної поширеності в земній корі **стронцій** займає 23-є місце – його частка за масою становить 0,014%. Ступінь токсичності стронцію залежить не тільки його вмісту в ґрунті й воді, але й співвідношенням кальцію і стронцію. Відношення Ca/Sr в породах земної кори становить 90/1, в ґрунтах – 40–50/1, у різних ріках України від 384/1 до 61/1. Несприятливо низьке співвідношення виявлене в річкових водах сульфатного типу. ГДК стронцію в питній воді 7 мг/л.

Стронцій є подібним за хімічними властивостями до кальцію, тому міститься в мікроорганізмах, рослинах і тваринах. Він найбільше відкладається у кістковій тканині, у м'яких тканинах затримується менше 1%. З великою інтенсивністю накопичується цей елемент в організмі дітей до 4-річного віку, коли триває активне формування кісткової тканини. Шляхи потрапляння

стронцію в організм людини різні. Це – питна вода, їжа (помідори, буряк, зелені овочі, ячмінь, жито, пшениця), легеневе дихання й ін.

Негативний вплив нерадіоактивного стронцію проявляється у край рідко і тільки за дії інших чинників (дефіцит кальцію і вітаміну Д, неповноцінне харчування, порушення співвідношення мікроелементів – таких як барій, молібден, селен та ін.). За такого збігу порушень він може зумовити у дітей "стронцієвий рахіт", ураження і деформацію суглобів, затримку росту.

Проте, **радіоактивний стронцій** – ^{90}Sr практично завжди негативно впливає на організм людини. Відкладаючись у кістковій тканині, він зумовлює інкорпороване опромінення кісткового мозку. Це збільшує ризик захворювання раком кісткового мозку, а за надходження великої кількості ^{90}Sr може виникнути променева хвороба. Ізотоп стронцію ^{90}Sr має період напіврозпаду 28,9 років. Повний розпад цього радіонукліда настає лише через декілька сотень років. Забруднення територій України радіоактивним стронцієм від вибуху на ЧАЕС 1986 року і потрапляння його в ґрунти з повітря значно погіршило умови вирощування сільськогосподарської продукції.

Хлор становить 0,025% від загальної кількості атомів земної кори. Найбільші запаси хлору містяться у солях океанічної води – 19 г/л. Людський організм містить 0,25% іонів хлору за масою.

Хлор належить до найважливіших біофільних елементів і входить до складу усіх живих організмів. У тварин і людини іони хлору беруть участь у підтриманні осмотичної рівноваги клітин. У шлунку іони хлору створюють сприятливе середовище для дії протеолітичних ферментів шлункового соку. Хлор накопичується у вісцелярній тканині, шкірі і скелетних м'язах. Всмоктується хлор, в основному, в товстому кишківнику. У клітинах акумулюється 10–15% усього хлору, з цієї кількості від 1/3 до 1/2 – в еритроцитах. Близько 85% хлору знаходяться в міжклітинному просторі. Хлор виводиться із людського організму в основному із сечею (90–95%), калом (4–8%) і через шкіру (до 2%).

Чистий молекулярний хлор (Cl_2) – токсичний задушливий газ жовто-зеленого кольору з різким запахом, важчий за повітря у 2,5 раза. Газоподібний хлор був однією з перших хімічних отруйних речовин, використаних у військових бойових діях у першу світову війну. Газ конденсується в рідину за температури -34°C , затвердіння настає за $-101,3^\circ\text{C}$. Хлор розчиняється у воді й деяких органічних розчинниках, його добре адсорбує активоване вугілля.

Хлор має широке застосування через інтенсивну окислювальну дію (відбілювач, дезінсекційний і дезінфікуючий засіб). Транспортують хлор у рідкому стані. Нещасні випадки найчастіше пов'язані з розгерметизацією резервуарів або газопроводів. Подразнювальна дія на дихальні шляхи можлива за концентрації в повітрі приблизно 0,006 мг/л (тобто вдвічі вище, ніж поріг сприйняття запаху хлору). ГДК хлору в атмосферному

повітрі наступні: середньодобова – 0,03 мг/м³, максимальні разова – 0,1 мг/м³. ГДК у робочих приміщеннях промислового підприємства – 1 мг/м³.

14.3. Токсичні сполуки сірки й азоту

Сполуки сірки. З-поміж простих мінеральних екотоксикантів сполуки сірки привертають найбільшу увагу, як найпоширеніші у довкіллі техногенні полютанти, що чинять різнобічний вплив на біогеохімічні процеси в наземних і водних екосистемах планети.

Сірка (Сульфур) є шістнадцятим за поширеністю елементом у земній корі. Трапляється у вільному (самородному) стані та у вигляді різних сполук. Сірка, як життєво важливий елемент, входить до складу амінокислот цистеїну та метіоніну, вітамінів біотину й тіаміну, ферментів. У тілі людини міститься приблизно 2 г сірки на 1 кг маси.

Найважливіші природні сполуки сірки: FeS₂ – залізний колчедан (пірит), ZnS – цинкова обманка (сфалерит), PbS – свинцевий блиск (галеніт), HgS – кіновар. Сірка присутня у нафті, кам'яному й бурому вугіллі, природних газах і сланцях. Сірка – шостий елемент за змістом у природних водах, присутня в основному у вигляді сульфат-іона і зумовлює жорсткість прісної води. Найбільшу небезпеку становлять сполуки сірки, які потрапляють в атмосферу від спалювання вугілля, нафти і природного газу, а також при виплавці кольорових металів і виробництві сірчаної кислоти. Антропогенні викиди сірки в двічі перевищують її природне вивільнення.

Сірку та її сполуки застосовують для виготовлення сірників і пороху, для виробництва сірчаної (H₂SO₄) і сірчистої (H₂SO₃) кислот, металів, барвників, для вулканізації каучуку, для дезінфекції і знищення комах, для боротьби з грибовими захворюваннями фруктових дерев і плодів.

Токсична дія пилу самородної сірки дуже слабка, гострі отруєння виключені. Проте, можливий негативний вплив сірки за постійного потрапляння в організм великої її кількості. У робітників, які працюють на сірчаних рудниках, окрім суб'єктивних розладів (скарги на головний біль, підвищену втому тощо), спостерігали подразнення верхніх дихальних шляхів, гастрит, шкірні захворювання, зниження кров'яного тиску. Були випадки змін у кістках черепа, запальні захворювання кісток верхньої щелепи і основи черепа. В особливо вразливих людей порошкоподібна сірка спричиняє екзему.

Якщо самородна сірка не володіє виразними токсичними властивостями, багато її сполук дуже отруйні.

Сірководень (H₂S) викидають у повітря окремо або разом з іншими сірковмісними сполуками підприємства, що виготовляють штучне волокно, цукор, а також нафтопереробні й коксохімічні заводи. Особливостями



цих забруднювачів є різкий, неприємний, подразливий запах і дуже сильна токсичність. Вони в 100 разів токсичніші від сірчаного газу. В атмосфері сірководень повільно окислюється до сірчаного ангідриду. У природі сірководень утворюється від діяльності вулканів і сульфатредукційних бактерій. Їхню дію можна спостерігати у місцях, де є нестача кисню. Це – донні відклади річок, боліт, озер і морів, у портах і районах стоку забруднених вод із суходолу, в каналізаційних мережах міст. Сульфатредукційні бактерії відщеплюють кисень від молекул сульфатної кислоти та її сполук, що містяться у стоках і застійних водах, і виділяють сірководень. Якщо ця сполука утворює чорні сульфідні речовини, то вони не шкідливі. Проте, вільний сірководень дуже небезпечний. Він має різкий запах тухлих яєць і густину $1,19 \text{ г/дм}^3$, добре розчиняється у воді. Цей газ легко поглинається слизовими оболонками очей, носа, дихальних шляхів. У значних кількостях він дуже подразнює ці органи, роз'їдає їх, призводить до запалення трахеї, бронхів, легень і навіть до смерті. Внаслідок тривалої дії незначних концентрацій сірководню виникають подразнення шкіри, висипка, фурункули. Одне-два вдихання газу великих концентрацій зумовлює параліч органів дихання й смерть. Також ця сполука спричинює розвиток атеросклерозу.

Сірковуглець (CS_2) – безбарвна рідина з неприємним запахом. Погано розчиняється у воді. Випари сірковуглецю легкозаймисті, а в суміші з повітрям – вибухають. Вдихання пари сірковуглецю діє на людину наркотично: з'являється головний біль, оніміння кінцівок, порушення дихання, а за високих концентрацій і тривалого впливу настає глибокий наркоз, зникають усі рефлексі, смерть. Великі кількості сірковуглецю витрачають на боротьбу із шкідниками с.-г. культур, але більше його використовують на виготовлення віскози. Сірковуглець одержують пропусканням пари сірки крізь шар розжареного вугілля. За тривалого зберігання сірковуглець жовтіє і набуває неприємного запаху.

Сірководень і сірковуглець належать до II класу небезпечності.

Чиста сірка завдяки простим хімічним реакціям перетворюється у два оксиди: (IV) SO_2 і (VI) (SO_3). **Діоксид сірки** (IV) SO_2 – це безбарвний важкий газ (у 2,2 раза важчий від повітря), з різким запахом, що спричинює кашель, не горить і дуже легко розчиняється у воді. Найважливіша галузь його застосування – виробництво сірчистої кислоти H_2SO_3 . Діоксид сірки токсичний. Невелика концентрація його у повітрі зумовлює подразнення слизових оболонок дихальних органів і очей. Діоксид сірки – один із найпоширеніших техногенних забруднювачів, який отрує доквілля. Потрапляючи у повітря ця сполука зумовлює випадання "кислотних дощів", шкідливих для нормального перебігу життєвих процесів як у природних, так і штучних (аграрних) екосистемах. Природним джерелом SO_2 може бути окиснення сірководню атмосферним киснем та озоном.

ГДК максимальної разової дії SO_2 – 0,5 мг/м³.

Триоксид сірки (IV) SO_3 – безбарвна рідина, яка за температури нижчої від 17°C кристалізується, перетворюючись на довгі шовковисті кристали. Зберігають його у запаяних скляних посудинах. Це – дуже летка речовина, сильний окисник, на повітрі димить. Триоксид сірки токсичний, уражує слизові оболонки й головним чином верхні дихальні шляхи, спричинює тяжкі опіки шкіри, енергійно руйнує органічні сполуки. Бурхливо взаємодіє з водою з виділенням великої кількості тепла, утворюючи сульфатну кислоту, для чого його і використовують у виробництві. У лабораторній практиці його використовують як водовбирний засіб.

Сірковмісні забруднювачі, які щорічно десятками мільйонів тонн викидають в атмосферу великі промислові підприємства в усьому світі, вітри переносять на величезні відстані. Безпосередньо навколо джерел забруднення виявлені виразні токсикози у зелених насаджень. Вони проявляються у вигляді некротичних крапок, або суцільного пошкодження листових пластинок дерев, особливо голок хвойних порід. Хвойні ліси і хвойні породи (сосна, ялина) є найменше стійкими до інтоксикації сірковмісними поллютантами.

Сполуки азоту. Азот (Нітроген) – N_2 інертний газ без кольору, смаку і запаху, що в атмосфері за масою становить 75,6%, за об'ємом – 78%. Вміст азоту в земній корі за різними оцінками – $0,7\text{--}1,5 \times 10^{15}$ т, в гумусі ґрунтів – приблизно 6×10^{10} т. Сполуки азоту є невід'ємними компонентами живих органічних молекул. У складі білків азоту є 16–18% за масою. Сполуки азоту становлять основу нуклеопротейдів, хлорофілу, гемоглобіну тощо. Вони необхідні для існування усіх живих організмів біосфери.

Кругообіг азоту є необхідною умовою життя на Землі (рис. 14.2). Щорічно біота планети засвоює приблизно 1 млрд. т азоту. Із цієї кількості лише 20% його надходить із атмосфери завдяки абіотичній активації та головно біотичній фіксації. Абіотичне надходження: атмосферна іонізація, розряди, вулканічні викиди тощо, разом надають біосфері лише двадцяту частину тієї кількості, яку фіксують її живі компоненти. Білкові сполуки мертвих тканин та організмів на останній стадії біотичної деструкції піддаються мікробному дезамінуванню, тобто вивільненню аміаку, котрий є ресурсом мінерального живлення азотом у відновленій формі солей амонію або окислених формі нітратів і нітритів. Загальний обсяг надходження активного азоту в біосферу природно збалансовувався адекватною кількістю його виведення з неї головно завдяки денітрифікації та геологічним відкладам у літосферу. Проте, теперішнє зовнішнє втручання у природний кругообіг азоту, зумовлене додатковим привнесенням в екосистеми активних його сполук, має як корисні, так і шкідливі й не передбачувані наслідки.

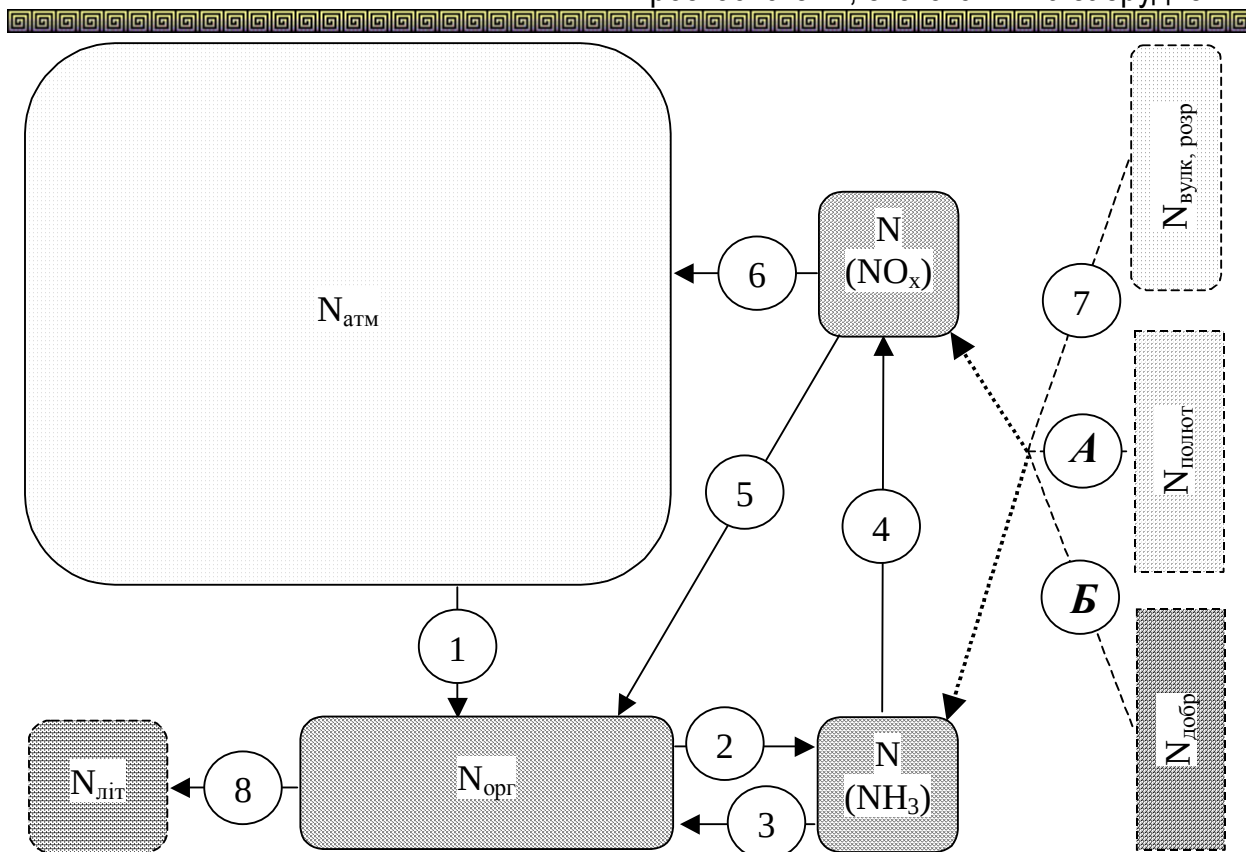


Рис. 14.2. Схема кругообігу й перетворення азоту в екосистемах і зовнішні антропогенні емісії його активних сполук (Гнатів, 2003):

1 – азотфіксація; 2 – амоніфікація; 3 – аміачне живлення; 4 – нітрифікація; 5 – нітратне живлення; 6 – денітрифікація; 7 – абіотичне природне надходження;
8 – геологічні відклади;
А – викиди промисловості й транспорту; **Б** – азотні добрива

Щорічно в аграрному господарстві Світу використовують 300 млн. т добрив (головно азотних). Упродовж 1895-1911 років Фріц Габер розробив фізико-хімічні основи промислового виробництва аміаку. Це був революційний винахід, який дав людству потужне джерело азотних добрив.



Фріц Габер
(1868-1934)

За такий винахід Ф. Габер 1919 року був удостоєний Нобелівської премії з хімії. Реакція (процес) Хабера-Боша передбачає синтез аміаку безпосередньо з елементарного азоту N_2 і водню H_2 . Від початку XX ст. це призвело до виробництва величезної кількості азотних добрив, що сприяло збільшенню світового виробництва аграрної продукції.

Окрім перекислених вище джерел в атмосферу від промисловості й транспорту потрапляє $65 \text{ млн. т} \cdot \text{рік}^{-1}$

азотовмісних полютантів. Лише автомобілі у великих містах можуть викидати від 20 (Великобританія) до 70% (Україна) оксидів азоту від загального обсягу техногенних емісій. Розрахунок показує, що обсяг глобальної річної емісії сполук азоту досяг 30% від кількості його додаткового природного надходження в біосферу.

Незважаючи на те, що газоподібний азот доволі інертний за нормальних умов, при підвищеному тиску (наприклад при плаванні з аквалангами глибоко під водою) він спричинює наркоз, сп'яніння або задуху (за дефіциту кисню). За швидкого зниження тиску (підняття із глибини на поверхню моря) азот у крові зумовлює кесонну хворобу.

Велика кількість сполук азоту дуже активні і нерідко токсичні. Усі оксиди азоту фізіологічно активні, і належать до третього класу небезпеки. Оксид діазоту N_2O має наркозний ефект і його використовують у хірургічній практиці. Оксид азоту NO – сильна отрута, що чинить вплив на ЦНС, а також зумовлює ураження крові за рахунок зв'язування гемоглобіну. Відносно сильну токсичність (за концентрації вище 0,05 мг/л) має диоксид азоту NO_2 . Він подразнює дихальні шляхи й гальмує аеробне окислення в легеневій тканині, що призводить до розвитку токсичного набряку легенів.

Нітрати є солями азотної (HNO_3), **нітрити** – азотистої кислоти (HNO_2). Нітриту легко окислюються у нітрати. Концентрація перших у середовищі переважно дуже низька (у воді, наприклад, 1–10 мг/дм³), водночас концентрація нітратів вагомо більша (50–100 мг/дм³). Із нітратів найвідоміші нітрати амонію, натрію, калію, кальцію, які переважно називають селітрами. Усі селітри широко і давно застосовують в якості мінеральних добрив.

Нітрати і нітриту застосовують у харчовій і скляній промисловості, для отримання ракетного палива, піротехнічних і вибухових речовин, використовують у гумовому і текстильному виробництвах, гальванотехніці і медицині. Нітрати і нітриту відомі як консерванти для продуктів харчування. Значна частина (біля 40%) нітритів поступає в організм із м'ясними і рибними продуктами, нітрати ж людина отримує, головним чином, з овочами. Показники вмісту нітратів і нітритів в деяких харчових продуктах подані в табл. 14.7.

Найбільшою здатністю до акумуляції нітратів володіють представники гарбузових (дині, огірки, гарбузи, кавуни), капустяних, амарантових. Існує значна різниця щодо схильності накопичувати нітрати між сортами однієї і тієї ж культури. Продукти тваринного походження містять відносно менші концентрації нітратів і нітритів. У зв'язку із різним вмістом цих агентів в харчових продуктах, у різних країнах широко варіюють і норми їх добового споживання.

Токсичний вплив нітратів і нітритів зупиняє ріст мікроорганізмів і спричинює харчові отруєння. За нормального перебігу процесів нітрати й

нітрити абсорбуються в кишково-шлунковому тракті. При цьому нітрати швидко виділяються з організму. Натомість, нітрити реагуючи з гемоглобіном крові перетворюють його у метгемоглобін, який на відміну від гемоглобіну не здатний служити носієм кисню. Ця властивість нітритів визначає багато інших фізіологічних ефектів. Нітрати менше токсичні, порівняно з нітритами, і вони не окислюють гемоглобін і не призводять до метгемоглобінемії. В організмі нітрати можуть утворюватися із амонію. За участі бактерій нітрати перетворюються в нітрити.

Табл. 14.7. Вміст нітратів і нітритів у рослинних харчових продуктах (мг/кг сирих продуктів)

Продукт	Нітрати	Нітрити
Редька чорна	700–2520	1,12
Буряк червоний	40–3200	0,80
Капуста білокачанна	10–1900	0,25
Капуста цвітна	144–577	0,47
Картопля	5–22	0,32
Томати	7–39	2,0
Редиска (осіння)	121–1593	1,77
Редиска (парникова)	1805–2160	4,6
Селера	1852	1,19
Петрушка (корінь)	90–1848	1,44
Полуниця	49,7	0,22
Журавлина	20,1	0
Яблука	1,2–99,2	0
Сливи	6,4–66,5	0
Гарбузи	10–300	–
Дині	35–201	–
Хліб житній	36,9	0,18
Пшениця (зерно)	10,0	185,0
Мука пшенична	8,9	0
Молоко незбиране	0,1–7,8	0
Сир	0,1–3,5	0
Бринза овеча	1,6–6,5	0,05–0,55

Токсичний вплив нітратів і нітритів доволі повно вивчений на різних видах тварин, у т.ч. на гідробіонтах, і на людині. Смертельна доза нітратів для людей становить 8–15 г, нітритів істотно нижче – 0,18 г для дітей і літніх людей, і 2,5 г – для дорослих.

Нітрид водню (NH_3) – **аміак**, важлива та невід'ємна ланка в кругообігу азоту в біосфері, продукт діяльності мікроорганізмів-азотфіксаторів, які зв'язують атмосферний азот. Аміак – безбарвний газ із різким запахом (у

побуті відомий за запахом нашатирного спирту), майже удвічі легший від повітря, надзвичайно добре розчинний у воді, дуже токсичний.

Аміак є поширеним продуктом хімічної промисловості. Його світове щорічне виробництва становить приблизно 150 млн. т. За потрапляння в довкілля аміак є небезпечним забруднювачем атмосфери і води, агресивним токсикантом щодо зелених насаджень і тварин. Здебільшого аміак використовують для виробництва азотних добрив (нітрат і сульфат амонію, сечовина), вибухових речовин і полімерів, азотної кислоти, соди й інших продуктів хімічної промисловості. Рідкий аміак використовують як розчинник. У холодильній техніці використовують аміак як холодильний агент. У медицині 10% розчин аміаку (нашатирний спирт), застосовують для виведення із непритомного стану (для збудження дихання), для стимуляції блювоти, а також зовнішньо (невралгії, міозити, укуси комах тощо).

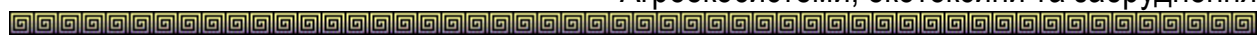
Аміак також є кінцевим продуктом азотистого обміну в організмі людини і тварин. Він утворюється в наслідок катаболізму білків, амінокислот та інших азотистих сполук. Надлишок його в організмі має токсичний ефект, тому в печінці він перетворюється в сечовину й виводиться нирками. При інгаляційному потраплянні в організм цей газ спричинює токсичний набряк легенів і важке ураження нервової системи. Аміак володіє як резорбтивною, так і місцевою дією. Пари аміаку сильно подразнюють слизові оболонки очей і органів дихання, а також шкірні покриви, спричинюють сильну сльозотечу, біль в очах, хімічний опік рогівки, втрату зору, напади кашлю, почервоніння і свербіж шкіри. За потрапляння на шкіру зрідженого аміаку і його розчинів виникає печіння, хімічний опік із пухирями, виразками.

ГДК аміаку в повітрі робочої зони виробничого приміщення становить 20 мг/м³, в атмосферному повітрі населених пунктів середньодобова 0,04 мг/м³, максимальна разова 0,2 мг/м³.

Особливо небезпечні **нітрозаміни**, які є дуже токсичними азотними сполуками. За потрапляння в організм вони вражають в печінку, спричинюють крововиливи, конвульсії, можуть спричинити коматозний стан. Велика частина нітрозамінів має сильну канцерогенну дію навіть при однократовій дії, проявляють мутагенні властивості. Проте, N-нітрозо-N-метилсечовина має протипухлинну активність.

Нітрозосполуки широко застосовують у промисловості в якості компонента ракетного палива, антиоксидантів (Коваленко та ін., 2002). Вони є проміжними продуктами синтезу барвників, лікарських препаратів тощо. Нітрозосполуки входять також до складу протикорозійних препаратів, їх застосовують як пестициди і протипухлинні агенти.

Винятково важливою особливістю нітрозамінів (НДЕА і НДМА) є можливість їх утворення із хімічних попередників в об'єктах довкілля, у продуктах харчування і навіть в організмі (табл. 14.8).



Нітрозаміни також знайдені в тютюновому димі (табл. 14.9) і деяких алкогольних напоях. Наприклад, із 56-ти зразків японського пива у 24-х знайдено НДМА в концентраціях від 1 до 4,2 мкг/кг, а в США у всіх досліджених 18 сортах – від 0,4 до 7,0 мкг/кг. Встановлено, що в шлунковому соку тварин і людини з нітратів і вторинних амінів або амідів можуть утворюватися N-нітрозосполуки. Максимальний рівень синтезу НДМА спостерігали за pH 3,4 і температури 37°C.

Табл. 14.8. Середній вміст N-нітрозодиметиламіна (НДМА) у денному раціоні мешканців Японії

Харчовий продукт	Денна кількість, г	Середня концентрація, мкг/кг	Споживання, кг/ос./добу
Солені і копчені м'ясні продукти	12	0,5	0,006
Жарена і вялена риба	54	30	1,62
Рибні консерви і продукти	5	5	0,025
Молочні продукти, яйця, куряче м'ясо	76	0,7	0,53
Соуси і приправи	6	0,2	0,001
Жири і масла	18	0,9	0,016
Пиво	30	1,6	0,05
Мариновані овочі, соєві боби	27	0,3	0,008

Табл. 14.9. Концентрація нітрозамінів у цигарковому димі (нг на 1 цигарку)

Нітрозаміни	Комерційні цигарки	
	без фільтру	з фільтром
М-Нітрозодиметиламін	2–20	0,1–17
N-Нітрозометилетиламін	0–2,7	0–2,5
N-Нітрозодіетиламін	0,6–6,0	0–7,6
N-Нітрозоді-n-пропіламін	0–1,0	0
N-Нітрозоді-n-бутиламін	0–3,0	0
М-Нітрозопірролідін	0–110	1,5–3,0
N-Нітрозопіперідін	0–9	0
N-Нітрозодіетаноламін*	36	24
N-Нітрозонорнікотин*	120–950	310
4(Метилнітрозаміно)-1-3-піриділ)-1-бутанол*	80–770	150
N'-Нітрузоанатабін*	140–990	370

Примітка: * Тютюноспецифічні М-нітрозосполуки

Токсичність нітрозамінів для людини була встановлена 1937 року. Ці агенти володіють широким спектром біологічних ефектів, проте головною і, очевидно, найнебезпечнішою їх властивістю є здатність спричинювати пухлини. Історія відкриття канцерогенності нітрозосполук почалася, коли на норкових фермах Норвегії та Англії сталося масове вимирання тварин. Причиною було додавання до корму оселедцевої муки, при готуванні якої утворюються нітрозаміни, ідентифіковані пізніше фізико-хімічними методами.

Встановлено, що із 332-х різних нітрозосполук, вивчених до кінця минулого десятиріччя, 290 (87%) виявилися здатними спричинювати пухлини в експерименті на тваринах. У всіх 40 видів тварин, на яких досліджували канцерогенну дію нітрозамінів виникали злоякісні новоутворення. Для прояву токсичних, мутагенних і пухлиноподібних властивостей, нітрозосполуки потребують їх активації в організмі. Така активація відбувається за допомогою мікросомних ферментів у печінці та в інших органах, де згодом виникають пухлини. Метаболіти нітрозамінів перетворюються у надзвичайно реактивні електрофільні сполуки, які реагують з клітинними макромолекулами (перш за все із ДНК), що призводить до утворення пухлин.

Нітрозосполуки виявляють також трансплацентарну дію і за потраплення в організм вагітних самиць спричинюють токсичний ефект на ембріони, що призводить до розвитку вироджень і/або пухлин у потомства. Встановлено що ембріон найчутливіший до летальної дії нітрозосполук у перші дні вагітності, до канцерогенного впливу – на стадії гістогенезу, і до тератогенного – на стадії органогенезу. З екстраполяцією цих спостережень на людину дослідники зробили висновки, що найбільший ризик ембріотоксичної дії припадає на перший і третій-шостий тижні вагітності, тератогенної – на другий-восьмий, а канцерогенної – на період пізніше шести тижнів вагітності. Дія N-нітрозосполук є канцерогенно небезпечною не тільки для потомства першого покоління, але й наступних.

Нітрозосполуки володіють різноманітними мутагенними ефектами. Вони здатні спричинювати у різних біологічних об'єктів генні мутації та хромосомні зміни.

14.4. Стійкі органічні забруднювачі

Переважає більшість синтетичних сполук – органічні речовини, тобто такі, що містять вуглець – елемент, який лежить в основі живої речовини. Масове виробництво синтетичних органічних сполук розпочали в 30-х роках ХХ ст. і відтоді його обсяг зростає. Сумарне світове виробництво 150 тис. т у 1935 р. до 1995 р. становило вже 150 млн. т. Деякі із використовуваних синтетичних органічних речовин не мають прямого відчутного впливу на

довкілля, зокрема ті, які використовують у фармакології, косметичі, харчових продуктах. Але різноманітні фарби, дезінфікуючі засоби, домішки до пластмас, металоорганічні сполуки й пестициди потрапляють у навколишнє середовище у великих кількостях і створюють загрози для біоти і людини. Особливо небезпечні ті, що є біодоступними та мають тривалий період життя у довкіллі.

Речовини, відомі як **стійкі органічні забруднювачі** (СОЗ), є переважно найбільше токсичними й небезпечними хімічними сполуками. Вони належать до різних класів хімічних сполук, але їх об'єднують чотири загальні властивості:

- 1) надзвичайна або сильна токсичність (І-ІІ клас);
- 2) стійкість до розкладання та збереження у довкіллі упродовж багатьох років і десятиліть із наступним розпадом до менш небезпечних форм;
- 3) легкість випаровування та швидка міграція на великі відстані у повітрі й воді;
- 4) акумулятивність у жирових тканинах.

За своїми особливостями дванадцять стійких органічних забруднювачів, які включені до Стокгольмської конвенції про СОЗ розподілені на 3 групи.

Перша група СОЗ – сильнотоксичні пестициди (ДДТ, діелдрин, алдрин, гептахлор, мірекс, токсафен, ендрин, хлордан, гексахлорбензол).

Друга група СОЗ – промислові продукти (поліхлоровані біфеніли – ПХБ).

Третя група СОЗ є особливою групою. Вона представлена так званими діоксинами – групою сполук, що утворюються як побічні продукти деяких виробництв. Вони постійно присутні в незначній кількості у будь-яких виробничих процесах, які включають хлор, і особливо при високотемпературних процесах.

Небезпечними екотоксикантами є пестициди, якщо їх невміло використовувати.

За підрахунками аналітиків щорічно від третини до половини світових запасів продуктів поїдають або пошкоджують комахи, плісняві грибки, гризуни, птахи й інші шкідники. Вони знищують урожай і в полі, і при його зборі, навантаженні, транспортуванні та зберіганні. У випадку успішної боротьби з комахами і хворобами, які знищують зернові культури, щорічний приріст урожаю становив би приблизно 200 млн. т зерна, чого вистачило би для харчування 1 млрд. осіб.

За створення першого ефективного **пестициду** для захисту с.-г. культур від комах 1938 року швейцарський хімік П. Мюллер був удостоєний Нобелівської премії 1948 року. Цей інсектицид має назву **дихлордифенілтрихлоретан** і в екотоксикології нині добре відомий як ДДТ (рис. 14.3).

Проявляючи надзвичайні інсектицидні властивості ДДТ дійсно істотно підвищує врожайність, дає вагомі економічні результати в сільському господарстві та боротьбі з комахами, які переносять важкі інфекції. Під час другої світової війни ДДТ застосовували проти вошей, які поширювали висипний тиф, і це зберегло життя мільйонам людей. Використання ДДТ для знищення комарів-переносників малярії стрімко знизили смертність від цього захворювання. Якщо ще 1948 року лише в Індії загинуло від малярії більше 3 млрд. осіб, то 1965 року у цій країні не було зареєстровано жодного випадку смерті від цієї недуги. Завдяки ДДТ удалося взяти під контроль спалахи популяцій саранчі, чим додатково врятувати мільйони людей Азії та Африки від голоду.

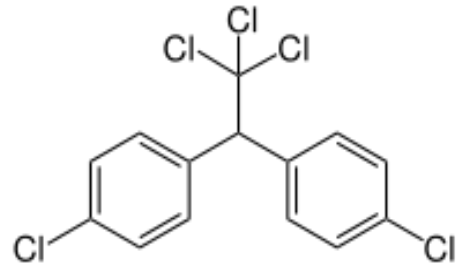


Рис. 14.3. Структура дихлордифеніл-трихлоретану

Проте, через 2-3 десятиріччя були виявлені й негативні еконаслідки масового використання ДДТ і багатьох інших пестицидів. Подальші дослідження показали, що ДДТ впливає практично на всі живі організми. Так, він накопичується в тканинах ссавців і є канцерогеном, мутагеном, ембріотоксином, нейротоксином, імунотоксином. Цей токсикант змінює гормональну систему, спричинює анемію, хвороби печінки. Дуже сильно ДДТ впливає на птахів, призводячи до утворення дуже тонкої шкаралупи яєць, чим перешкоджає нормальному розвитку пташенят. ДДТ також зменшує відтворення у риб і змії. Рух ДДТ харчовими ланцюгами призводить до багаторазового збільшення його концентрації в організмах птахів, риб і ссавців. Промисловість колишнього совєцького союзу виробляла ДДТ від 1946–1947 рр. Упродовж 50–70-х років ХХ ст. використовували приблизно 20 тис. т ДДТ щороку. 1969–1970 років ДДТ виключили із офіційного списку рекомендованих пестицидів в Україні. Проте і після цього виробництво й застосування його не припинили. Навіть 1986 року, через 16 років після офіційної заборони, щорічне виробництво ДДТ становило 10 тис. т. До кінця 80-х років ХХ ст. цей препарат використовували в Узбекистані й у багатьох областях Росії для контролю за спалахами популяцій саранчі.

У нашу добу ДДТ знаходять у жирових тканинах людини, у грудному молоці матерів-годувальниць. Він може потрапляти в систему кровообігу. Аналіз продуктів харчування показує збільшення в них вмісту ДДТ із роками. Так, 1975 року ДДТ знаходили у 8% зразків м'яса, в 5–10% зразків коренеплодів і картоплі. А вже 1988 року в 30% зразків сухого молока для дитячого харчування кількість ДДТ у 5 разів перевищувало допустиму норму. Те ж можна сказати і про 52% зразків дієтичної олії, аналізованої 1989 року.



ДДТ – це агент, використання якого призвело до глобального забруднення довкілля. Встановлено, що вплив ДДТ на середовище географічно істотно ширший, ніж територія його безпосереднього застосування в результаті переходів з ґрунту у воду і повітря, з повітря у воду і т.д., переносу біотою, повітряними масами і океанічними течіями. Отже, сьогодні забруднення довкілля цим інсектицидом набуло повсюдного поширення. ДДТ виявлений навіть в Антарктиді.

У природному середовищі ДДТ поступово втрачає хлор і перетворюється на інші сполуки, що отримали назви ДДЕ та ДДД. Але й вони є теж не менше токсичним агентами довкілля, ніж ДДТ.

Діелдрин, як і ДДТ, є інсектицидом. Він ефективніший і стійкіший, ніж ДДТ. У тих випадках, коли у комах з'являлася стійкість до ДДТ, часто використовували діелдрин. Він також здатний до руху харчовими ланцюгами та накопичення в тканинах живих організмів.

1955 року ВООЗ рекомендувала розпилення діелдрину на Північному Борнео для боротьби з комарами – переносниками малярії. Це призвело до того, що хвороба була цілком ліквідована. Проте, від діелдрину загинули й інші комахи, включаючи мух і тарганів. Потім загинули маленькі ящірки, які жили в будинках. Вони отруїлися, з'ївши мертвих комах. Після цього почали гинути кішки, що з'їдали мертвих ящірок. Це призвело до розмноження пацюків, які робили набіги на села. Над островом нависла загроза чуми, переносником якої були блохи, які паразитують на пацюках. Крім того, в остров'ян почали розвалюватися дахи будинків. Причиною цього було те, що діелдрин знищив ос та інших комах, що харчувалися гусеницями. Зростає кількість гусениць безперешкодно з'їдала листя, з якого були зроблені дахи.

Концентрування діелдрину по харчовому ланцюгу добре ілюструють дослідження біоти, проведені в Балтійському морі. Концентрація діелдрину в зоопланктоні становила 21 нг/кг жиру, тоді як у кінцевій ланці харчового ланцюга – в оселедця вона дорівнювала 121 нг/кг жиру.

Алдрин дуже близький за своєю дією до ДДТ і діелдрину. Він також має велику стійкість та кумулятивність. Алдрин знайдений у молоці, тканинах і крові людей. Він токсичний для ссавців, птахів, риб, ракоподібних, молюсків.

У Німеччині при дослідженні яєць птахів була встановлена присутність у них багатьох хлоровмісних органічних сполук. Так, у 100% яєць була виявлена присутність гексахлорбензолу і *n,n*-ДДЕ (метаболіту ДДТ), у 56% яєць знайдено гептахлор, у 47,2% яєць – алдрин, у 43,5% яєць – діелдрин.

Гептахлор – інсектицид, який використовували для боротьби з ґрунтовими комахами. Ним протравлювали насіння кукурудзи і цукрового буряка. Так само, як і інші хлоровмісні сполуки, він токсичний для ссавців

та інших живих організмів. При застосуванні гептахлору було виявлено, що під впливом ультрафіолетових променів більше 90% гептахлору після його розпилення перетворюється в гептахлорепоксидектон – раніше невідому хімічну сполуку, яка у багато разів токсичніша, ніж первинний.

Мірекс є ефективним інсектицидом. Ця речовина свого часу виявилася єдиним надійним засобом у боротьбі з мурахою *Solenopsis invicta*. Оскільки інсектицид діє ще й на інших шкідливих комах, його певний період вносили літаками на південному сході США. Лише 1976 року, коли з'ясувалося, що він є канцерогеном і серцевим токсикантом, препарат заборонили у США. Проте, в інших країнах, наприклад, у Бразилії, його застосовували до 1990 року.

Токсафен як інсектицид використовували для боротьби зі шкідниками цукрового буряка, гороху, з колорадським жуком. Цей препарат – складна суміш кількох сотень сполук, які утворюються при хлоруванні камфену. Як і інші леткі пестициди, токсафен здатний поширюватися в повітрі, тому його знаходять у повітрі та ґрунтах регіонів, де його раніше не використовували.

Токсафен є одним із найпоширеніших хлоровмісних пестицидів для обробки ґрунтів. Так, у різних районах штату Алабама (США) вміст токсафену в ґрунтах коливається від 3 до 2832 нг/кг сухої маси ґрунту (у середньому 149 нг/кг). У водних організмах концентрації токсафену також дуже високі в усьому світі: у рибах, що живуть у затоці Св. Лаврентія (Канада), вміст токсафену становить 28 мг/кг жиру; у риб Балтики – 6 мг/кг; у форелі Великих Озер США – 25–30 (1982 р.) і 15 мг/кг жиру (1992 р.).

Концентрація токсафену в оселедці Північного моря дорівнює 1–4 мкг/кг сирової ваги; у китів затоки Св. Лаврентія – 23 мг/кг; у дельфінів Північного моря – 19 мг/кг живої маси. У риб токсафен спричинює ушкодження хребта. Хребці стають дуже тендітними і при різкому русі легко ламаються, що приводить до паралічу задньої частини тіла і загибелі риб.

В організм людини токсафен потрапляє в основному з рибою. Люди, які харчуються нею, можуть одержувати за добу 2,8–5,6 нг токсафену на кг своєї маси. Останнім часом токсафен виявлений у грудному молоці жінок Швеції, Фінляндії, Нідерландів (0,05–0,07 мг/кг маси жиру). Дослідження токсафену показали, що він є канцерогеном, нейротоксином, уражає кров, печінку, нирки людини, є сильним токсикантом для інших ссавців, птахів, риб, молюсків. Тепер цей інсектицид заборонений для застосування у всіх країнах.

Інсектицид **ендрин** офіційно заборонений для використання в США від 1979 року через його високу стійкість і токсичність для ссавців, птахів, риб, ракоподібних та ін. Він ушкоджує репродуктивну систему, біоакмулюється в рибах і молюсках. Є підозри, що ендрин нейротоксичний і є канцерогеном.



Хлордан як інсектицид використовували у сільському господарстві США від 1950 до 1980 року для знищення мурах і термітів. 1970 року його дозволили використовувати тільки для боротьби з термітами, а 1988 року була оголошена повна заборона на його застосування. Так само, як і інші хлоровмісні пестициди, хлордан токсичний для ссавців, птахів, риб та інших живих організмів. Він є канцерогеном, мутагеном; нейротоксичний, ушкоджує кров, печінку, сім'яники.

Гексахлорбензол (ГХБ) – інсектицид і фунгіцид (рис. 14.4). У США припинено його виробництво та використання. У Московії ГХБ використовували як протруйник насіння для боротьби із захворюваннями зернових культур у суміші з іншими препаратами.

Токсикант здатний до руху харчовими ланцюгами та накопичення в його кінцевих ланках. Було встановлено, що в планктоні Гданської затоки вміст ГХБ становить 11 нг/кг жиру; у оселедців, що харчуються цим планктоном, – 41 нг/кг; у дельфінів – 200 нг/кг жиру.

При безпосередньому контакті ГХБ впливає на слизову оболонку і шкіру. Він акумулюється в організмі ссавців, виявляючи властивості канцерогена, тератогена, імунотоксина і спричинює інші небажані ефекти. Докладне вивчення токсичних властивостей ГХБ показало, що він як і ПХБ є діоксиноподібним токсикантом. Внесок ГХБ у токсинність грудного молока в Росії оцінено в 11–13 токсичних одиниць, а токсичність за рахунок суми діоксинів і ПХБ – 18–20. Якщо врахувати, що більше половини цієї сумарної токсичності спричинена присутністю ПХБ, то внесок ГХБ у загальну токсичність молока є визначальним.

Екобезпечні прийоми використання пестицидів існують, оскільки відмовитися від них не можна.

Проблеми, пов'язані з використанням і шкідливою дією ДДТ й іншими синтетичними (зокрема, хлорованими) пестицидами, можна звести до наступних:

- ✓ розвиток **резистентності шкідників** до цих препаратів;
- ✓ стійкість пестицидів в середовищі і накопичення їх у зростаючих концентраціях в організмах;
- ✓ відродження шкідників і вторинні спалахи чисельності;
- ✓ ріст матеріальних затрат на застосування пестицидів;
- ✓ небажані впливи на довкілля і здоров'я людини.

У цих аспектах і доцільно розглянути негативні еконаслідки дії подібних сполук.

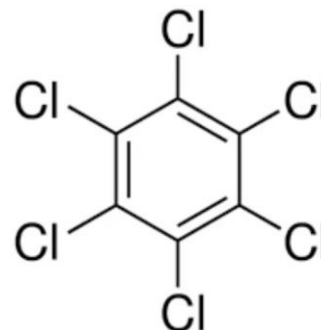


Рис. 14.4. Структура гексахлорбензолу

Популяції комах-шкідників традиційно вельми численні та представлені великою різноманітністю як *індивідуально стійких*, так і різновікових особин у різних стадіях розвитку. Це дозволяє витримувати пестицидний прес, оскільки навіть за ідеального застосування найтоксичнішого агента завжди залишиться певна кількість особин, лялечок, яєць, які не отримають летальної дози. Саме вони дають нову генерацію стійкіших комах. Усе це відбувається дуже швидко, адже здатність багатьох видів до надшвидкої репродукції у прийнятних умовах загальновідома. Комахи можуть давати численне потомство через короткі проміжки часу.

Отже, багаторазове застосування пестицидів призводить до спонтанної селекції та розмноження ліній із великою *популяційною стійкістю* саме до тих препаратів, які створені для їх знищення. Відомі випадки, коли стійкість популяції комах до хімікатів зростала в десятки тисяч разів. Біля 25 головних видів комах-шкідників стали стійкими до усіх пестицидів. Водночас, набуваючи стійкості до одного агента, популяція стає резистентною і до інших. Кількість видів комах, стійких до пестицидів, зросла за перші 10 років інтенсивного використання пестицидів майже в 2 рази – від 224 до 428.

Другий аспект проблеми пов'язаний із поведінкою пестицидів у довкіллі. Хлорорганічні (як наприклад, ДДТ, ліндан, кепон, алдрін і багато інших) або Hg-, As-, Pb-умісні пестициди належать до доволі стабільних. Це означає, що вони дуже повільно руйнуються (або навіть зовсім не руйнуються) під дією середовища або мікробів.

Про *стійкість пестицида* у довкіллі судять за часом, упродовж якого він зберігається в ґрунті після обробки:

- ✓ швидко руйнується – менше 15 тижнів,
- ✓ помірно руйнується – 15–45 тижнів,
- ✓ повільно руйнується – 45–75 тижнів,
- ✓ стійкі – більше 75 тижнів.

Період напівруйнування ДДТ становить приблизно 20 років. Сполуки ртуті і миш'яку, повністю не розкладаються – вони циркулюють в екосистемах або залишаються похованими в мулі. Переважна більшість пестицидів мають тенденцію нагромаджуватися в живих організмах, причому не тільки в кількостях більших, ніж у довкіллі, але й у концентраціях, що зростають в міру просування харчовими ланцюгами. Їм особливо притаманний ефект біологічного посилення – біомагніфікація.

Не дивлячись на те, що дані про вплив пестицидів на угруповання організмів і функціонування екосистем ще не повні та не систематизовані, з'ясовано, що через високу здатність до біоаккумуляції і низький ступінь розкладу, вони можуть негативно впливати на організми всіх трофічних

рівнів, особливо на первинних продуцентів, які володіють великою чутливістю.

Відомі численні приклади біоаккумуляції ДДТ. Наприклад водні рослини – водорості кладофора, за три дні засвоюють із води стільки ДДТ, що його концентрація у них збільшується у 3000 разів. Один кг жиру тюленів, які живуть біля британських берегів, містить 10–40 мг ДДТ. Нечутливі до дії ДДТ дощові черв'яки є своєрідними пастками цього ектоксиканта, активно поглинаючи його з ґрунту і нагромаджуючи в організмі. Вивчення накопичення ДДТ і його переходів у ланках трофічного ланцюга на прикладі екосистеми озера Мічіган показало, що донний мул містить 0,014 мг/кг, придонні їстівні ракоподібні – 0,41, різні види риб – 3–6, і жирова тканина чайок, які живляться цією рибою – більше 2400 мг/кг.

Класифікація пестицидів для визначення їх безпеки представлена в табл. 14.10. Наступний, дуже важливий аспект проблеми, полягає в тому, що часто після обробки пестицидами шкідники можуть з'являтися в набагато більших кількостях.

Це явище називають відродженням. Шкідливі комахи можуть розмножуватися вибухоподібно, що називають вторинним спалахом чисельності. Наприклад, кліщі, шкідники бавовнику за своєї малочисельності не спричиняли катастрофічних утрат продукції, проте після запровадження пестицидів у галузі на плантаціях шкідливими стали вже не 6 а 16 видів.

Особливо небезпечний, проте явно недостатньо вивчений вплив ДДТ на людей. Зазначено, що лише за одне десятиріччя, від 1970 до 1980 року, частота отруєнь пестицидами в світі збільшилася на 250%. Токсична доза при потраплянні в людський організм 10–15 мг/кг, а для особливо чутливих індивідів навіть 6 мг/кг; смертельна доза – 70–85 мг/кг маси тіла. У людини, так як і в багатьох інших видів, ДДТ концентрується переважно в жировій тканині, але здатний виділятися з грудним молоком і навіть проходити через плацентарний бар'єр.

Ще 15 років тому було відомо, що в 99% американців у крові і жировій тканині міститься ДДТ в кількості 3,6 ppm, дієдрину 0,12 ppm. Згідно підрахунків, зроблених в Німеччині, кожна грудна дитина з молоком матері отримує в 2 рази більше ДДТ, ніж це допустимо. У грудному молоці американських матерів-годувальниць у 4 рази перевищений рівень ДДТ, ніж дозволено санітарними нормами для коров'ячого молока. Вони почали інтенсивно розмножуватися завдяки усуненню менш витривалих їхніх ворогів і сьогодні втрати врожаю від шкодочинності кліщів величезні. В деяких районах США відмовилися від вирощування бавовни у зв'язку з тим, що затрати на боротьбу з шкідниками, перевищували вартість врожаю.



*Табл. 14.10. Показники, які відображають відносну токсичність, стійкість і біоаккумуляцію деяких пестицидів**

Назва пестицида	Токсичність		Стійкість	Біо- акумуляція	Сумарний індекс
	щурі	риби			
Хлоровані пестициди					
ДДТ	2,7	3,7	4,0	4,0	14,4
Алдрин	3,2	3,9	4,0	3,1	14,2
Діелдрин	3,1	3,9	4,0	3,0	14,0
Ендрин	3,5	4,0	4,0	2,8	14,3
Ліндан	2,7	3,4	4,0	1,5	11,6
Середнє значення	3,0	3,8	4,0	2,9	13,7
Фосфоровмісні пестициди					
Дихлофос	3,0	2,7	1,3	1,0	8,0
Дисульфотон	3,9	3,3	1,1	1,0	9,3
Паратіон	3,6	3,3	1,3	1,0	9,2
Форат	4,0	3,7	1,1	1,0	9,8
Середнє значення	3,3	3,3	1,2	1,0	8,8
Карбамати					
Карбарил	2,1	2,4	1,1	1,0	6,6
Карбофуран	3,6	2,9	1,4	1,0	8,9
Середнє значення	2,8	2,6	1,2	1,0	7,6
Триазини					
Атразин	1,7	2,0	3,6	1,0	8,3
Прометон	1,7	2,5	4,0	1,0	9,2
Середнє значення	1,9	2,3	2,5	1,0	7,6
Пестициди на основі органічних кислот					
2,4,5-Т	2,5	2,8	1,4	1,0	7,7
2,4-Д	2,4	1,4	1,1	1,0	5,9
Середнє значення	2,0	2,1	1,6	1,0	6,7

Примітка: * Ступінь токсичності пестицида ґрунтується на LD_{50} ; на стійкість пестицида у довкіллі вказує час, упродовж якого він зберігається; на біоаккумуляцію – накопичення пестицидів за шкалою від 1 до 4; максимальна оцінка відповідає найбільшій токсичності, або стабільності, або найбільш вираженій здатності до акумуляції.

Приведені приклади дають відповідь на запитання, чому ж збільшується обсяг затрат на застосування пестицидів? Стійкість видів-шкідників,

яка виникає після тривалих обробок пестицидами, відродження і вторинні спалахи їх чисельності, а також поява нових шкідників призводять до того, що виникає потреба у ще більшій кількості отрути. Виробництво вимагає синтезувати і використовувати нові препарати, токсичніші й дорожчі у виготовленні. Традиційні ж препарати потрібно застосовувати на тих самих полях у щораз більших обсягах і концентраціях.

Слід пам'ятати, що у нашу добу заборона на використання ДДТ не повсюдна, тому потрібний суворий контроль за якістю імпортованої продукції. В Австралії та Китаї його застосовують і сьогодні для обприскування фруктових садів і плантацій, а Індія продовжує його виготовляти й експортувати.

Поліхлоровані біфеніли (ПХБ) у біологічному відношенні є одними із найнебезпечніших отрут серед хлорорганічних сполук і, що найголовніше, вони практично не руйнуються у природному довкіллі. ПХБ є сумішшю сполук із різним вмістом хлору (від 40 до 60%), які утворюються при хлоруванні біфенілу (дифенілу) (рис. 14.5). Усі хлорзаміщені похідні дифенілу відповідають загальній формулі $C_{12}H_nCl_n$. У них 1–10 атомів Cl сполучені з будь-яким атомом С дифенілу, молекулу якого утворює два бензольних кільця. Можливе існування понад 200 індивідуальних сполук цього типу, проте у препаратах, які є в продажу, присутні не більше половини з них.

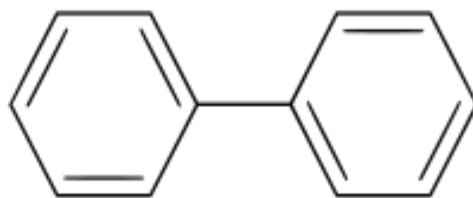


Рис. 14.5. Структура біфенілу (дифенілу)

ПХБ почала широко використовувати в промислових цілях від 1929 року фірма "Монсанто" у США. З тої пори і до припинення їхнього промислового виготовлення від 1986 року у світі було вироблено приблизно 2 млн. т ПХБ. У зниклому союзі ПХБ випускали від 1934 року у вигляді двох препаратів – соволу і трихлордифенілу. Виробництво трихлордифенілу припинили 1980 року, а виробництво соволу зменшили до 500 т щороку. Ці дві суміші відрізняються за складом: совол містить більше висоохлорованих ПХБ (53% пента-, 23% тетра-, 22% гексахлорбіфенілів), а трихлордифеніл складається на 49% із три-, на 32% із тетра-, на 14% із ди- і 4% пентахлорбіфенілів. Совол використовують головним чином як пластифікатор для лаків і фарб. Суміш 1,2,4-трихлорбензолу із соволом (совтол-10) виробляли для заливання у трансформатори. Трихлорбіфеніл використовували в конденсаторах.

ПХБ використовують як діелектричні рідини в трансформаторах і великих конденсаторах, як пластифікатори для пластмас, лаків і лакофарбових матеріалів, як матеріали-носії і розчинники для пестицидів. Крім того існує підозра, що ПХБ навмисно (але негласно) додають в інсектицидні

препарати. ПХБ потрапляють у навколишнє середовище різними шляхами: по-перше, за рахунок сучасного промислового застосування ПХБ; по-друге, за рахунок його можливого утворення при розщепленні ДДТ під дією ультрафіолетових променів. Велика кількість ПХБ могла зберегтися з часів широкого використання карболеніуму – препарату для захисту дерев, оскільки вони є побічними продуктами у синтезі карболеніуму та могли поширюватися разом із ним. ПХБ можуть також потрапляти в навколишнє середовище з лаків, фарб, хімікатів, будівельних матеріалів.

Велика небезпека ПХБ для здоров'я людини призвела до того, що в багатьох країнах була введена заборона на виробництво цих речовин: від 1971 року – у Швеції, від 1972 – в Японії, від 1977 – в Норвегії, від 1977–1978 років – у США. В Російській Федерації ПХБ не заборонені, але виробництво їх до 1993 р. було припинене. В Росії загалом було вироблено 180 тис. т ПХБ, з них сьогодні використовують приблизно 20 тис. т.

Існує величезний дисбаланс між виробленою кількістю ПХБ і кількістю, що використовують. Відомо, що частина виробленого ПХБ залишилася на складах України, Узбекистану, Вірменії та інших республіках зніжкого союзу.

До великої групи хлорованих вуглеводнів, яку називають **діоксинами**, входять 75 власне діоксинів (поліхлорованих дибензодіоксинів), 135 різних фуранів (поліхлорованих дибензофуранів) і 209 поліхлорованих біфенілів (ПХБ). Проте, лише 7 діоксинів, 10 фуранів і 12 ПХБ є надзвичайно токсичними для усього живого – від бактерій до ссавців. Ці 29 сполук мають подібну біологічну активність, що зумовлена спільним механізмом дії. Представників трьох вищевказаних класів правильніше називати діоксиноподібними сполуками – ДПС. Проте, найчастіше для цього використовують слово "діоксин". Цей термін походить від скороченої назви тетрахлорпохідного – 2,3,7,8-тетрахлордibenзо(b,e)-1,4-діоксину (рис. 14.6).

Уперше людство дізналося про діоксини в 30-ті роки ХХ ст. Тоді у робітників, що працювали на підприємствах хімічної промисловості з використанням хлорних технологій, почали виявляти хворобу, відому як "**хлоракне**" – хлорні вугрі.

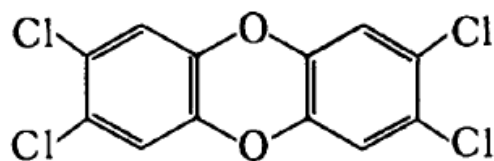


Рис. 14.6. Структура діоксину

Випадки захворювань поширювалися, дедалі частіше вони ставали масовими. Так, 1949 року на заводі фірми Monsanto у Західній Вірджинії (США) захворіли 288 працівників. Від забруднення діоксинами заводської території фірми BASF у Людвігсхафені (ФРН) постраждало 75 осіб. 1976 року на заводі фірми ICMESA з виробництва трихлорфенолу в селищі Меда, поблизу м. Севезо в Північній Італії, унаслідок допущеної персоналом експлуатаційної помилки майже 3 т отруйних речовин осіло на

площі 15 га. Приблизно 75 тис. отруєних тварин довелося умертвити. На хлоракне захворіло упродовж двох років після аварії 79 місцевих італійців.

Ґрунт є основним депо діоксину в природі. Діоксини у ньому надзвичайно стабільні і зберігаються в основному у верхніх шарах – на глибині 2–5 см. ДПС практично не мігрують у ґрунті і не надходить у ґрунтові води. Проте, слід зауважити, що міграція екотоксинів у ґрунті залежить від супутніх забруднювачів і біоносіїв, що впливають не лише на глибину проникнення, а й на зв'язування ДПС із компонентами ґрунту. З нього діоксини потрапляють у рослини і ґрунтові організми, а потім з овочами і фруктами, або і через інші ланки харчових ланцюжків (птахів і тварин) потрапляють в організм людини. Отже, концернтровані молочні продукти (масло, сир), м'ясо великої рогатої худоби, яйця і м'ясо птахів можуть містити високі концентрації ДПС.

Діоксини нерозчинні у воді. Потрапивши у вигляді промислових викидів до річок, вони осідають у мулі і ґрунті, з товщі морської води вони накопичуються у тканинах гідробіонтів, де їх концентрація у десятки і сотні тисяч разів перевищує їх вміст у воді. Особливістю ДПС є їх здатність до біоаккумуляції. У модельних дослідах із внесенням радіоактивно міченого ТХДД було показано, що у личинках комарів його концентрація у 9000 вища, ніж у воді. Наступна ланка харчового ланцюжка, що споживає личинок комара – риби чи водоплавні птахи, мимоволі підвищуватимуть концентрацію отрути у жирових тканинах свого організму, звідки вона практично не виводиться. Споживач риби отримає концентрації ТХДД, які можуть у десятки, тисячі разів перевищувати рівні його у навколишньому середовищі.

ДПС є дуже стійкими сполуками. Тому час їх напівруйнування у навколишньому середовищі дуже тривалий: для поліхлорованих дибензо-*p*-діоксинів він становить від 102 до 139 років; для поліхлорованих дибензофуранів – 29–79 років. У табл. 14.11 наведені допустимі концентрації стійких екотоксинів у довкіллі.

Табл. 14.11. ГДК для поліхлорованих дибензо-*p*-діоксинів (ПХДД), дибензофуранів (ПХДФ) і біфенілів (ПХБ)

Об'єкт	Діоксин ДЕ (ПХДД+ПХДФ)	ПХБ
Атмосферне повітря	0,5 пг/м ³	1 мкг/м ³
Викиди в атмосферу (за нормою ЄС)	0,1 нг/м ³	–
Питна вода, ґрунтові і поверхневі води	1 пг/л	1 мкг/л
Ґрунт	0,33 нг/кг	60 нг/кг

Основний контакт людини з діоксинами відбувається при споживанні забруднених харчових продуктів. Цим шляхом населення отримує до 95%

ДПС. Інші 5% людина отримує з повітря і з пилом. Питна вода істотного внеску у сумарну кількість ДПС, що надходять в організм, не додає.

У корм для с.-г. тварин діоксини потрапляють із забрудненої води і рослин, насичених пестицидами і гербіцидами. За даними досліджень у США, з яловичиною людина може отримати до 37 пг токсичного еквівалента (ТЕ) за добу; зі свининою і курятиною – 12–13; молоко може додавати 17, а інші молокопродукти – 24 пг ТЕ/добу. У країнах із іншими кулінарними уподобаннями свої шляхи надходження ДПС в організм. Особливо сильно забруднені морепродукти, зокрема, риба. Вчені підраховали, що мешканці Швеції і Фінляндії 63% діоксинів і 42% фуранів отримують через рибні продукти. З річкових риб особливу небезпеку становлять придонні мешканці.

Хлорорганічні сполуки мають особливість накопичуватися у жировій тканині. Тому проби для контролю на вміст діоксинів (чи то риба, свинина, чи продукція птахівництва) беруть саме з жирового екстракту продукту.

Джерелом діоксинів для людини є цигарковий дим. З'ясовано, що у кожній цигарці міститься 0,08–0,15 пг токсичного еквівалента. При випалюванні 20-ти цигарок за добу людина додатково отримує 1,6–3 пг ТЕ/добу.

З-поміж інших стійких органічних забруднювачів для діоксинів властива надзвичайно сильна токсичність. Розрахункова середня смертельна доза для людини при однократному надходженні діоксинів дорівнює 70 мкг/кг маси тіла; мінімально діюча доза становить 0,5–1 мкг/кг.

Численні аналізи продуктів харчування на діоксини, дають змогу розрахувати дозу, яку отримує людина на добу. Не можливо отримати смертельну дозу діоксинів у повсякденному житті, але ми усі знаходимося під хронічним впливом діоксинів.

Упаковку, одноразовий посуд, пакети і сумки, оздоблювальні матеріали тощо спалювати не можна. Найнебезпечніші з них – полівінілхлориди (ПВХ). Саме за їх згоряння утворюється велика кількість ДПС. Окрім того, у виробках із ПВХ завжди вже є невелика кількість діоксинів. Та навіть нехлоровані полімери, такі як поліетилен і поліпропілен, спалювати небезпечно. Серед продуктів їх горіння, виявлено у великій кількості етан, етилен та їх гомологи, ацетилен, леткі циклічні і ациклічні вуглеводні, інші еконебезпечні продукти. І хоча у таких полімерах немає хлору, ці сполуки беруть участь в утворенні діоксинів у тому випадку, коли в смітті є хоча би сліди металів, а також органічні та неорганічні сполуки хлору. Показано, що у присутності металів та їх сполук (наприклад, хлориду міді) діоксини утворюються навіть при нагріванні суміші очищеного від органічних домішок вугілля та кухонної солі.

Не можна спалювати старі електроприлади, що містять трансформатори, де в якості трансформаторної рідини використовували ПХБ. Якщо вибрати

зі сміття скло, метали і полімерні матеріали, то при спалюванні такого сміття викиди діоксинів у довкілля знижуються більше, як у 10 разів.

Найнебезпечніші екотоксиканти – це **канцерогени**.

Щорічно медики всього світу загалом реєструють приблизно 6 млн. випадків ракових захворювань і показник цей постійно збільшується. На території зниклого союзу кількість хворих із уперше встановленим діагнозом новоутворень 1970 року становила 430 тис., 1980 – 544 тис., 1989 року – вже 676 тис. осіб. Причини такої динаміки росту різні – від удосконалення діагностики й охоплення все більшої кількості населення медичними послугами до новітніх цивілізаційних "здобутків" у галузях виробництва, освоєнні небачених раніше ресурсів, забруднення усіх природних сфер чужорідними для людини й біоти маловивченими речовинами.

За оцінками ВООЗ 75–90% випадків виникнення таких важко виліковних хвороб, як злоякісні пухлини й новоутворення жакливої хвороби пов'язано із впливом різних чинників середовища життя самої людини – того довкілля, яке вона перетворила різнобічною діяльністю, не завжди продуманою та безпечною. Відомі спеціалісти в галузі онкоепідеміології Р. Долл і Р. Піто у книзі "Причини раку" опублікували перелік причин смертності від злоякісних пухлин із обчисленням питомої ваги канцерогенних чинників (табл. 14.12). Такі чинники, як куріння, вживання алкоголю, споживання їжі і дієта, і деякі інші можна прирівняти до чинників хімічної природи.

Від 1775 року, коли англійський лікар Персіваль Потт установив, що рак шкіри в сажотрусів спричинює саме дія сажі, накопичена велика кількість доказів головної ролі хімічних речовин у походженні раку в людей і тварин. Частина хімічних сполук і сумішей, із якими людина контактує на виробництві, в побуті та повсякденному житті, здатні спричиняти рак, тобто володіють **канцерогенними** властивостями.

У нашу добу забруднення природного середовища набуває глобального масштабу. Навіть в Антарктиді виявлені такі забруднювачі, як пестициди, солі важких металів, радіонукліди й інші хімічні агенти. Теперішні показники захворюваності раком відображають (з урахуванням латентного періоду розвитку пухлин) той стан довкілля, який був півтора-два десятиріччя і більше тому. Експерти підраховали, що припинення контакту із пухлинотворними ксенобіотиками, недопущення канцерогенів у сферу життя людини або видалення подібних речовин із довкілля, зможе стрімко (на 70%) зменшити захворюваність людей пухлинами головних локалізацій.

Загальна сумарна оцінка **ступеня канцерогенного ризику**, проведена експертами МАВР, ґрунтується на ранжуванні вивчених сполук за 4-ма групами. До **1-ої групи** належать речовини (чинники), які мають безумовні докази небезпеки виникнення пухлин у людини. Їх загалом 66 і це сполуки

арсену, нікелю, кадмію, берилію, 2-нафтіламін, азбест, бензол, афлатоксини й ін.

Табл. 14.12. Смертність від онкологічних захворювань, зумовлених різними чинниками

Причина	Частка (%) усіх випадків смерті від онкологічних захворювань
Паління тютюну тощо	25–40
Дієта (без хімічних добавок)	10–70
Несприятливі умови праці	2–8
Спиртні напої	24
Геофізичні чинники (ультрафіолет, природна радіоактивність, космічні промені)	1–4*
Загальне забруднення повітря і води	1–5
Лікарські препарати, лікувально-діагностичні процедури	0,5–3
Харчові добавки	2-5
Споживчі товари (наприклад, миш'як у шпаклівочних сумішах, фарба для волосся тощо)	1–2
Причини, не пов'язані з довкіллям (інфекції, вагітність, репродуктивна та сексуальна активність тощо)	1–2

Примітка: * 3 ракових захворювань включені тільки меланоми.

Більший список речовин (чинників) *групи 2*. За ступенем доказу на основі епідеміологічних, експериментальних даних і результатів короткострокових тестів вона поділена на підгрупи 2А і 2Б.

До *підгрупи 2А* (приблизно 60 чинників) зараховані агенти із доволі високим ступенем доказу. Тобто, ці чинники мають обмежені для людини і переконливі для тварин свідчення канцерогенності. Також у цю підгрупу включені агенти, які мають обмежені докази канцерогенного ризику для людини або переконливі дані для тварин, але при цьому підтримані позитивними результатами лише короткострокових тестів. До агентів подібного роду належать акрилонітрил, азотистий іприт, формальдегід і ін.

Підгрупа 2Б (більше 230 чинників) включає речовини, які ймовірно спричиняють рак у людини, тобто мають або обмежені або неадекватні докази канцерогенності для людини за відсутності переконливих доказів у дослідях на тваринах. У деяких випадках при неадекватних даних (або взагалі відсутності результатів) у дослідженнях людей при обмежених доказах канцерогенності для тварин і за наявності достовірно позитивних даних у

короткострокових пробах, досліджувану сполуку приєднують до підгрупи 2Б. До вказаної підгрупи зараховано акриламід, азотолуол, кобальт і деякі інші речовини.

До **групи 3** (приблизно 500 найменувань) зараховані агенти, які не можуть бути класифіковані стосовно їх пухлинотворної активності для людини (катехол, хлордан, фуразолідон, клофібрат і ін.).

Групу 4 становлять агенти, очевидно не канцерогенні для людини. З оцінок експертів МАВР до неї зарахований капролактан.

У довкіллі (в гідросфері, атмосфері, ґрунті, а також продуктах харчування і лікарських препаратах), як зазначено вище, перебуває велика кількість хімічних сполук із встановленими або не встановленими канцерогенними властивостями. Джерелом їх є не лише безпосередньо хімічна промисловість, але й виробництво коксу, алюмінію, виплавка чавуну і сталі, резинова, текстильна і фармацевтична промисловість, видобуток низки корисних копалин, газифікація вугілля і багато інших галузей народного господарства, окремі виробництва і промислові процеси, а також побутові й індустріальні стоки, викиди двигунів автомобілів тощо.

Свою частку у походження пухлин вносять і різні умови життя та звички (тютюнопаління, вживання алкоголю тощо).

Природно, що людство не налаштоване відмовлятися від досягнень цивілізації, тому дуже важлива первинна профілактика раку. В основі заходів із такої профілактики повинна лежати інформація про роль конкретних чинників у походженні пухлин, підсумована у табл. 14.13.

Відома велика кількість **поліциклічних ароматичних вуглеводнів** (ПАВ). Сполуки цієї групи трапляються практично в усіх компонентах довкілля. Індикатором щодо присутності ПАВ у навколишньому середовищі є **бенз(а)пірен** (БП). Це твердження вперше було сформульоване 1966 року Л. Шабаром і його послідовниками. Тому індикаторна роль БП (рис. 14.7) сьогодні визнана більшістю дослідників і обґрунтована такими спостереженнями:

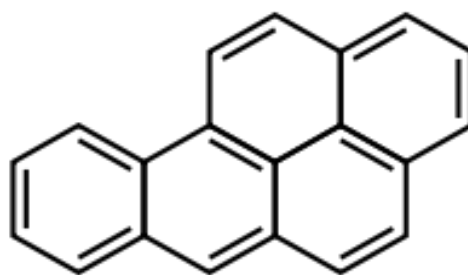


Рис. 14.7. Структура бенз(а)пірену

1) БП завжди знаходять там, де присутні інші ПАВ;

2) порівняно з іншими ПАВ саме БП володіє найбільшою відносною стабільністю у компонентах довкілля;

3) БП відрізняється найвиразнішою біологічною, зокрема, канцерогенною активністю;

4) сучасні фізико-хімічні методи індикації БП в різних середовищах є найчутливішими серед різноманітних методів визначення ПАВ.



Табл. 14.13. Канцерогенні сполуки, побутові звички і виробничі процеси*, відносно яких є переконливі докази їх причинної ролі в походженні пухлин у людини (група 1 за класифікацією МАВР) та органи-мішені**

№	Назва хімічного чинника	Органи-мішені
1	2	3
Природні і промислові канцерогени		
1	4-Амінобіфеніл	Сечовий міхур
2	Азбест	Легені, плевра, порожнина (шлунково-кишковий тракт, гортань)
3	Афлатоксини	Печінка (легені)
4	Бензидин	Сечовий міхур
5	Бензол	Кровотворна система
6	Берилій і його сполуки	Легені (центральна нервова система)
7	Біс(хлорметил) ефір і технічний хлорметилловий ефір	Легені
8	Вінілхлорид	Печінка, кровоносні судини, (мозок, легені, лімфатична система)
9	Гірчичний газ (сірчистий іприт)	Глотка, гортань, легені
10	Кадмій та його сполуки	Легені, щитовидна залоза
11	Кам'яновугільні пеки	Шкіра, легені, сечовий міхур (гортань, порожнина рота)
12	Кам'яновугільні смоли	Шкіра, легені (сечовий міхур)
13	Мінеральні масла	Шкіра (легені, сечовий міхур, шлунково-кишковий тракт)
14	Миш'як і його сполуки	Легені, шкіра
15	2-Нафтіламін	Сечовий міхур, (легені)
16	Нікель і його сполуки	Порожнина носа, легені
17	Радон і продукти його розпаду	Легені
18	Сажа	Шкіра, легені
19	Сланцеві масла	Шкіра (шлунково-кишковий тракт)
20	Тальк, що містить азбестові волокна	Легені
21	Хром шестивалентний і його сполуки	Легені (порожнина носа)
22	Еріоніт	Плевра, порожнина
23	Етилен-оксид	Кровотворна і лімфатична системи



Продовження табл. 14.13

1	2	3
Канцерогенні лікарські препарати		
24	Азатиопрін	Лімфатична система, шкіра, гепатобіліарна система
25	Анальгетичні суміші, що містять фенацетин	Сечовий міхур, нирки
26	1,4-Бутанодіол діметан-сульфонат	Кровотворна система
27	Діетилстільбестрол	Шийка матки/піхва, яйники, молочна залоза (матка)
28	Контрацептиви пероральні, які застосовують циклічно	Матка
29	Контрацептиви пероральні, комбіновані	Печінка
30	Замінник естрогено-терапія	Матка (молочна залоза)
31	Мелфалан	Кровотворна система
32	8-Метоксіпсорален (метоксален) у поєднанні з УФ-випромінюванням	Шкіра
33	МОРР (комбінована терапія з вінкрістіном, азотистим іпритом, прокарбазином, преднізолоном)	Кровотворна система
34	Нестероїдні естрогени	Шийка матки/піхва, молочна залоза, яєчка (матка)
35	Стероїдні естрогени	Матка (молочна залоза)
36	Тамоксифен	Матка
37	ТІОТЕФ (Тіофосфамід)	Кровотворна система
38	Треосульфат	Кровотворна система
39	Хлорамбуцил	Кровотворна система
40	N,N-Біс(2-хлоретил)-2нафтіламін (Хлор-нафазін)	Сечовий міхур
41	1-(2-хлоретил)-3-(4-етилциклогексил)-1-нітрозосечевина (Метил-CCNU)	Кровотворна система
42	Циклофосфамід	Сечовий міхур, кровотворна система
43	Циклоспорин	Лімфатична система
44	Споживання алкоголю (алкогольні напої)	Гортань, стравохід, печінка, глотка, порожнина рота (молочна залоза)
45	Жувальний бетель з тютюном	Порожнина рота, глотка, стравохід

**Продовження табл. 14.13**

1	2	3
46	Тютюн (куріння, тютюновий дим)	Легені, сечовий міхур, порожнина рота, гортань, глотка, стравохід, підшлункова залоза, нирки
47	Тютюнові продукти для жування	Порожнина рота, глотка, стравохід
48	Споживання соленої риби, приготовленої китайським способом	Порожнина носа, глотка (шлунок, стравохід)

Канцерогенні виробничі процеси

49	Виплавка чавуну і сталі	Легені, (шлунково-кишковий тракт, кровотворна система, сечостатева система)
50	Газифікація вугілля	Шкіра, легені, сечовий міхур
51	Пошиття та ремонт взуття	Порожнина носа, кровотворна система (глотка, легені, печінка, шлунково-кишковий тракт, сечовий міхур)
52	Виробнича експозиція до барвників	Легені
53	Виробництво алюмінію	Легені, сечовий міхур, лімфатична система
54	Виробничий вплив аерозолів, що містять сірчану кислоту	Порожнина носа, гортань, легені
55	Виробництво ізопропілового спирту	Порожнина рота, гортань
56	Виробництво коксу	Шкіра, легені, нирки
57	Виробництво меблів	Порожнина носа
58	Гумотехнічна промисловість	Сечовий міхур, кровотворна система (легені, шлунково-кишковий тракт, шкіра, лімфатична система)

Примітка: * У таблицю не включено наступні чинники: сонячна радіація, віруси гепатиту В і С; інфекція, спричинена *Shistosoma haematobium*, *Opisthorchis viverrini*, *Helicobacter pylori*;

вірус папіломи людини 16 і 18 типів; деревний пил.

** У дужках – цілком ймовірні органи-мішені, відносно яких є епідеміологічні дані.

Встановлено, що БП та інші ПАВ виникають як продукт абіогенного походження в результаті вулканічної діяльності. Сучасний фоновий рівень БП у біосфері поданий в табл. 14.14. Якщо сучасний фоновий рівень ПАВ практично співпадає з природним, який існує упродовж тисячоліть (що

підтверджено визначенням БП в пробах ґрунтів із зон вічної мерзлоти), то антропогенне забруднення середовища цими сполуками багаторазово його перевищує.

Головні антропогенні джерела ПАВ: 1) стаціонарні, тобто промислові викиди від коксохімічних, металургійних, нафтопереробних та інших виробництв, а також підприємств теплоенергетики; 2) пересувні, тобто наземний, головне, автомобільний і водний транспорт, авіація.

Встановлено, що тільки за 1 хв. роботи газотурбінний двигун сучасного літака викидає в атмосферу 2–4 мг БП. Навіть приблизні підрахунки вказують, що цього екотоксина в атмосферу від авіації потрапляє щорічно 5 тис. т. БП та інші ПАВ утворюються головним чином у процесі згорання різноманітних горючих матеріалів (вугілля, деревина, сланці, нафтопродукти) при температурах приблизно 80°C і вище 500°C.

ПАВ надходять в атмосферу зі смолистими речовинами (димові гази, сажа тощо), потрапляють у водойми зі стоками різних видів, атмосферними опадами, викидами водного транспорту тощо.

БП виявлений у тютюновому димі (20–40 мкг/цигарку), димі маріхуани (29 нг/цигарку), міському повітрі (0,05–74 нг/м³), відпрацьованих газах бензинових (50–81 мкг/л палива) і дизельних двигунів (2–170 мкг/кг екстракту), відпрацьованих машинних оливах (5,2–35,1 мг/кг), забруднених водах (0,2–13000 нг/л), чаї (3,9–21,3 мкг/кг), кулінарних продуктах тощо.

Табл. 14.14. Сучасний фоновий рівень бенз(а)пірену в біосфері

Об'єкт дослідження (одиниці)	Вміст БП
Атмосферне повітря, мкг/м ³	0,0001–0,0005
Над континентом, мкг/кг сухої речовини	0,00001
Над океаном, мкг/кг сухої речовини	до 1–5
Ґрунти, рослинність, мкг/кг сухої речовини	до 1–5
Прісноводні водойми, вода (мкг/л)	0,0001
Донні відклади, мкг/кг сухої речовини	до 1–3
Водяні рослини, мкг/кг сухої речовини	до 1–3

БП та інші ПАВ циркулюють у біосферному кругообігу речовин, вони мігрують із одного середовища в інше. Наприклад, з повітря у ґрунт, з ґрунту в рослини, в корм для тварин і нарешті потрапляють у їжу людини. ПАВ піддаються різним перетворенням, у т.ч. і деструкції (наприклад, під впливом фотоокислювачів або ґрунтових мікроорганізмів). Ці процеси транслокації і трансформації відбуваються в атмосфері, в гідросфері та в літосфері. В усіх цих середовищах ПАВ практично не існують у молекулярно-дисперсному стані. Вони, як правило, сполучені з іншими забруд-

нювачами (в повітрі з твердими частинками атмосферного пилу, у воді з різними поверхнево активними сорбентами). У повітряному середовищі, де найбільше зацікавлення представляють приземні товщі атмосфери, що містять велику частину забруднювачів, поширення ПАВ визначає дисперсність частинок, на яких вони сорбовані, віддаленістю джерела викидів від поверхні землі і такими кліматичними факторами, як вітер, вологість, температура, атмосферні опади. Дрібнодисперсний пил залишається у верхніх шарах атмосфери, в цей час як частинки середньої дисперсності (1–10 мкм) тривало персистують в зоні дихання людини, тварин і рослинних організмів. Більші частинки, розмірами понад 10 мкм, унаслідок седиментації з опадами випадають із повітря і переходять в ґрунти, рослини, воду. Поширення ПАВ, як і повітряних забруднювачів взагалі, багато в чому зумовлено і ступенем віддаленості джерела викидів від поверхні землі. Тому, чим вища димова труба підприємства, тим на більшій відстані можна знайти продукти його викидів.

У ґрунти ПАВ поступають з атмосферними опадами, залишками рослин, а останніми роками і з використанням в якості добрив різних побутових і промислових відходів, що містять ПАВ. Багато ґрунтових мікроорганізмів виявилися доволі чутливими до дії ПАВ, що змінює мікробіоценози і впливає на біопродуктивність ґрунту. Так, внесення в ґрунт БП в концентраціях 40–100 мкг/кг сильно пригнічує ріст сапрофітних мікроорганізмів, але стимулює розмноження кишкової палички і грибів, головним чином, актиноміцетів. Саме з ґрунту ПАВ проникають у підземні частини рослин, що підтверджене встановленою кореляцією між вмістом БП у ґрунті і, наприклад, у картоплі.

В усіх об'єктах середовища відбуваються певні процеси трансформації ПАВ. У повітрі деградації БП сприяє вплив УФ-випромінювання і різні фотооксиданти, перш за все озон, а також оксиди азоту, формальдегід, який є в міській атмосфері. У ґрунті деградація ПАВ відбувається як під впливом ультрафіолету на поверхні, так, головним чином, під дією ферментних систем мікроорганізмів. У воді окислювальна деградація БП та інших ПАВ протікає також частково під дією УФ-випромінювання ближче до поверхні, залежно від мутності води, її кольоровості, температури тощо), але, головню, мікрофлори водойми, а також під впливом інших хімічних сполук, що є у водоймах.

Багато видів рослин і тварин здатні акумулювати ПАВ. Наприклад, прісноводні і морські молюски – мідії за рахунок того, що в них не відбувається (або відбувається доволі повільно) метаболізм БП здатні його накопичувати в своєму організмі. В експерименті із внесенням у воду акваріумів БП в концентрації 0,1 мкг/л у тканинах чорноморських мідій цей індикатор ПАВ з'являвся через 60–120 днів у 20–30 разів більших кількостях, ніж у контрольних молюсків. Це дозволяє використовувати молюсків-філь-

траторів в якості біоіндикаторів забруднення водного середовища ПАВ. В мідіях нагромаджується до 55, а в устрицях – до 90 мкг/кг БП. Серед риб, в яких БП піддається доволі інтенсивному метаболізму за рахунок діяльності ферментів систем окиснювальної детоксикації, також відбувається накопичення БП в організмі у випадку високого їх вмісту у воді. Тут слід зазначити, що риби, які ведуть придонний спосіб харчування і риби зі значним вмістом ліпідів, більшою мірою акумулюють ПАВ. У свіжій рибі, виловленій в забрудненій ПАВ акваторії вміст БП сягає 15 мкг/кг.

В індустріальних районах вміст БП у рослинах істотно більший, ніж у тих же видів, зібраних у "чистих" районах і перевищує фоновий рівень. Зауважимо, що лікарські рослини, що ростуть у безпосередній близькості від автомагістралей з інтенсивним рухом, містять підвищену кількість БП. Забруднення харчових рослин цим екотоксикантом більшою мірою залежить від техногенних факторів (промислових викидів) і від ступеня віддаленості від джерела викидів. Нагромадження в рослинах, рибі і молюсках ПАВ зумовлює можливість забруднення ними харчових продуктів і кормів і, відповідно, потрапляння в організм людини.

Біологічні ефекти БП в організмах глибоко досліджені. Встановлено, що ПАВ володіють здатністю підсилювати ріст і розмноження низки рослин. Уперше це було доведено на водоростях ще понад півстоліття тому. З того часу численними дослідженнями підтверджено, що в малих концентраціях БП і інші ПАВ володіють стимуляційною дією щодо процесів росту. Своєрідний ефект ПАВ виявлений і на нижчих хребетних. У планарій, при аплікації на поверхню тіла деяких ПАВ виникали утворення – як прояви тератогенного, органогенного або канцерогенного ефектів. Взагалі, оскільки канцерогенний вплив ПАВ було виявлено відносно давно, саме тому докладно досліджена їх пухлинна дія.

У виробничих умовах при експозиції до ПАВ у людей, залежно від способу контакту з ними і виду продукту, можуть виникати дерматити, кератокон'юнктивіти, а також підвищений ризик виникнення ішемічної хвороби серця, хронічних захворювань легень та іншими хворобами респіраторної системи. Наприклад, гігантський смог в Лондоні 5–13 грудня 1951 року забрав життя 2850 осіб. Вміст БП в цьому смозі становив до 222 мкг/100 м³. З огляду на це, ПАВ потрібно розглядати як екобезпечні токсиканти довкілля.

14.5. Натурне моделювання екобезпечних агротехнологій

Де-факто натуральне органічне сільське господарство тисячоліть було зруйновано з приходом синтетичних чи викопних добрив (за ініціативи Ю.

Лібіха – *П.Г.* і *О.С.*) і пестицидів. Хімічне виробництво речовин у промислових масштабах було стимульовано перепрофілюванням військових заводів з виробництва вибухівки тощо у продукування різних агрохімікатів: синтетичних добрив та пестицидів. Велитенський поштовх дало впровадження промислового синтезу аміаку з азоту й водню під тиском (більше 100 атм.) та при нагріванні (400-500°C) в присутності каталізатора. Процес був розроблений німецькими вченими Фріцом Габером (Нобелівська премія 1918 р.) і Карлом Бошем (Нобелівська премія з хімії 1931 р.). Так було вирішено питання азотних добрив і це рятувало людство від голоду.

Проте 1924 року Рудольф Штайнер (Paull, 2023) запропонував диференційоване аграрне виробництво, яке уникає синтетичних хімікатів. Він покладався на природу та біологію, а не на хімію. До 1938 р. його Експериментальний гурток прихильників випробував і розвинув ідеї "біодинамічного рільництва". Під впливом концепції Р. Штайнера, що "ферма – це організм", лорд Нортборн запропонував термін "органічне рільництво", а 1940 року опублікував "Погляд на землю" – маніфест органічного аграрного господарства. Він започаткував змагання хімічного аграрного господарства проти органічного рільництва. Змагання, яке, як він і передбачив, може тривати десятиліттями і століттями. Зараз органічне аграрне господарство практикуються у 187 країнах на 72,3 млн. га аграрних угідь. Його оцінюють у 123 млрд \$ США щорічно.

Сертифікація уможливила широке географічне поширення органічного виробництва. Індійський штат Сіккім, що розташований на північному сході країни, тепер на 100% органічний.

В Україні тривають дослідження технологій органічного рільництва з використанням системного підходу.

Дослідження ННЦ "Інститут землеробства НААН" (Давидюк та ін., 2019) є прикладом системного агроекологічного аналізу впливу живлення пшениці озимої на інтенсивність асиміляції важких металів культурою, хоча ці елементи є мікроелементами мінерального живлення. Експеримент провели за схемою, що подана в таблиці 14.15. Агроекологічний дослід показав можливості регулювати інтенсивність асиміляції озимою пшеницею важких металів Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Mn і Fe, які є необхідними мікроелементами. Їхня концентрація у зерні не повинна бути надто великою, бо це може зашкодити споживчій якості пшеничного борошна.

Інший яскравий приклад агроекологічного експерименту – дослідження А. Разанової (2024) "Інтенсивність накопичення важких металів розторопшею плямистою (*Silybum marianum* L.) залежно від удобрення в умовах Лісостепу Правобережного. Експериментування з системами удобрення розторопші за схемою (табл. 14.16): 1) без удобрення (контроль); 2) амонійна селітра (N₆₀); 3) суперфосфат простий (P₆₀); 4) калій хлористий

[illegible][illegible]

100	111	11()	12()	13()	14()	15()	16()	17()	18()	19()	20()	21()	22()	23()	24()	25()	26()	27()	28()	29()	30()	31()	32()	33()	34()	35()	36()	37()	38()	39()	40()	41()	42()	43()	44()	45()	46()	47()	48()	49()	50()	51()	52()	53()	54()	55()	56()	57()	58()	59()	60()	61()	62()	63()	64()	65()	66()	67()	68()	69()	70()	71()	72()	73()	74()	75()	76()	77()	78()	79()	80()	81()	82()	83()	84()	85()	86()	87()	88()	89()	90()	91()	92()	93()	94()	95()	96()	97()	98()	99()	100()
-----	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------

00 00 00 | , , | , ,

Органічне сіделко господарство з світовим рівнем продуктивності на

Продукти хімічного обробного господарства як правило позитивні між

$\frac{9}{10} = \frac{9}{10}$

наслідки для здоров'я працівників ферми та сусідів і наслідки навантаження пестицидами для здоров'я споживачів – це всі зовнішні ефекти (Tomaš-Simin, 2023).



Рис. 14.8. Світова карта органічного аграрного виробництва: картограма з розмірами країн пропорційно до їхніх офіційних сертифікованих органічних гектарів (Paull Hennig, 2019)

Вони не є кількісно визначені, їх ігнорують, ніби вони не існують, і вони не включені в ціну продукту. Ці шкоди хімічного сільського господарства є зовнішніми ефектами – вони "безкоштовні" для хімічної промисловості, її акціонерів і клієнтів.

Впровадження органічного рільництва сприяє обмеженню викидів парникових газів (Muller et al., 2017), але адекватне постачання азоту є складним завданням. Окрім зосередження на виробництві, стійкі продовольчі системи повинні вирішувати проблему відходів, взаємозалежності посівів, лучного кормовиробництва, тваринництва та нормованого споживання людиною чистих продуктів. Поєднання компромісних стратегій не потребує повної реалізації, а їх сумісне часткове впровадження забезпечує стійкіше продовольче майбутнє.

Мертві зони планети внаслідок стоку добрив, евтрофікації є тягарем для світового океану. Це неоцінена шкода недбалого рільництва. Вона зобов'язує агрономів експериментувати з мінімізацією агрохімікатів і здійснювати системний аналіз за методами експериментальної агроекології.



Синергія за визначенням німецьких вчених (The Economics..., 2024), є сутністю агроекології, оскільки вона відображає життєво важливі ековзаємодії між різними елементами агроєкосистеми в часі та просторі. Ми є те, що ми їмо. Це стосується не лише людей, а й тварин і навіть рослин. Хорош і поживну їжу "створюють" здорові ґрунти. Різноманітні угруповання мікроорганізмів забезпечують поживними речовинами коріння рослин – рослин, які дають нам зерно, фрукти та овочі, котрі ми споживаємо, і живлять тварин, які дають нам м'ясо, молоко та яйця. Добрі ґрунти є основою здорових агроєкосистем та різноманітності всіх живих організмів, що є їх функціональними складниками.

Промислове аграрне господарство виробляє продовольство, але й забруднює планету та збіднює наше меню. Хімічні добрива та пестициди шкодять ґрунту, комахам-запилювачам та здоров'ю самої людини. Тому їжа, вироблена в промисловому аграрному секторі, не тільки менш поживна, але й може бути інколи шкідливою. Епідемічне поширення ожиріння вказує на те, що багато хто кількісно переїдає, але водночас якісно недоїдає. Нераціональні споживацькі витрати у масштабах планети наразі оцінюють у 15 трлн \$ на рік, що еквівалентно 12% світового ВВП 2020 року.

Трансформоване природне довкілля як у глобальному масштабі, так і в Україні, у поєднанні із різноякісним соціо-економічним середовищем суспільних верств населення чинять різнобічний вплив безпосередньо на фізичне здоров'я людей і на демографічні процеси в суспільстві. Зміни в біогеосфері та соціальні чинники життя торкнулися темпів мутагенезу і спровокували тенденцію до нагромадження генетичного тягаря в популяції людини.

Вперше після другої світової війни від 1993 року в Україні зафіксоване зменшення кількості населення, яке зумовлене зниженням рівня народжуваності, зростанням захворюваності та смертності, а в останні роки стихійною еміграцією від лиха війни. Депопуляція країни і досі триває, особливо під впливом втрат у бойових діях та бомбардування моско-

вітами міст і сіл України. Стан здоров'я її громадян, за оцінками фахівців, можна вважати кризовим (Сміян, 2002). Ситуація, що виникла, вимагає глибокого й детального аналізу, виділення критичних чинників негативного впливу й застосування масових ефективних профілактичних заходів.

15.1. Становлення і сучасна система знань про екологію людини¹

Уперше термін "екологія людини" з'явився 1921 року в працях американських дослідників Р. Парка й інші, які використовували його в соціологічних студіях¹. Потреба виокремлення екології людини, як наукової сфери (*Society for Human Ecology SHE*) і навчальної дисципліни була задекларована 1936 року. "...Рано чи пізно екологія людини під цією, чи іншою назвою отримає свій шлях до академічного визнання і знайде своє місце в загальній освіті..." – писав Н. Wells (1934). Спочатку вона була визначена в рамках методологій системного аналізу, який застосовують традиційно для екології рослин і тварин (Park, 1936). Згодом були долучені методи соціологів, які інтегрували різні спектри дисциплін, що впровадили ширші точки зору в цю науку (Borden, 2008). 1972 року вийшов перший міждисциплінарний журнал, який окреслив тематику екології людини (Editors, 1972). Сорок років згодом у тому ж журналі Д. Бейтс (2012) зазначив, що предмет науки суттєво змінився й отримав подальший розвиток. Проте, дискусії щодо аспектів її вивчення й надалі тривають.

Особливо цікавою є сфера екології людини у застосуванні до епідеміології і громадського здоров'я. Застосування екологічних понять в епідеміології має коріння від К. Ліннея і зіграло конструктивну роль. Назва дисципліни прийшла від медичної науки у XX столітті епідеміології і медичної екології (Last, 1998). Термін, придуманий екоепідеміологами "екосистемне здоров'я", має глибокий зміст і означає розуміння здоров'я ("*ecosystem health*") людини, як функцію екосистеми, в якій вона народжується, живе, працює тощо (Charron, 2012). На підставі системного підходу вимальовується соціо-екологічна модель здоров'я, як об'єкт вивчення науки "Екологія людини" (White et al, 2013).

Існує багато визначень науки "Екологія людини". Зокрема, за європейськими вченими, **екологія людини** є міждисциплінарною наукою, що досліджує взаємовідношення між людиною та її природним, соціальним і рукотворним середовищами. За Т. Акімовою і В. Хаскіном (1999) екологія людини це комплекс дисциплін, що досліджують взаємовідношення

¹ За участі д.б.н., проф. Ягелонського університету Дж. Нівелінського, д.мед.н. Олега Гнатейка і д.б.н. Марії Лозинської, к.мед.н. Оксани Нечай.

людини як індивіда (біотичної одиниці) і особистості (соціального об'єкта) з навколишнім для нього природним і соціальним середовищем. Тому зупинимось на визначенні, що



екологія людини це наука, яка вивчає закономірності взаємовідношень людини, як біо-соціальної істоти зі складними багатокомпонентними навколишніми системами, що динамічно розвиваються, задля збереження і зміцнення її здоров'я.

Головним об'єктом екології людини є здоров'я і самопочуття особи (індивіда) і людських спільнот (локальних популяцій).

Предметом вивчення екології людини є взаємовідношення людини біо-соціальної і довкілля як екофункції в антропосистемах різного рівня від глобальної до локальних (мікропопуляційних і консорційних).

Екологія людини на всіх стадіях свого історичного розвитку мала **завдання** вивчати:

- 1) генетичні, фізіологічні і соціальні адаптації до навколишнього середовища і його змін;
- 2) роль соціальних, культурних і психологічних факторів у збереженні чи порушенні екосистем;
- 3) ефекти щільності населення на здоров'я, соціальну організацію і якість навколишнього середовища;
- 4) нові адаптивні проблеми в міських умовах;
- 5) взаємовідношення технологічних процесів та змін у довкіллі;
- 6) розвиток єдиних принципів у вивченні біотичної та культурної адаптації;
- 7) генезис поступових пристосувань в біотичній і культурній еволюції людини;
- 8) співвідношення якості продуктів харчування і міри фізичної та інтелектуальної дієвості, демографічних змін;
- 9) застосування комп'ютерів, пристроїв дистанційного зондування та інших нових засобів і методів у системі "людина-довкілля".

Філософія і вчення дисципліни "Екологія людини" має історичні корені й охоплює фундаментальні методи географії, соціології, психології, антропології, зоології, епідеміології, наук про громадське здоров'я, соціо-економіки і фундаментальної екології.

Центральне місце у наукових дослідженнях у сфері екології людини займають людські спільноти. Для їх опису є такі показники, як народжу-

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...

ваність, смертність, захворюваність, інвалідність, вікова і статева структура конкретної спільноти, її освітній рівень, професійний склад, рівень фізичного розвитку дітей, моральні засади тощо. Але найважливішим



показником, в якому зрештою концентруються перелічені вище параметри, є популяційне здоров'я.

За офіційним визначенням ВОЗ, **здоров'я** це стан повного фізичного, психічного і соціального благополуччя як на рівні індивіда, так і людської популяції.

Другою після людини найважливішою компонентою антропосистем є якість навколишнього середовища. Його оцінюють за рівнем комфортності для населення, за ступенем забрудненості й деградації внаслідок техногенних впливів, за певними соціально-економічними показниками, що сукупно впливають на внутрішнє середовище організму людини. Тому, здоров'я з позиції *гомотоксикології* (Reckeweg, 1974) трактують глибше й точніше.

Вчені стверджують (Рекевег, 2000) що:

- ✓ захворювання це біологічно неминучий процес самозахисту організму від екзогенних і ендогенних так званих "гомотоксинів" або намагання компенсації завданих ними ушкоджень, тобто спроба організму, як системи, привести себе в стан біологічної рівноваги;
- ✓ симптоми захворювання це видимі прояви захисних реакцій організму, спрямованих на нейтралізацію і виведення гомотоксинів, тому завданням терапії є виявлення та підтримка симптомів, а не їх усунення, чи нівелювання;
- ✓ одужання є звільнення організму від гомотоксинів та усунення спричинених ними уражень;
- ✓ здоров'я це стан "свободи" організму від гомотоксинів і відсутність спричинених ними функціональних або органічних уражень.

15.2. Ауतेкологія людського організму

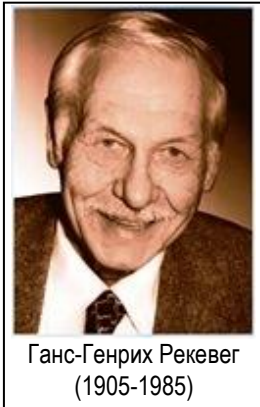
Практично усі екофактори внутрішнього довкілля біогеосфери чинять більший, чи менший вплив на людину біотичну і на людину соціальну. Окрім того, людські соціуми спричиняють додаткові соціальні впливи, які діють як на біотичні, так і на соціальні функції індивіда його здоров'я загалом.

Будь-який агент або фактор, який чинить негативний вплив на організм людини чи порушує його біотичний баланс, розглядають як гомотоксин. Лікар та основоположник гомотоксикології Ганс-Генріх Рекевег (2000) поширив цей спеціальний термін і на зовнішні екофактори, чим спровокував критику своїх колег-лікарів, що притримуються традиційної концепції



медицини. Г.-Г. Рекевер (1974 і 2000) і його наукова школа вважає, що чинники здоров'я людини слід ділити на:

1) фізичні (кліматичні подразники, висока або низька температура повітря, вітер, сонячне світло, коливання атмосферного тиску, електричний стан атмосфери, різні види випромінювань мікрохвильове, теплове, інфрачервоне, ультрафіолетове і рентгенівське, штучне освітлення, α - і β -частинки, γ -промені, радіохвилі, механічні дії, різні види вібрацій, шум, електросмог);



Ганс-Генріх Рекевер
(1905-1985)

2) хімічні (концентрація токсичних речовин в повітрі приміщень і вулиць озон, токсини покриттів і шпалер, засоби чищення, пил від килимів і паперу, цигарковий дим, фармацевтичні засоби, біотоксини);

3) біотичні (бактерії, віруси, грибові організми, продукти харчування, алергени, ендogenousні продукти метаболізму);

4) психічні фактори (перенапруження, недостатнє навантаження);

5) соціальні проблеми (негаразди в колективі, нестача любові, образи, втрата роботи, дефіцит міжособистісного спілкування, злочинність, сексуальні проблеми, патологія структури особистості).

Чинники довкілля людини, зазвичай, діють на неї комплексно, з ефектами синергії чи антагонізму, проте їхню системну роль необхідно відстежувати від моменту й умов зачаття нового організму.

Консорційна екосистема людини, як біотичної істоти, починає формуватися ще в утробі матері внутрішньоекосистемними чинниками внутрішнім середовищем системи організму матері. Ігнорування складності взаємного співіснування нашого організму та його внутрішніх і зовнішніх облігатних чи факультативних, сапротрофних чи паразитних консортів бактерій, грибів, вірусів, червів і навіть деяких безхребетних організмів, є дуже небезпечним для нього.

Завдяки стрімкому розвитку медичної паразитології набагато глибше, ніж у молодій науці екології, розроблені питання біології й екології **паразитів людини**. Останніми роками розвивається екопаразитологія наука про біологію розвитку, шляхи поширення паразитів у природі, ареали й умови їх існування. Дещо звужена сфера досліджень все ж базується на системному баченні людини (її організму), як ядра консортивної гетеротрофної екосистеми. Більша увага паразитам приділена через їх небезпеку для здоров'я людини.

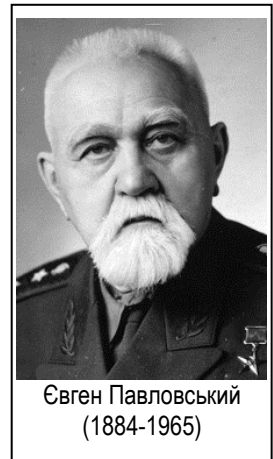
Паразитизм, як екоявище форма співіснування тварин і рослин, дуже поширений у природі (бактерії, віруси, гриби, багато безхребетних, рослини, водорості). Особливо багато видів паразитів людського тіла є з-поміж типів найпростіших, плоских і круглих червів.

Система "паразит-господар" є антагоністичною, вона дає користь лише одному з її учасників паразитові. Паразити це такі організми, які використовують організми іншого виду як джерело харчування і середовище існування, інколи завдаючи їм шкоди. При цьому паразит не вбиває свого господаря одразу, на відміну від хижака.



Паразитологія людини (гр. *παράσιτος* дармоїд і *λόγος* - наука) наука про біологію й екологію паразитів, їх взаємовідношення з організмом-господарем і навколишнім середовищем, спричинені ними хвороби і заходи протидії їх шкодочинності.

Проте, ставлення до паразитизму не повинно бути лише негативним, адже взаємовідношення в системі "паразит-господар" ґрунтуються на об'єктивних екологічних закономірностях. Зокрема, в екосистемах паразити беруть участь у регуляції чисельності популяцій господарів детермінантів, обмежуючи її ріст. Це, своєю чергою, може призводити до виснаження ресурсів екосистеми, порушити екобаланс, і, зрештою, обмежити поширення самого паразита. Різні паразити можуть відігравати також і роль господарів для дрібніших паразитів консортів наступного концентру. Явище "над паразитизму", або "гіперпаразитизму" відоме у зовнішньому шарі сисунів, де найпростіші є консортами другого концентру. Воно є позитивним, оскільки найпростіші гальмують розвиток свого детермінанта сисуна. Вводячи в організм людини фармацевтичні препарати, потрібно ставити питання: чи не нашкодимо ми цим найпростішим, що контролюють популяцію, чи організм сисуна?



Євген Павловський
(1884-1965)



Паразити людини – це зити (гр. *σιτος* поїдач), середовищем існування і харчування яких є людське тіло.

Загальне визначення слова "паразит" стосується не лише багатоклітинних і найпростіших, що живуть за рахунок свого господаря і на шкоду останньому, але також вірусів, бактерій і грибів з подібними особливостями. Згідно історичної традиції, і з точки зору медичної паразитології, паразитами прийнято називати будь-які істоти, що ведуть паразитичний спосіб життя, крім вірусів і бактерій з подібними якостями.

На відміну від інших організмів, зовнішнім середовищем паразитів людини є її живий організм. Вчення про організм, як середовище існування, найповніше розробив професор, генерал-лейтенант медичної служби Євген Павловський. Середовищем щодо паразита будуть як органи



господаря, так і інші консорти, які його населяють. Це середовище першого або другого порядку. Середовище другого порядку діє на паразитів опосередковано, через тіло детермінанта.

У будь-якому організмі водночас з паразитами є й інші організми симбіонти.



Всю сукупність консортів разом з організмом господаря паразитологи називають **симбіоценозом** (Маркевич, 1950). Компонентами симбіоценозу є віруси, рикетсії, спірохети, бактерії, гриби, найпростіші, гельмінти, членистоногі тощо.



Структурно-функціональна сукупність тіла живої людини (детермінанта), симбіоценозу і створюваного цією сукупністю внутрішнього і зовнішнього середовища є **консорційна екосистема людини**.

Перелік відомих сьогодні внутрішніх і зовнішніх паразитарних консорт людського організму поданий у таблицях 15.1, 15.2 і 15.3.

Кожна окрема **антропоекосистема** є унікальною і неповторною, хоча набір компонентів та основні властивості її будови й функції можуть бути майже однаковими, залежно від тісноти індивідуальних контактів у соціумі.

Погіршення стану господаря найчастіше стає загрозою для консортів, інколи навпаки: паразити активізуються і можуть створити синергетичний ефект з іншими негативними чинниками.

Всередині симбіоценозу між окремими компонентами й організмом-детермінантом устанавлюються складні екогенні взаємовідношення. Консорти різних концентрів і детермінант людський організм, які формують симбіоз, забезпечують урівноважене функціонування організму людини. У нормі в тілі людини чи тварини кількість мікросимбіонтів більша, ніж власних клітин.

З ними пов'язаний синтез низки білків ферментів, вітамінів, яких не може самотійно синтезувати організм людини. Виключно за присутності непаразитичних і паразитичних симбіонтів формується імунітет, утворюються імунокомпетентні клітини.

Формування консорційної екосистеми індивіда (кожної окремої людини) починається до народження.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...



Табл. 15.1. *Внутрішньоорганізмові консорти ендопаразити*

Рід, вид захворювання	Орган оселення	Місцевість поширення	Джерело заселення
<i>Acanthamoeba</i> – Акантамебіаз	очі, мозок	повсюдно	контактні лінзи, ополоскані водою з-під крана
<i>Entamoeba histolytica</i> – Амебіаз	кишківник	області з поганою санітарією, високою щільністю населення і в тропічних широтах	фекально-оральна передача
<i>Babesia divergens</i> , <i>B. Bigemina</i> та ін. Бабезіози	еритроцити	повсюдно	укус кліща
<i>Balantidium coli</i> – Балантидіаз	слизова кишківника	повсюдно	навколишнє середовище
<i>Blastocystis</i> – Бластицістоз	кишківник	2-20% населення	фекально-оральна передача
<i>Trypanosoma cruzi</i> – Хвороба Шагаса	товста кишка, стравохід, серце, нерви, м'язи і кров	Мексика, Центральна і Південна Америка – 16-18 млн осіб	<i>Triatoma</i> або <i>Reduviidae</i> – нічні укуси
<i>Dientamoeba fragilis</i> – Діентамебіаз	кишківник	до 10% в промислово розвинених країнах	фекально-оральна передача
<i>Isospora belli</i> – Ізоспоровоз	епітеліальні клітини тонкої кишки	у всьому світі, менше розповсюджений, ніж <i>Toxoplasma</i> або <i>Cryptosporidium</i>	фекально-оральна передача
<i>Cryptosporidium</i> – Коксидіоз	кишківник	широко розповсюджений	фекально-оральна передача
<i>Leishmania</i> – Лейшманіоз	шкіра, слизова оболонка, нутрощі	<i>Visceral leishmaniasis</i> , <i>Cutaneous leishmaniasis</i> – Старий Світ; <i>Mucocutaneous leishmaniasis</i> – Новий Світ	<i>Phlebotomus</i> – укуси декількох різновидів
<i>Giardia lamblia</i> – Лямбліоз	тонка кишка	по всьому світу	ковтання цист в зараженій фекаліями воді або їжі
<i>Plasmodium falciparum</i> , <i>Pl. vivax</i> та ін. – Малярія	еритроцити, печінка	тропіки 250 млн випадків щороку	комар <i>Anopheles</i> нічні укуси
<i>Naegleria fowleri</i> - Неглеріоз	мозок	рідкісний, але смертельний	носом із зараженої прісної води, не хлорованої у басейні, термоджерела, ґрунт
<i>Rhinosporidium seeberi</i> Ріноспоридіоз	ніс, носоглотка	Індія і Шрі-Ланка	носова слизова оболонка через купання у відкритих водоймах
<i>Trypanosoma brucei</i> – Сонна хвороба	лімфа крові і центральна нервова система	від 50000 до 70000 осіб	Муха цеце, нічні укуси
<i>Toxoplasma gondii</i> Токсоплазмоз	очі, мозок, серце, печінка	широко розповсюджений – у кожній третій людині	сирі чи недоварені свинина, козлятина, баранина, некип'ячене молоко, вода або ґрунт зі спорами з калу кішки, якому більше доби
<i>Trichomonas vaginalis</i> – Трихомоніаз	жіноча сечостатева система	7,4 млн американців	інфекція, що передається статевим шляхом

Табл. 15.2. **Внутрішньоорганізмові консорти гельмінти**

Рід, вид захворювання	Орган оселення	Місцевість поширення	Джерело заселення
1	2	3	4
<i>Ancylostoma duodenale</i> , <i>Necator americanus</i> – Анкілостомоз	легені, тонка кишка, кров	поширений в тропіках, жаркому і вологому кліматі; 1,3 млрд носіїв	проникнення через шкіру личинкою L3
<i>Anisakis</i> – Анізакідоз	алергічна реакція	людина випадковий господар	вживання сирової риби, кальмарів, восьминогів
<i>Ascaris lumbricoides</i> – Аскаридоз синдром Леффлера	кишківник, печінка, апендикс, підшлункова залоза, легені	поширена повсюдно, але особливо в тропіках і субтропіках	забруднені землею руки
<i>Baylisascaris procyonis</i> – Байлісаскаридоз	кишківник, печінка, легені, мозок	Рідко у Північній Америці	екскременти єнотів
<i>Brugia malayi</i> , <i>Brugia timori</i> Бругіоз	лімфатичні вузли	тропічні області Азії	членистоногі
<i>Hymenolepis nana</i> , <i>Hymenolepis diminuta</i> – Гіменолепідоз	тонкий кишківник	повсюдно	вживання їжі, забрудненої борошняними жучками, тарганами
<i>Gnathostoma spinigerum</i> , <i>Gn. hispidum</i> – Гнатостомозі	підшкірні тканини	зрідка Південно-Східна Азія	сире або недоварене м'ясо (прісноводна риба, кури, равлики, жаби, свині) або забруднена вода
<i>Dicrocoelium dendriticum</i> – Дікроцеліоз	жовчний міхур	малопоширений	вживання в їжу мурах
<i>Dioctophyme renale</i> – Діоктофімоз	як правило нирки	по всьому світу	вживання в їжу недовареної або сирової прісноводної риби
<i>Dipyllobothrium latum</i> – Діфіллоботріоз	кишківник, кров	Європа, Японія, Уганда, Перу, Чилі	вживання в їжу сирової прісноводної риби
<i>Dracunculus medinensis</i> – Дракункульоз	підшкірні тканини	Судан, в 1940-х 48 млн осіб щорічно, в 1998 р. – 80 тис. осіб	вживання в їжу сирової прісноводної риби
<i>Clonorchis sinensis</i> , <i>Cl. viverrini</i> – Клонорхоз	печінка і підшлункова залоза	Далекий Схід в Нижньому Приамур'ї	вживання сирової або недостатньо термічно обробленої риби
<i>Loa loa filaria</i> – Лоаоз	спол. тканина, легені, очі	дощові ліси Західної Африки 12-13 млн осіб	гедзь, денні укуси
<i>Mansonella streptocerca</i> – Мансонельоз, Філяріатози	підшкірний шар	Місця поширення мокреців	комахи
<i>Metagonimus yokogawai</i> – Метагоніоз	тонка кишка	Сибір, Китай (Маньчжурія), Балкани, Ізраїль, Іспанія	вживання в їжу недовареної або сушеної риби
<i>Onchocerca volvulus</i> , <i>Onchocerciasis</i> – Річкова сліпота	шкіра, очі, тканини	17 млн осіб в Африці, Ємені, Центр. і Півд. Америці, біля холодних, швидких річок	<i>Simulium</i> мошки, денні укуси
<i>Opisthorchis viverrini</i> , <i>Op. felinus</i> , <i>Clonorchis sinensis</i> – Опісторхоз	жовчні протоки	1,5 млн осіб в Росії	вживання зараженої сирової, слабосоленої або замороженої риби

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...



Продовження табл.15.2

1	2	3	4
<i>Paragonimus westermani</i> ; <i>P. africanus</i> ; <i>P. caliensis</i> Парагоніміоз	легені	Східна Азія	вживання сирих недоварених прісноводних річкових раків, крабів та інших ракоподібних
<i>Wuchereria bancrofti</i> – Слонова хвороба	лімфатична система	тропіки та субтропіки, 120 млн осіб	нічні укуси москітів
<i>Spirometra erinaceieuropaei</i> – Спарганоз	очі, шкіра	Японія, КНР, РФ (в Примор'ї), КНДР, Східна Африка, Білорусія	вживання їжі, забрудненої калом собаки чи кішки (людина: кінцевий господар)
<i>Strongyloides stercoralis</i> – Стронгілоїдоз	кишківник, легені, шкіра (личинка)	Грузія (Абхазія і Аджарія), Азербайджан, захід України, Північний Кавказ,, Ростовська обл., Приамур'я	проникнення через шкіру
<i>Taenia saginata</i> – Тениаринхоз	кишківник	повсюдно	вживання в їжу недовареної яловичини
<i>Taenia solium</i> – Свинячий ціп'як	кишківник	по всьому світу	вживання в їжу недовареної свинини
<i>Toxocara canis</i> ; <i>T. cati</i> – Токсокароз	печінка, мозок, очі	по всьому світу	немита їжа, заражена недоварена печінка курчати
<i>Trichinella spiralis</i> , <i>Tr. britovi</i> й ін. Трихінельоз	м'язи, тонка кишка	поширений в країнах, що розвиваються	вживання в їжу недовареної свинини
<i>Trichuris trichiura</i> , <i>Tr. vulpis</i> – Трихоцефальоз	товста кишка, задній прохід	по всьому світу	випадкове ковтання яєць з їжею, забрудненою людським калом
<i>Fasciola hepatica</i> , <i>F. gigantica</i> – Фасціольоз	печінка, жовчний міхур	<i>F. hepatica</i> в Європі, Африці, Австралії, Америці та Океанії; <i>F.</i> <i>gigantica</i> тільки в Аф- риці й Азії 2,4 млн осіб заражені обома різними видами	прісноводні равлики
<i>Fasciolopsis buski</i> – Фасціолопсідоз	кишківник	Східна Азія 10 млн осіб	вживання всередину інвазованих водоростей або води (проміжна ланка равлики, господарі амфібії)
<i>Trichobilharzia regenti</i> , <i>Schistosomatidae</i> – Церкаріоз	кишківник, шкіра	повсюдно	через шкірний контакт з во- дою, зараженою равликами і хребетними
<i>Cestoda</i> – Цестодоз	кишківник	малопоширений	при потраплянні в кишківник яєць карликового ціп'яка, ехінокока та їх личинок (бичачого і свинячого ціп'яків)
<i>Schistosoma mekongi</i> – Шистосомоз азіатський	кишківник	Південно-Східна Азія	потрапляння на шкіру води, зараженої виділеннями равликів <i>Neotricula aperta</i>
<i>Schistosoma haematobium</i> – Шистосомоз сечостатевої системи	нирки, сечовий міхур, сечоводи, легені, шкіра	Африка, Близький Схід	потрапляння на шкіру води, зараженої виділеннями пріс- новодних равликів <i>Bulinus</i>
<i>Schistosoma mansoni</i> – Шистосомоз Менсона	кишківник, печінка, селезінка, легені, шкіра	Африка, Карибський регіон, Південна Америка, Азія, Близький Схід 83 млн осіб	потрапляння на шкіру води, зараженої виділеннями пріс- новодних равликів <i>Biomphalaria</i>



Продовження табл. 15.2

1	2	3	4
<i>Schistosoma japonicum</i> – Шистосомоз японський	кишківник, печінка, селезінка, легені, шкіра	Китай, Східна Азія, Філіппіни	потрапляння на шкіру води, зараженої виділеннями пріс- новодних равликів <i>Oncomelania</i>
<i>Enterobius vermicularis</i> , <i>En. gregorii</i> – Ентеробіоз	кишківник, задній прохід	помірний пояс повсюдно	Зараження при заковтуванні яєць з їжею, при вдиханні з пилом
<i>Echinococcus granulosus</i> , <i>Ech. multilocularis</i> , <i>Ech. vogeli</i> , <i>Ech. oligarthrus</i> – Ехінокок	печінка, легені, нирки, селезінка	країни Середземномор'я	як проміжний господар вжи- вання їжі, забрудненої калом від м'ясоїдних тварин; як постійний господар вживання в їжу сирого м'яса (потрохів) від травоядних
<i>Ech. echinatum</i> – Ехіностомоз	тонка кишка	Далекий Схід	вживання в їжу сирої риби, молюсків, равликів

Табл. 15.3. Зовнішні консорти ектопаразити

Рід, вид захворювання	Орган оселення	Місцевість поширення	Джерело заселення
<i>Pediculus humanus capitis</i> – Воша головна (Педикульоз)	волосянні фолікули	повсюдно	близький контакт з зараженими людьми
<i>Phthirus pubis</i> – Воша лобкова (Педикульоз)	лобкова ділянка, повіки	повсюдно	шкірний контакт, статеві стосунки, заражений одяг, постільна білизна
<i>Pediculus humanus corporis</i> – Воша платяна (Педикульоз)	волосянні фолікули	повсюдно	шкірний контакт, статеві стосунки, заражений одяг, постільна білизна
<i>Demodex folliculorum</i> ; <i>D. brevis</i> ; <i>D. canis</i> – Демодекоз	брови, повіки	повсюдно	шкірний контакт
<i>Cimicidae</i> , <i>Cimex lectularius</i> – Клопи постільні	шкіра	повсюдно	змішання верхнього одягу і постільної білизни
<i>Cochliomyia hominivorax</i> – Кохліоміаз	шкіра і рани	Центр. Америка, Півн. Африка	прямі контакти з мухами
<i>Sarcoptes scabiei</i> – Короста (кліщ шкірний)	шкіра	повсюдно	шкірний контакт, статеві стосунки, заражений одяг, постільна білизна

Як пише С. Zimmer (2011), перші 15 місяців наш кишківниковий симбіоценоз, або його ще називають мікробіомом, розвивається й урізноманітнюється. В матці матері ми зачаті стерильними. Але кожен малюк від моменту появи у повітрі з мікробами отримує їх мимоволі. Немовлят, що народилися операційним шляхом, колонізують мікроби зі шкіри їхніх матерів.

Більше мікробів поселяються усередині наших тіл у місяці, коли вони проникають шляхом засвоєння бактерій з молоком, з кінчиків пальців, з інших джерел. Діаграма (рис. 15.1) показує, як змінюється і збільшується мікробне різноманіття у кишківнику немовляти упродовж перших 454-ох діб його життя.

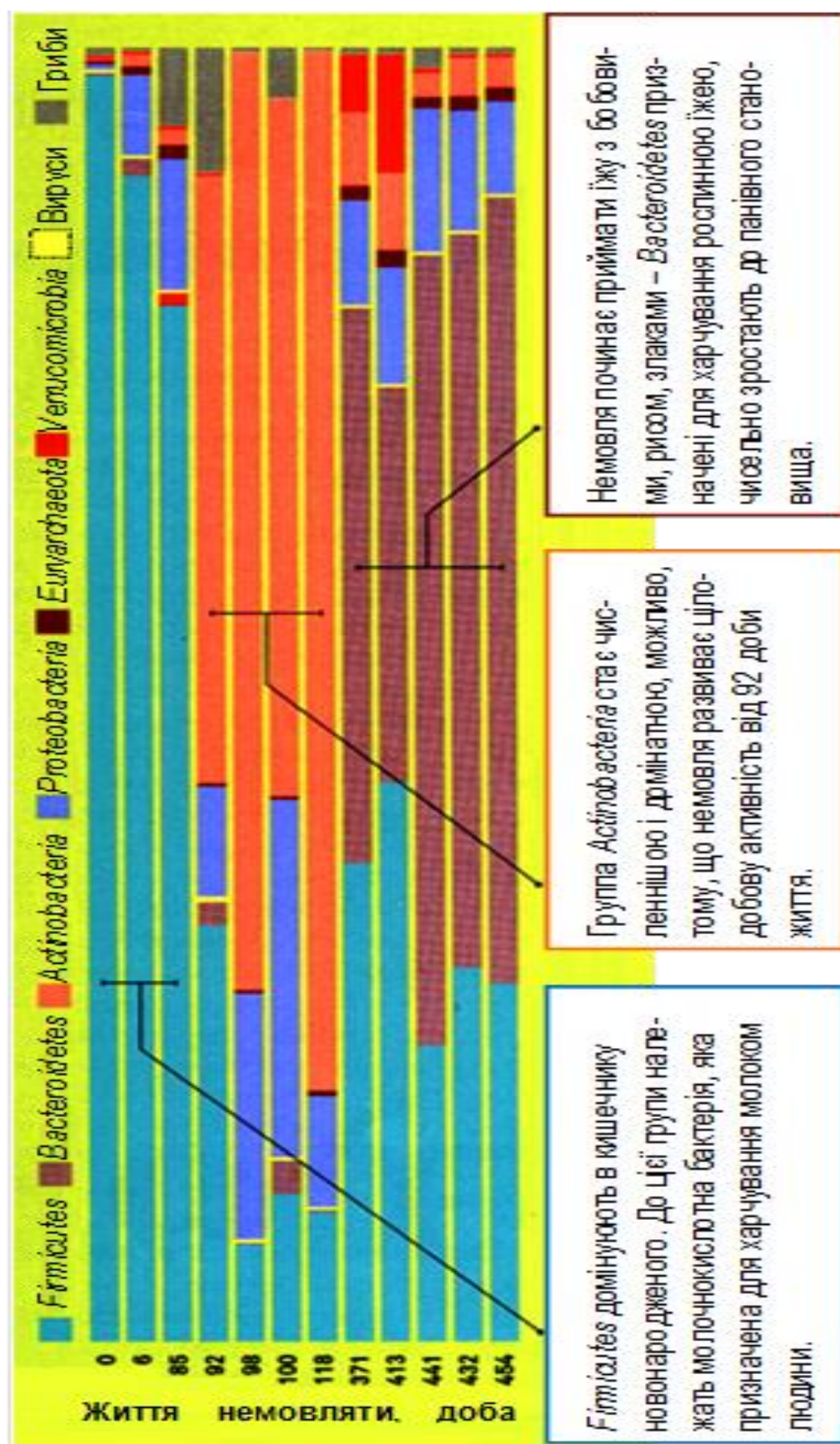


Рис. 15.1. Діаграма розвитку симбіотичного кишечника немовляти (Zimmer, 2011; https://www.wired.com/2011/09/mf_microbiome/)



Взаємовідношення між організмом людини й комплексом симбіозу є також джерелом патологічного процесу (хвороби) в тілі. Показовими є дослідження з зараженням морських свинок культурою найпростіших збудників амебіази. Коли заразити свинок, які штучно позбавлені кишкових бактерій, то хвороба не виникає. Водночас, тварини з "нормальною" мікрофлорою захворювали тяжкою формою амебіази.

Для людини збалансований мікробіом шлунково-кишкового тракту це та субекосистема, яка формує не лише нормальний обмін енергопластичних речовин, а й імунітет і самопочуття усього організму.

Як зовнішній чинник для нормального життя людини і тварин є кисень, діоксид вуглецю й температура атмосфери, так для мікробіоти pH внутрішньошлункового і внутрішньокишкового травних соків є визначальною умовою нормального чисельного співвідношення біфідобактерій, лактобактерій і патогенних мікробів (стафілококи, стрептококи, клостридії, грибки).

Соляна кислота регулює такі функції: сприяє денатурації і набубнявінню білків в шлунку, що полегшує "роботу" пепсину; активує пепсиноген і метаболізує його в пепсин; формує оптимальне середовище дії ферментів шлунка; забезпечує його антибактеріальну дію; сприяє нормальному видаленню їжі завдяки контрольованому відкриттю пілоричного сфінктера з боку шлунка і закриттю з боку дванадцятипалої кишки; збуджує панкреатичну секрецію.

Історично сформовані традиції південноєвропейських народів вживати вино (кисла реакція), а північноєвропейських пиво, мають тверду соціоекогенну підоснову.

Для південних народів від давнини проблемою було захистити кишково-шлункових тракт від зовнішніх патогенів і для цього кисле сухе вино, навіть з водою (яка зазвичай була нечистою). Натомість північні народи, живучи у мало агресивному мікробному середовищі, які харчувалися багатими органічними кислотами овочами, фруктами тощо, віддавна мають проблему нейтралізації підвищеної кислотності шлунка, тому і традиційно роблять це лужним пивом.

Мікроби на шкірі живляться жиром, білками з поту. *Staphylococcus* епідермісу виділяє токсини, котрі вбивають хвороботворні мікроорганізми і надсилають сигнали імунній системі, щоби та швидше реагувала. В роті локалізовано приблизно 500 видів мікробів, з них 300-400 є спільними для близьких людей. У вусі хворої дитини може бути до 11 видів бактерій. У горлі людини живе до 200 млн особин вірусів в 1 мілілітрі слизу. Легені містять свій мікробіом, який розбалансовується від захворювань і людина втрачає імунітет. У шлунку оселяється приблизно 100 видів бактерій. Товстий кишківник є своєрідним мегаполісом мікроорганізмів приблизно 200 видів. Склад індивідуального меню визначає багатство й ефективність нашого шлунково-кишкового мікробіома. Втручання антибіотиками в

організм розбалансовує симбіоценоз людини, який повертається до норми лише за два роки. Навіть на різних руках людини зосереджені різні мікробіоценози.

Розвиток патогенних грибів у тілі людини стримують симбіотичні бактерії-коменсали. Існування їх може бути пригнічене за лікування людини антибіотиками, чим створюються сприятливі умови для патогенних грибів. Тому впровадження у медичну практику антибіотиків призвело до почастищення захворювань, які спричиняють паразитичні гриби, зокрема роду *Candida* (кандидомікози).

Численні факти переконують у тому, що захворювання, які спричиняють паразити, розвиваються внаслідок різноманітних взаємовідношень між організмом людини і комплексом його консортів симбіоценозом.

Встановлено, що люди, які страждають від гельмінтозів (тобто уражені паразитичними червами-гельмінтами), важче хворіють на туберкульоз, черевний тиф, деякі хвороби нервової системи і багато інших. Це обов'язково мають знати і лікар і пересічні люди. За лікування будь-якої хвороби необхідно позбавляти пацієнта від супутніх хвороб, які спричинені паразитичними консортами. При цьому не слід забувати, що кожний організм-детермінант разом з усім своїм симбіоценозом є частиною біоценозу (з усіма його біотичними й абіотичними факторами). Щодо людини, то окрім перерахованих чинників, певну роль відіграють і соціальні умови.

Отже, порушення або зміщення внутрішньої динамічної функціональної рівноваги з метою лікування, оздоровлення тощо, за допомогою різних, з-поміж іншого і фармацевтичних препаратів, дієт, до їжі добавок (супліментів) може спровокувати активізацію шкідливих для організму або сапрофітних видів за рахунок нейтралізації чи пригнічення інших корисних (дисбактеріоз, токсоплазмоз, гельмінтоз тощо).

Раптова заміна звичних для людського організму свіжих (сирих) продуктів харчування на нові або екзотичні призводить до виникнення проблем через відповідну реакцію корисної мікрофлори шлунку й кишківника, яка живиться і функціонує як облігатні консорти. Її популяції живуть у середині нашого організму як ендосимбіонти. Важливо пам'ятати, що для внутрішньої мікрофлори шкідливими є різноманітні синтетичні барвники, стабілізатори і консерванти, котрі потрапляють у травну систему із сучасними фабричними продуктами харчування. Доведено, що регулярне вживання "збагачених" такими компонентами субстанцій, спричинює глибокі хронічні розлади й особливо небезпечне для молодих несформованих організмів.

Нез'ясованим до кінця залишається вплив на ендосимбіонти продуктів, що отримані з генномодифікованих організмів шляхом генноінженерійних маніпуляцій неприродними комбінаціями ланок ДНК різних, генетично "віддалених" організмів. Проте є підозра на імовірність спонтанної непри-



родної рекомбінації таких генетичних химер у процесі метаболізму синтетичних ДНК, або продуктів їхньої "діяльності", й подальше просування таких біологічних "помилко" по метаболічних, чи генетичних ланках функціонування мікроорганізмів або й власне людини. А це вже загрожує нам на генетичному рівні.

Небезпечним є також порушення балансу співіснування мікроорганізмів, що живуть на тілі людини, на її шкірі. Спостереження показали, що багато сучасних засобів гігієни (креми, дезодоранти, парфумерія), які містять синтетичні консерванти й стабілізатори (парабени), за їх систематичного використання спричиняють розбалансування біоценозів нашкірної мікробіоти. Це призводить спершу до виникнення виразних запахів, згодом до виникнення дерматозів чи подразнень шкіри, розвитку на тілі людини неспецифічних мікроорганізмів, грибків, пересихання, відмирання й лущення епідермісу. Кліщі роду демодекс, що живуть на лицевій шкірі кожної людини, живляться відмерлою шкірою, бактеріями та жировими речовинами, виконують "санітарну" роботу на шкірі та лише у разі різних ушкоджень, подразнень чи інших причин сильного ослаблення цілого організму, можуть спричиняти хвороби шкіри чи повік.

Людина в ході еволюції позбулася і далі позбується присутності в її консортивні екосистеми багатьох небажаних компонентів. З іншого боку в ході соціальної еволюції, розвитку свідомості, культури й матеріального виробництва, утворенню сучасних форм соціумів (сім'я, родина, робочий колектив, хутір, село, місто, мегаполіс, держава) людина розумна і соціальна значно розширила й урізноманітнила коло компонентів своєї консортивної системи.

Розпочати варто з корисливого приручення диких тварин одомашнення, а в окремих випадках і створення неприродних гібридів (гібридизація віл, мул), які завдяки поведінковій адаптації втратили здатність самотійно жити в дикій природі. Воли і мули не можуть розмножуватися, а деякі екзотичні породи собак не можуть природно народжувати цуценят, тому з'являються на світ лише завдяки оперативному втручанню. Релігійні традиції деяких народів зробили окремих тварин культовими, завдяки чому вони оселяються навіть у мегаполісах (святих корови й мавпи), де створюють доволі великі проблеми у їх безпечному функціонуванні. Багато видів тварин (птахи, гризуни, навіть хижак) стали синантропними видами. Це означає, що вони значною мірою залежні від різних форм людського соціуму та багатьох коопераційних екофункцій трофічної (таргани, пацюки, миші, навіть лисиці та єноти), форичної і топичної (домашні горобці, білі лелеки, миші пацюки тощо). В соціумі людини присутня велика кількість тимчасово приручених екзотичних тварин. Усі вони є факультативними консортами другого і третього концентрів, які мають певні взаємовідношення з іншими, у т.ч. облігатними консортами (поширюють паразитів, інфекції тощо).

Значно більший перелік набутих автотрофних консортів. Це окультурені рослини, які в природі не поширені, або походження їх невідоме: жито, пшениці, ячмені, зокрема їх численні сорти, садові й овочеві культури й декоративні види, навіть, кімнатні рослин. Перенесені в інші умови існування, екзотичні рослини не можуть жити без підтримки людини. Отримані генними маніпуляціями тритикале й численні генномодифіковані рослини й тварини є суто рукотворним компонентом і ця сфера розширення людської консорції потребує серйозного ставлення щодо безпеки самих їх творців.

Отже,



Консорційна екосистема людини – антропоекосистема, це природно або цілеспрямовано асоційована сукупність живих організмів, у якій домінує людська особа (як у біотичному, так і в соціальному розумінні), а решта біонтів пов'язані з нею та між собою різними формами екофункцій, і в цій сукупності тривають речовинно-енергетичний та інформаційний обміни, спонтанно чи свідомо формується власне специфічне внутрішнє середовище, яким прагне раціонально керувати детермінант.

На скільки успішно людина справляється з керуванням своїми консортами, настільки здоровим, матеріально й духовно багатим та естетично привабливим є її спосіб життя. У цьому можна пересвідчитися, порівнявши спосіб життя різних людей, цілих соціальних груп і прошарків (від аристократичних королівських сімей до одиноких асоціальних осіб без певного місця мешкання. У цьому ряду: соціуми ескімосів (рибне і м'ясне меню) і радикальні вегетаріанці-сироїди вегани; африканські племена, які обмазують дітей свіжим коров'яком для зміцнення імунітету і водночас ритуально споживають сиру коров'ячу кров, та аборигени тундри, що живуть у практично стерильній щодо збудників простудних хвороб атмосфері, первісні племена тропічних лісів і узбережжя морів, які є переважно сироїдами та корінні народи Заполяр'я, що харчуються не зараженою паразитами, соленою і в'яленою рибою.

Вчення про консорційну екосистему людини глибоко не розроблене. Причини цього не лише у молодості самої екології. Вагомою причиною слабого розвитку цієї сфери знань є політична складова, адже практично усі дослідження паразитології, токсикології, мікробіології (бактеріології, мікології і вірусології) у стосунку до людини, людського здоров'я, були і дотепер залишаються сферою глибоко секретною з міркувань військової безпеки, а також із комерційних, суто меркантильних. Адже дотепер



основними важелями регулювання і контролю за популяціями паразитів і мікробів у людському організмі залишаються синтетичні хімічні препарати, від виробництва яких монополії отримують необґрунтовані надприбутки. Вивчення й застосування у практиці медицини й профілактики захворювань, спричинених консортами, природних закономірностей і природних компонентів (препаратів, організмів, антисептичного середовища тощо) значно здешевить для хворого процедури лікування.

Аутекологічну стійкість і пристосованість багатьох генетичних і фізіологічних систем у людини, пояснюють спонтанним відбором стійких індивідів до патогенних факторів середовища. Підставою для екогенного пояснення природи адаптацій є спостереження над зв'язком наявності груп крові системи АВ0 (A^1 , A^2 , B і O) зі схильністю до інфекційних захворювань, які статистично підтверджені. Слабка резистентність давніх популяцій людини до бактеріальних і вірусних інфекцій, а також насиченість мікрофлорою і фауною середовища життя найдавніших людей, сприяли формуванню балансованого поліморфізму, як основи адаптивності, вже на ранніх етапах людської еволюції.

Спостереження над структурними компонентами людського тіла виявили залежність багатьох з них від кліматичних і зональних чинників (Алексеев, 1979). Поверхня, вага і пропорція тіла, будова голови і м'яких тканин обличчя, частково і кісткової основи індивіда корелюють з умовами постійного проживання популяцій. Відбір таких особливостей, залежно від широтної зональності і кліматичних умов, свого часу відбувався інтенсивно. Расові адаптивні комплекси сучасної людини почали формуватися до початку Голоцену від Муст'єрського часу. Природно-зональні особливості послужили одночасно і поштовхом, і тлом адаптивного процесу і приводили до морфо-фізіологічної специфікації окремих популяцій, діяли одночасно на багато популяцій, закріплюючи певні загальні для них ознаки. Такі поєднання становили основу для виникнення расових відмінностей у людей.

Дія кліматичних факторів на людську популяцію у ході соціальної еволюції поступово послаблювалася. З похолоданнями клімату або переселенням у холодні широти людина розумна використовувала і печери, і будувала жила, й опалювала їх, створювала щораз якіснішу одягу.

Адаптивні функціональні можливості людини певною мірою відображає поняття конститутивного типу. Виділяють три генетично зумовлених **конститутивних типи** людей: "спринтер", "стаєр" і "мікст". Вони значною мірою формуються залежно від генотипів людей. "**Спринтер**" може витримувати потужні, але короткотривалі навантаження. Для нього властиві сильні фізіологічні реакції у відповідь на виражені, але короткотривалі зміни середовища. Він має великі резервні можливості, які швидко мобілізуються, але потребують тривалого часу для відновлення. "**Стаєр**"

може витримувати рівномірні навантаження триваліший час. Він має загалом невеликі резервні можливості, проте у нього процеси відновлення перманентно стійкі. "*Мікст*" має проміжні адаптивні можливості. Йому притаманний оптимально-адекватний спосіб реагування на зміни навколишнього середовища.

Сучасне організоване переміщення людей за трудовими або іншими угодами призводить до формування нових субпопуляцій у кліматичних умовах, не властивих для організмів переселенців раніше. При цьому тиск нових географічних чинників сприяє нагромадженню в мікропопуляції особин з тією генетичною структурою, яка споконвічно була властива для корінного населення. Зокрема, в умовах Крайньої Півночі пристосованішими і витривалішими виявляються переселенці з певними варіантами кислої еритроцитарної і лужної сироваткової фосфатаз, котрі генотипно адекватні для аборигенів.

Зміна харчування акліматизованих переселенців має вплив на їхню генетичну структуру. Негативні тенденції лікарі спостерігають від швидких змін традиційної дієти. У ескімосів Західної півкулі значно зросла частота певних форм діабету з тяжким клінічним перебігом від змін статусу живлення, спричиненого збільшеним вживання нетрадиційних харчових продуктів з підвищеним вмістом глюкози, карбогідратів та інших легкозасвоюваних цукрів. Це спричинило до прояву патологічних генів, що були раніше в прихованому стані і відповідали за розвиток діабету.

До техногенних факторів, що спричиняють негативні впливи, належать: підвищений радіаційний фон, хімічне й фізичне (шумове, світлове тощо) забруднення, надмірна фармакотерапія та інше.

Тривалі медико-біологічні дослідження екологічних відношень між людською популяцією і трансформованим довкіллям тепер дають підстави розглядати їх як новітні фактори еволюції.

15.3. Повітря, вода, харчування і умови життя як чинники здоров'я людини

Людина є біосоціальною істотою, тому її слід розглядати у тісному зв'язку як з природою, так і з суспільством.

З медичної точки зору (Барціховський і Шерстюк, 2011) екологія людини є інтегральною міждисциплінарною наукою, яка вивчає взаємовідношення людини як біосоціальної істоти з навколишнім середовищем, яке наповнюють елементи живої та неживої природи і діють соціальні та виробничі фактори, досліджує можливості керувати фізичним та психічним здоров'ям людини, її удосконаленням та розвитком.



Людина в доісторичну добу була таким же компонентом екопроцесів, як і інші живі організми. Біотичне пристосування людини до середовища існування в міру її соціалізації змінилося діяльністю, спрямованою на пристосування середовища для задоволення своїх потреб. При цьому вона з об'єкта екопроцесів перетворюється на їх суб'єкта. Своєю нескоординованою діяльністю людство бездумно пристосовує вже біосферу для створення найсприятливіших для себе умов існування. Цими діями людина компенсує обмеженість своїх можливостей біотичної адаптації до мінливих умов середовища. Виходячи зі своїх потреб, вона встановлює норми якості води, повітря, інших чинників середовища і намагається здійснювати заходи з їх оптимізації.

Внаслідок того, що людство як соціосистема з її господарською діяльністю, функціонує не за законами біотичних систем, в природі руйнується звичний біогеохімічний кругообіг речовин. Це призводить до зміни середовища існування (зокрема, внаслідок його різноманітного забруднення). З іншого боку, для системної оцінки якості природного середовища використовують показники стану здоров'я населення. Здорові люди є свідченням існування оптимальних умов життя, а розвиток хвороб індикатором порушення гармонії між організмом і умовами його існування.

Людські спільноти соціосистеми, є акцепторами значно більшого обсягу природних ресурсів біогеосфери, ніж будь-які інші системи Землі. 1992 року В. Різ (Rees, 1992) запропонував концепцію *екологічного сліду* (антропогенного чинника **П.Г.** і **О.С.**). Екологічний (не вдалий переклад *environmental П.Г.* і **О.С.**) слід людини у довкіллі (як аналог геоматичного сліду води на Землі) став популярним терміном, який описує спосіб урахування рівня впливу, який людське суспільство чинить на екосистеми Землі (Hoekstra, 2009). У нашу добу проявилися всі ознаки того, що людська діяльність є несталою, а суспільство занадто активно впливає на екосистему планети (Moran, 2008). Доповідь Всесвітнього фонду дикої природи (WWF-2008 "Жива планета") й інші дослідники констатують, що людська цивілізація перевищила біорегенеративну здатність планети (Moran, 2008; "Living Planet Report 2008", 2010). Це означає, що сліди людського споживання загрозливо більші від природних ресурсів, які можуть бути поповнені екосистемами Землі. Антропогенне навантаження на навколишнє середовище у багатьох регіонах планети вже досягло рівня, що загрожує здоров'ю населення (рис. 15.2). За оцінками експертів ВООЗ, щороку забруднення повітря спричинює до 7 млн передчасних смертей і призводить до втрати здорових років життя. Значення здоров'я людини не можна переоцінити.

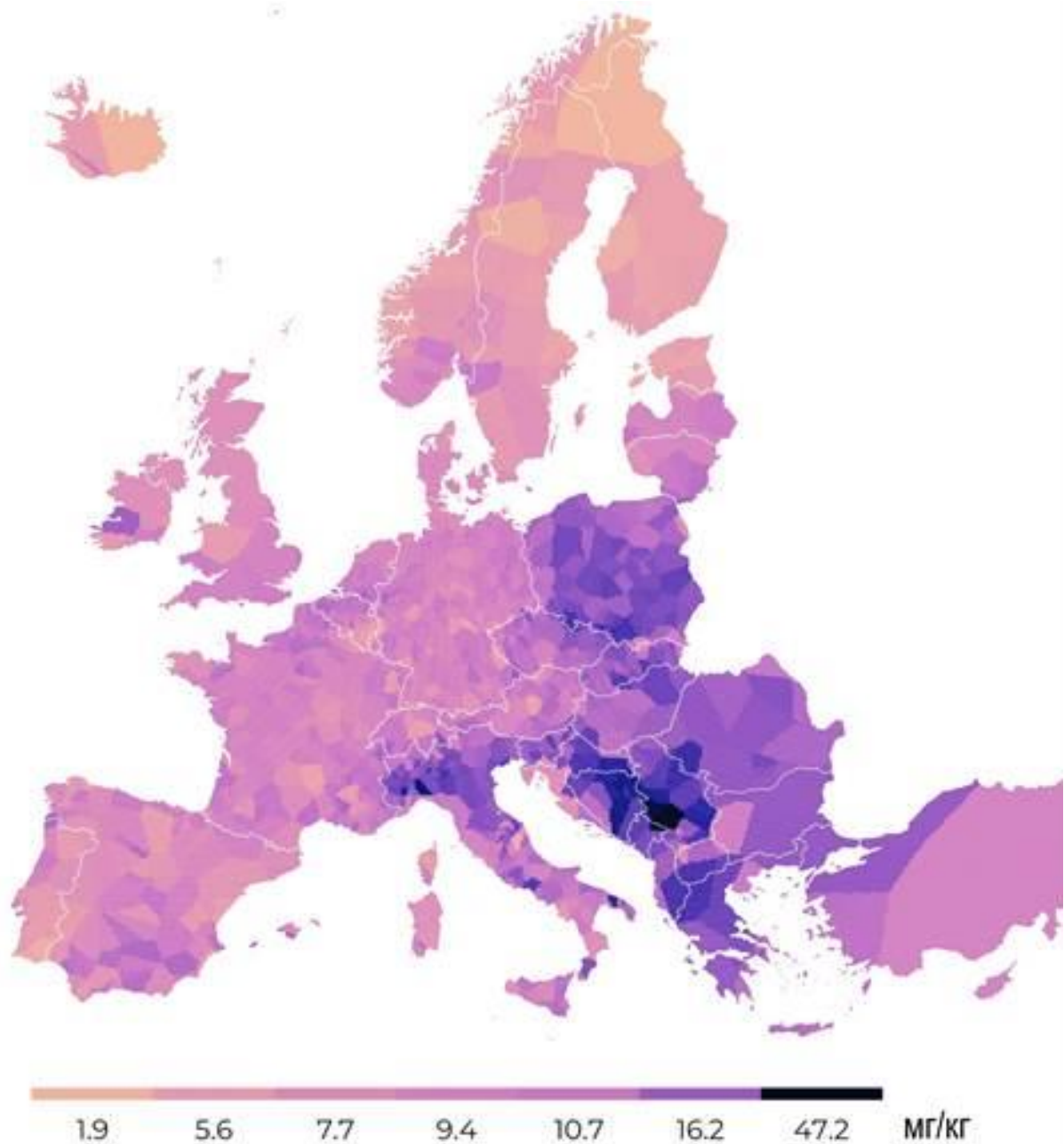


Рис. 15.2. Забруднення повітря в Європі за показником концентрації твердих часток (< PM_{2,5}) за станом на 2021-2023 роки (https://www.reddit.com/r/europe/comments/11bj9g0/air_pollution_in_europe_concentration_of/?rdt=42307)

Проте один раз успадковане від батьків, воно не залишається незмінним в упродовж життя індивіда. Динаміка стану колективного здоров'я залежить від двох чинників початкового рівня здоров'я поколінь та якості природних і соціальних умов їхнього наступного життя (Горова та ін., 2000; Тимченко й ін., 2002).

Експерти ВООЗ виділяють 4 групи факторів, які впливають на формування здоров'я людини: спосіб життя (50%), спадковість (20%), навколи-



шне середовище (20%), організація медико-санітарної допомоги (10%) (Principles..., 1994; Śiemiński, 2001). ВООЗ із політичних мотивів ігнорує питання якості харчування. Найвагомішими факторами в Україні потрібно вважати стан війни, якість навколишнього середовища та спосіб життя.

Невідворотність техногенного пресу на організм людини вимагає вивчення характеру та міри його впливу. Згідно з літературними повідомленнями, проведені численні дослідження факторів зовнішнього середовища за їхнім впливом на захворюваність людини (Сердюк, 1996; Навколишнє..., 1998).

Зокрема, біоаккумуляція у рослинних і тваринних організмах ксенобіотиків, рідкоземельних елементів, важких металів (ВМ) і радіоізотопів, зумовлює в них патогенні зміни, погіршує якість виготовлених із них продуктів харчування, інколи загрожує прямим отруєнням людей (Гончарук та ін., 1989; Аксенова, 2000).

Кількість полютантів, що припадає на 1 кв. км території в Україні в 6,5 рази вища, ніж у США, в 3,2 рази ніж у ЄС. Близько 16% усіх викидів в атмосферу містять мутагени (Сердюк, Бариляк і Горбань, 1998). Найбільший "внесок" у забруднення повітря це викиди від стаціонарних джерел підприємств енергетики (33% загального обсягу), металургії (25%), вугільної (25%), хімічної та нафтохімічної промисловості (2%) (Національна доповідь..., 1992; 1996; 1998).

На відміну від стаціонарних джерел, забруднення середовища автотранспортом набуває все більшого обсягу. При цьому широка гама токсичних сполук викидається не тільки на транспортних магістралях, але й у житлових районах. Тому автомобільний транспорт став однією із головних причин критичного техногенного навантаження на великі міста України (Набивач і Герасименко, 2002).

Проблема численних технохімічних катастроф, які виникали в Україні в останні 20 років, не зникла після певних інженерних, чи господарських заходів і потребує вирішення щодо наслідків для здоров'я населення. Зокрема це стосується "соснівської проблеми". Починаючи від 1995 р. у дітей Сокальського району (сmt. Соснівка, міст Червоноград і Сокаль) Львівської області спостерігали явище масового ураження емалі зубів, що переважно пояснюють надлишком надходження фтору в організм. Поряд з виявленням надмірного вмісту фтору у водозаборах Сокальського району (максимальний рівень 2,9% становив 1995 р.) спостерігали перевищення у 2 рази вмісту свинцю у молоці Сокальського молокозаводу, а також вмісту нікелю та стронцію у ґрунті. Отже, для цього регіону перевищення допустимих концентрацій ВМ і фтору у довкіллі явище не рідкісне. Вивчення наслідків тривалого проживання людей, зокрема вагітних жінок на подібних територіях, у великих містах щодо впливу на їхній геном є питанням актуальним (Рудько та ін., 1997; Інформація..., 1996).

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...

Коло потенційних шкідливих факторів зовнішнього середовища розширюється, адже зростає забрудненість продуктів харчування, води, повітря, робочих зон тощо. Професійна небезпека включає вплив хімічних засобів, пестицидів, азбесту, ВМ, тютюнового диму. Додаються й побутові фактори: радон, фарби, що містять свинець, недоброякісні продукти, косметика й фармацевтичні препарати (Trnovec et al., 2001). Забруднення ґрунту має вплив на збільшення вмісту шкідливих речовин і ВМ у продуктах харчування (рис. 15.3). Виявлена забрудненість агропродукції свинцем (28%), нітратами (7-8%), кадмієм (1%) від загальної кількості обстежених проб (Аксенова, 2000).

Наявність і збільшення кількості ВМ у навколишньому середовищі є актуальною гігієнічною проблемою в зв'язку з негативним їх впливом на здоров'я вагітних, породіль, немовлят. Останнє зумовлено тропністю ВМ до репродукційної сфери людини, їхньою здатністю до кумуляції, тривалим "напівжиттям" в організмі, антагонізмом до низки мікроелементів (Аксенова, 2000). Механізм шкідливої дії хімічних і фізичних мутагенів значною мірою залежить від утворення у клітині вільних радикалів, що спричинюють зміни в ковалентній структурі азотистих основ ДНК (Губський, 2000).

Ефект ксенобіотиків визначається в першу чергу класом токсичності речовин, тривалістю їхньої дії, віком та індивідуальною чутливістю організму. На сьогодні добре вивчені загальні механізми дії ксенобіотиків: генотоксичність (порушення структури та процесів репарації ДНК, нестабільність хромосом, ХА), ферментотоксична дія (зв'язування SH-груп ферментів або заміщення есенціальних металів з металоферментів, пригнічення мітохондріального дихання та порушення ферментів дихального ланцюга Кребса), мембранопатологічна дія (посилення перекисного окислення ліпідів), порушення кальцієвого гомеостазу й аеробного метаболізму клітин (Massaro et al., 1997).

Результати досліджень останніми роками показали, що зміни функції ферментів системи детоксикації ксенобіотиків підвищують уразливість організму людини щодо шкідливих впливів забрудненого довкілля, внаслідок чого збільшується ризик захворюваності й ускладнень під час вагітності

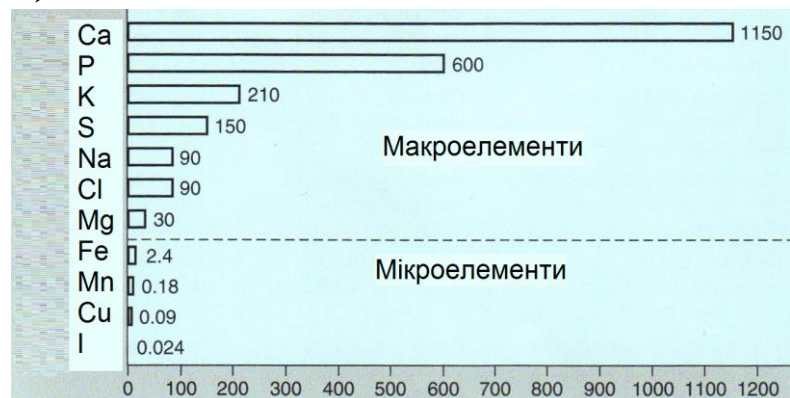


Рис. 15.3. Середній вміст макро- і мікроелементів у тілі здорової людини, г (Mader, 2002)

Хромосомні аберації (ХА) у соматичних клітинах виникають під впливом різних за природою чинників довкілля, з якими постійно в тій чи іншій мірі контактує людина. В експериментальних умовах їх можна індукувати певними агентами в клітинних культурах. Хромосомні аберації, виникаючи в процесі життя у соматичних клітинах, не мають значення в еволюції і не спричиняють виражених в нозологічній формі патологічних змін в організмі. Проте панує переконання, що нагромадження ХА в соматичних клітинах є одним із чинників, які стимулюють розвиток клонів злоякісних клітин, а також процесів старіння (Зайнуллин и Москалев, 2000).

У Львівській області було відібрано дві групи жінок у I триместрі вагітності, які постійно проживали в регіонах з різним рівнем забруднення навколишнього середовища: в обласному центрі Львові та в Сокальському районі, де розвинена гірничо-видобувна й інші галузі промисловості. Цитогенетичний аналіз провели у 26-и жінок, мешканок міста Львів та 24-ох вагітних із Сокальського району. Результати цитогенетичних досліджень показали, що діапазон індивідуальних коливань загального рівня ХА у лімфоцитах крові вагітних зі Львова становив від 0 до 4%, у вагітних Сокальського району від 2 до 7%. Середньогрупова частота аберантних клітин ($3,75 \pm 0,33\%$) та рівень загальної кількості ХА у вагітних із Сокальщини ($3,96 \pm 0,28$ на 100 метафаз) були вищими, ніж у вагітних із обласного центру $1,96 \pm 0,20\%$ аберантних клітин і $2,04 \pm 0,23$ ХА на 100 метафаз. Результати статистичного аналізу показників рівня ХА показали наявність достовірної різниці ($P < 0,01$) між двома досліджуваними групами (табл. 15.4).

[illegible]

досліджених метафазах були відсутні. Межі індивідуальних коливань пошкоджень хроматидного типу становили для вагітних зі Львова від 0 до 4%, а для вагітних із Сокальщини від 2 до 6% аберантних клітин. Середня частота аберацій хроматидного типу у вагітних із обласного центру була $1,92 \pm 0,21\%$, а у вагітних із району $3,83 \pm 0,26\%$.

Табл. 15.4. Частота та спектр аберацій хромосом лімфоцитів крові вагітних жінок за забруднення навколишнього середовища

Регіон дослідження	Частота хромосомних аберацій, %					
	Хроматидний тип	$P < 0,01$	Хромосомний тип	$P > 0,05$	Загальна частота	$P < 0,01$
м. Львів ($N = 26$)	$1,92 \pm 0,21$		$0,12 \pm 0,06$		$2,04 \pm 0,23$	
Сокальський р-н ($N = 26$)	$3,83 \pm 0,26$		$0,17 \pm 0,08$		$3,96 \pm 0,28$	

Серед аберацій хромосомного типу спостерігали лише ацентричні фрагменти, частота яких коливалася у межах 0-1% у популяціях обох регіонів. Дицентричну хромосому виявили лише в одному випадку, а кільцеві хромосоми були відсутні. Частота аберацій хромосомного типу у вагітних Сокальщини ($0,17 \pm 0,08$ на 100 метафаз) статистично не відрізнялася від рівня хромосомних аберацій ($0,12 \pm 0,06$ на 100 метафаз) у групі вагітних жінок зі Львова ($P > 0,05$). Не виявили в лімфоцитах крові жінок, мешканок обох досліджуваних регіонів, геномних мутацій (поліплоїдні набори хромосом та ендоредупліканти).

Порівнюючи цитогенетичні показники досліджених вагітних (Nechay, 2000; Zadrozna et al., 1997 і 1998), які проживали в регіонах з різним рівнем забруднення навколишнього середовища (Львів і його околиці, як урбанізована територія, і Червоноградський район, в якому найбільше розвинена гірничо-видобувна промисловість) переконуємося у наявності достовірної різниці між ними за частотою загального рівня ХА у лімфоцитах крові вагітних ($P < 0,01$). Це безперечно вказує на присутність у навколишньому середовищі Сокальщини мутагенів вираженої активності (Гаврилюк та ін., 1990) у значно більшій кількості, ніж у густонаселеному обласному центрі Львівщини. У зв'язку з домінуванням ХА хроматидного типу в обох популяціях робимо висновок, що в доквітлі, ймовірно, переважають активні мутагени хімічного походження, які традиційно є техногенними викидами гірничо-хімічного виробництва в будь-якому регіоні України. Враховуючи те, що аберації хроматидного типу в нашому дослідженні представлені переважно одиночними фрагментами і хроматидними обмінами, можна припустити, що порушення структури хромосом

відбувається на стадії реплікації ДНК й обміну сегментами між сестринськими хроматидами (фази S та G2).

Проте стан навколишнього середовища як у Червоноградському районі, так і у Львові не є настільки загрозливим для здоров'я людей, як у деяких інших регіонах України. Зокрема, маємо на увазі території забруднені радіонуклідами після аварії на Чорнобильській АЕС, та в м. Чернівці в 1988–1992 роках. Саме у цьому місті, вивчаючи причини й наслідки "чернівецької хімічної хвороби", О. Созанський і М. Лозинська (Зербіно і Сердюк, 1998) встановили особливості каріотипу вагітних жінок місцевої популяції, порівнюючи її з популяцією Львова (табл. 15.5).

Табл. 15.5. Порівняння частоти й спектру хромосомних аберацій у вагітних жінок м. Чернівці та м. Львів (Зербіно і Сердюк, 1998)

Регіон дослідження	Частота хромосомних аберацій, %		Загальна частота
	Хроматидний тип	Хромосомний тип	
м. Львів	1,58±0,18	0,25±0,09	1,86±0,23
м. Чернівці	3,58±0,55	1,47±0,24	4,58±0,65
P_{05}	<0,001	<0,01	<0,001

Автори довели, що на території, забрудненій солями важких металів і талієм, рівень загальної кількості ХА в лімфоцитах периферійної крові вагітних жінок у 2,5 рази перевищував відповідний показник у популяції Львова. Таке істотне перевищення вказує на значно сильніший мутагенний вплив техногенних чинників і, відповідно, на відчутно небезпечніший ступінь деградації навколишнього середовища у Чернівцях. Цитогенетичний ефект в лімфоцитах крові вагітних чернівецької популяції, у порівнянні зі львівською, охарактеризований ширшим спектром ХА та підвищеним рівнем їх загальної кількості та кількості аберації хроматидного типу.

Проте, потрібно зауважити наступне. Рівень загальної кількості ХА при обстеженні вагітних жінок зі Львова в 1988–1992 роках (див. табл. 15.5), був істотно нижчим, ніж у цій же популяції упродовж 1997–2001 років (див. табл. 15.4). Це дозволяє припустити, що рівень спонтанних хромосомних аберацій у соматичних клітинах людини може підвищуватись за рахунок невинного зростання не лише локального, а й фонового забруднення мутагенними компонентами навколишнього середовища в Україні.

Отже, потрібно підкреслити, що рівень загальної кількості ХА у популяції Львова є істотно вищим за фонові параметри. Це підтверджує, що за вище описаними критеріями надана середовищу проживання населення Львова оцінка, як забрудненого і дуже забрудненого (Барановський і Руденко, 1996; Національна доповідь..., 1998), є вірною. Водночас за

генотоксичними властивостями техногенно забруднене довкілля Сокальщини є більше небезпечним для людини, ніж урбогенне довкілля Львова.

Отже робимо висновок, що навколишнє середовище навіть таких, далеко не катастрофічно забруднених в Україні територій, як Сокальський район і місто Львів, чинить достатньо виразний мутагенний тиск на генетичний апарат і статевих і соматичних клітин, *репродукційну функцію людини* за показниками частоти хромосомних аберацій у лімфоцитах крові. Це є дуже небезпечним, проте сьогодні не існує реальної змоги повсюдно вести регіональний генетичний моніторинг за мутаційними ефектами такими складними методами. Тому потрібен пошук ефективних критеріїв визначення впливу забруднення довкілля на ці процеси на підставі неспецифічних корелятивних ефектів від ксенобіотиків, які можна було би запровадити в загальнодержавну систему медико-біологічного моніторингу.

Антропогенне перетворення навколишнього середовища (екологічний слід), яке супроводжується надмірним забрудненням повітря, вод, ґрунтів, а відповідно й місцевих продуктів харчування, за інших нормальних умов проживання, має виразний негативний вплив на вагітну, плід і новонародженого. Тому, на тлі дедалі більшої гетерозиготності сучасних популяцій, за посилення спонтанного й індукованого мутагенезу, необхідним є проведення постійного як глобального, так і регіонального моніторингу за аналізованими явищами.

Стосовно продуктів харчування та продовольчої сировини, аналіз отриманих результатів дослідження вмісту радіонуклідів (Національна..., 2021) свідчить, що перевищення допустимих рівнів є у молоці приватного сектору, м'ясі та м'ясопродуктах, дикоростучих ягодах, грибах та лікарських рослинах Волинської, Житомирської, Рівненської та Київської областей, тобто тих областей які постраждали внаслідок аварії на ЧАЕС і де проводиться посилений радіоекологічний моніторинг.

Демографічна ситуація в Україні останніми роками вкрай ускладнилася (Заставний, 2006), при тому, що людська популяція на Землі стрімко збільшується (рис. 15.4).

Геометрична прогресія темпів приросту населення планети очевидна. Зволікання із покращенням демографічної ситуації в Україні може призвести до незворотного стійкого збіднення генофонду, соматичної та інтелектуальної деградації, і врешті-решт вимирання нації.

Соціально-економічні та екокатаклізми, якими характеризувалися останні десятиліття, призвели до безпрецедентного для мирного періоду життя України падіння відтворення населення (Шкіряк-Нижник, 1996; Москаленко, 2000). Загальна смертність в Україні впродовж останніх 20 років збільшилась на 26,4% (1990 р. 12,1‰; 2000 р. 15,3‰). Народжуваність з 1990 по 2000 рік зменшилась на 37,7% (1990 р. 12,7‰; 2000 р.



7,8‰). Приріст населення в 1990 році становив +0,6 на 1000 населення, а в 2000 році знизився до -7,5 (Сміян, 1997; Сусков, 2000).

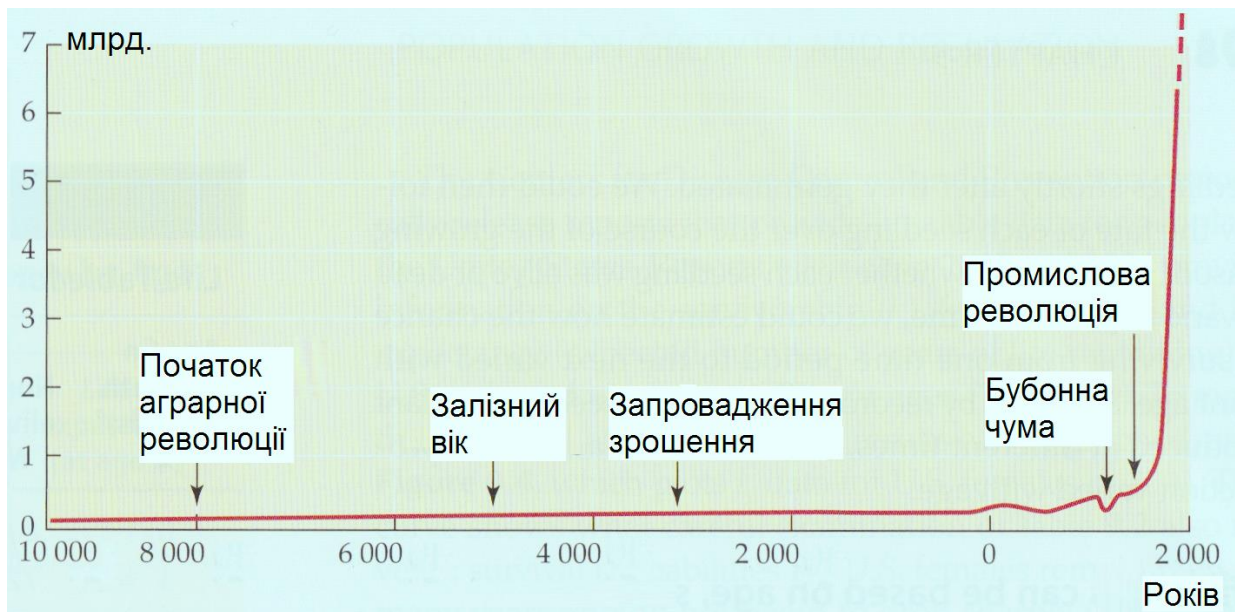


Рис. 15.4. Ріст чисельності людської популяції упродовж Голоцену і на початку Антропоцену (середина XX ст.) (Cain et al. 2008)

Причин такого феномену у відтворенні населення багато це передусім падіння життєвого рівня, соціально-психологічний дискомфорт. Проте важливе значення має і стан репродукційного здоров'я населення, яке залежить і водночас визначає демографічну ситуацію в державі (Olden & Newbold, 2000; Герюкова, 2000).

Народжуваність у Львівській області, як і в Україні загалом, впродовж останніх років поступово знижується, а кількість **природжених вад розвитку** (ПВР) серед новонароджених зростає.

Сокальський, Радехівський та Жидачівський райони за рівнем ПВР мали високі рейтингові місця у повній відповідності із значним рівнем забруднення довкілля. Водночас, найнижчий рівень ПВР спостерігали в Сколівському і Турківському районах із найнижчими антропогенним навантаженням на довкілля (Гаврилюк та ін., 1998; Кігічак, 1999).

Низький індекс **народжуваності** та високий смертності формують погану піраміду структури популяції в Україні (рис. 15.5), яка до 2050 року набуде вигляду розвинутих країн Німеччини, Бельгії, Італії (рис. 15.6), хоча зовсім з інших, ніж у них причин. Бідні (Гватемала, Нігерія й ін.) або ісламізовані арабські країни мають дуже великі показники народжуваності, хоча тривалість життя старшого покоління у них не у всіх велика.

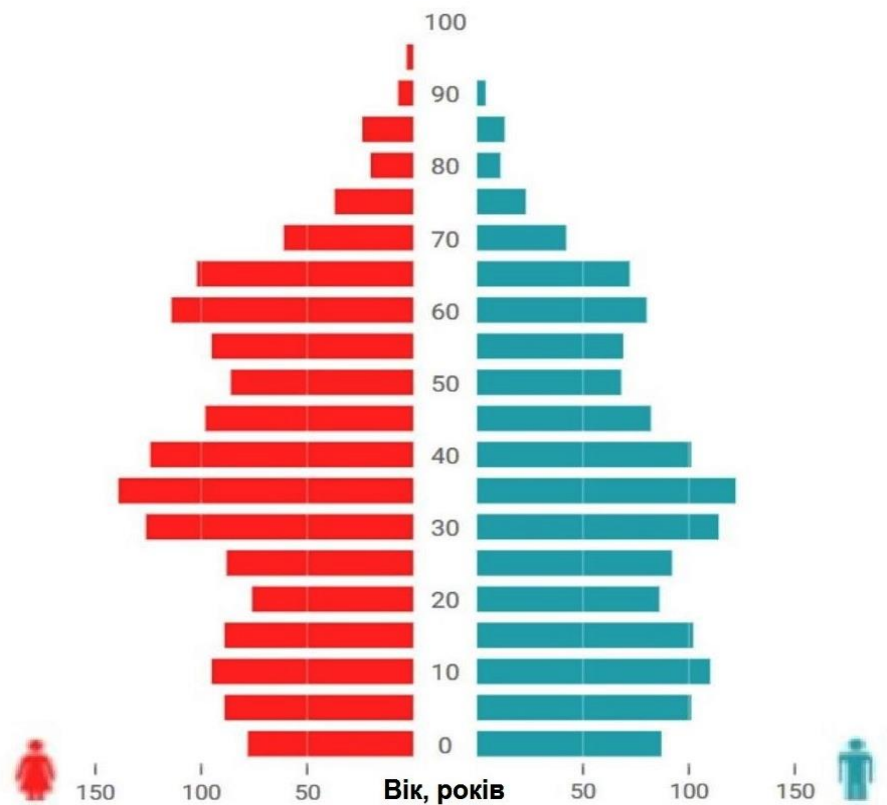


Рис. 15.5. *Статевो-вікова піраміда населення України 2014 року*
(Соціально-демографічна ситуація..., 2022)

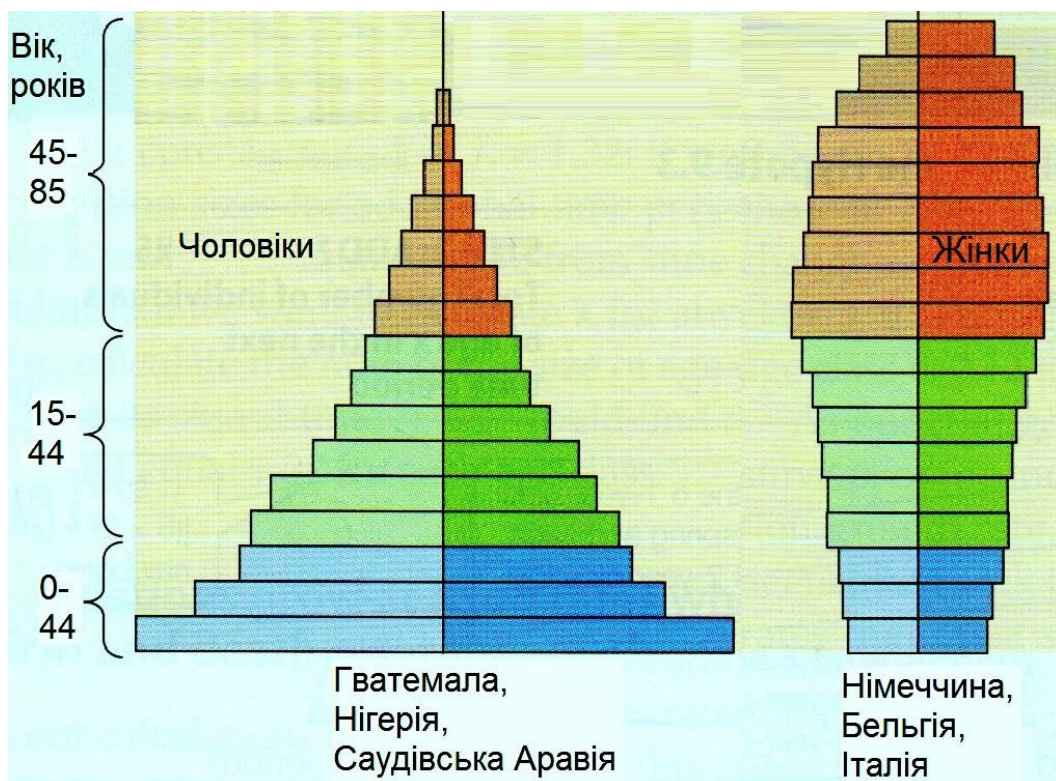


Рис. 15.6. *Статевो-вікова піраміда населення різних за економічним, культурним розвитком і добробутом країн Світу* (Cain et al. 2008).



Розвинуті європейські країни мають більше дорослого і старшого населення, що лягає великим тягарем на соціальні фонди й пенсійне забезпечення.

Найвищі рівні ПВР серед новонароджених упродовж 1993–1998 рр. зафіксовані в містах Шептицький і Львів, у Червоноградському районі, а найнижчий в Самбірському районі.

За даними співробітників Інституту спадкової патології АМН України рівень ПВР серед новонароджених в 1993–1998 рр. і в 1985–1992 роках був таким: у Червоноградському р-ні 348,4–231,4 на 10 тис. новонароджених; у Львові 311,2–157,3; у Самбірському р-ні відповідно 70,5–96,7 (Гаврилюк та ін., 2002).

На тлі теперішньої екоситуації в Україні проблема оцінки рівня генетичної небезпеки середовища для майбутніх поколінь, профілактика індукованого мутагенезу є одними з головних напрямів у формуванні здоров'я населення (Горова, 2000; Тимченко й ін., 2001). Адже Україна зайняла 118 місце в рейтингу за показниками здоров'я і благополуччя нації із середнім індексом 54 із 100 максимально можливих з-поміж 188 країн Світу (Measuring the health-related..., 2016).

15.4. Токсини, ксенобіотики і суспільний резонанс

Промислова революція, що вибухнула від початку XIX ст., супроводжується забрудненнями, яких раніше не було у природі ні за кількісними, ні за якісними ознаками. У нашу добу до старих проблем зростання потужностей промисловості й транспорту додалися нові. З'явилися хімічні неприродні – штучні рукотворні сполуки, елементи й радіоізотопи, до яких ні біотичні системи, ні людська популяція ніяким чином адаптуватися не можуть. Упродовж останніх трьох-чотирьох десятиліть були синтезовані мільйони нових хімічних сполук, а щорічно промисловість виробляє декілька десятків тисяч видів нових речовин – ксенобіотиків. Виникла гостра потреба вивчення їх поводження у довкіллі, необхідність оцінки їх з точки зору небезпеки для живих організмів, популяцій і біоценозів, цілісних екосистем.

Природні токсини як чинник взаємовідношень живих компонентів в екосистемах, є одним із невід'ємних засобів підтримання стійкості, стабільності й гармонії у світі живої природи.

Навмисне чи ненавмисне знищення популяцій рослин або тварин, що використовують отрути для власного виживання, є не припустимим, як і будь-яких інших, що не мають особливого практичного значення для людини. Знижуючи чисельність того або іншого виду, або знищуючи популяцію загалом можна спричинити повне його зникнення. Це завжди

призводить до незворотних змін в біоценозах і, врешті решт, небажаних наслідків для самої людини.

Прикладом є щорічні спалахи чисельності популяцій отруйних павуків каракутів на Півдні і Сході України та їх часті укуси людей. Головним природним ворогом каракурта є інша отруйна комаха – наїзник або опушена помпіла *Pompilius ciliatus*. Дістаючись до коконів, оса проколює їх один за одним своїм тонким яйцекладом і в кожен підкидає приблизно двадцять яєчок. Личинки осі за рахунок поїдання каракутових яєць швидко ростуть і за літо встигають дати 3-4 покоління. Водночас, це – не єдиний ворог каракурта. У Середній Азії поширена оса камбаз, появу якої біля своїх юрт киргизи вважають божою благодаттю, оскільки це означає, що каракурти біля жител людини будуть знищені або істотно знизиться їх кількість.

Проте, необережна людська активність, а саме масштабне застосування на Півдні України агроотрутохімікатів, інтенсивне технохімічне забруднення довкілля, а останніми роками повсюдне випалювання сухої трави на полях і пустищах спричинили вагоме зменшення чисельності популяцій хижих ос – природних "екорегуляторів" поширення небезпечних каракуртів

В реальному природному довкіллі екосистеми, як правило, є під впливом дії більше, ніж одного екотоксиканта. При цьому більшість сполук (діючи в істотних дозах) таким чином змінюють внутрішній стан організмів чи популяцій, що наступні їхні контакти з іншими ксенобіотиками призводять до формування ефектів, котрі якісно та кількісно відрізняються від тих, що спричинені лише одним агентом.

На виробництві, в побуті або в природних умовах на людину, як правило, одночасно діє велика кількість хімічних речовин. У результаті людський організм, популяція стають полем прояву такого явища, як **коергізм**.



Суть **коергізму** в тому, що практично ніколи ефект поєднаної дії екотоксикантів не є простою сумою ефектів, виявлених при ізольованій дії кожного з агентів окремо. Ксенобіотичний профіль довкілля будь-якої екосистеми діє на її живі компоненти комплексно, а взаємопідсилення або взаємопослаблення тих чи інших екотоксикантів завжди дає емерджентний результат.

Явище коергізму істотно утруднює нормування можливих хімічних і фізіологічних дій (визначення ГДК, ЛД тощо), а головне взагалі знижує наукову цінність токсикометричних даних, отриманих стосовно одного токсиканта, для ухвалення експертних рішень. Явище коергізму – одна з основних причин значної невизначеності суджень при оцінці ризику, пов'язаного з дією шкідливих чинників на організм, популяцію, екосистему. В



особливо відповідальних випадках вченим-експертам доводиться спеціально вивчати в експерименті наслідки дії на біосистему певних сумішей, проте обмеженість такого підходу очевидна. Урахування коергізму лежить в основі розроблення засобів етіотропної (застосування антидотів), патогенетичної і симптоматичної терапії отруєнь.

Ознакою нашої доби стало поширення у багатьох країнах світу громадського резонансу навколо сформульованого вченими-лікарями **синдрому "неспецифічної підвищеної хімічної сприйнятливості"** (НПХС) людей. Цей феномен привертає увагу не лише медичної громадськості та "зелених рухів", але й адміністративних і політичних структур різного рівня. Особи, у яких діагностують синдром НПХС, пред'являють цілий спектр скарг на стан здоров'я, пов'язуючи це з високою сприйнятливістю до токсичних речовин, які знаходяться в довкіллі, на виробництві. Іноді у таких людей при обстеженні виявляються ознаки порушень імунного статусу, деякі інші відхилення від норми, нерідко – психічні порушення. Прояви НПХС виникають у хворих, що пред'являють скарги на дії різноманітних речовин в дозах, які не зумовлювали будь-яких ознак токсичного процесу у більшій частини населення.



Синдром "неспецифічної підвищеної хімічної сприйнятливості" (НПХС) описують або як захворювання, зумовлене дією на організм хімічних речовин, або як відчуття хвороби, що виникає у людей, котрі переживають постійний стан страху і занепокоєння з приводу загрози для їхнього здоров'я "забрудненої" води, продуктів, повітря тощо.

Збільшення кількості осіб зі синдромом НПХС, що пред'являють із цього приводу позови різним організаціям і структурам влади, зумовлено, з одного боку – заклопотаністю населення загрозою здоров'ю численних токсикантів, присутніх на робочому місці, в побуті й у довкіллі, а з іншого – відсутністю довіри до офіційної інформації про реальну небезпеку хімічних речовин. Упродовж багатьох років триває дискусія відносно того, чи є НПХС патологією, дійсно зумовленою дією хімікатів, або причина стану криється зовсім в іншому.

Екологічні хвороби, вважають вчені, є наслідком нездатності людського організму адаптуватися до величезної кількості хімічних речовин, що забруднюють довкілля. У тих випадках, коли організм сенсibilізований дією полютантів, на думку екоклініцистів, він реагуватиме розвитком патологічних станів на мінімальні дії різних речовин. Є спроба обґрунтувати ці уявлення з позицій імунології.

Так, на думку вчених, хімічні речовини, взаємодіючи з макромолекулами організму, утворюють гаптен, що провокує вироблення антитіл до токсикантів. Взаємодія токсикантів з антитілами зумовлює утворення імунного комплексу, котрий активує викид біоактивних речовин, провокує запальний процес. З'ясовано, що у хворих НПХС більший, ніж у здорових людей, вміст Т-хелперів, порівняно з Т-супресорами, у зв'язку з чим підвищена активність В-лімфоцитів, які продукують антитіла. Так, у деяких хворих НПХС визначали підвищений титр антитіл до ядер клітин власних тканин.

Згідно з іншою концепцією, яка пояснює виникнення НПХС, стан розвивається внаслідок недостатності антиоксидантних систем організму (аскорбінової кислоти, системи обміну глутатіона, активності супероксиддисмутази, токоферолу тощо). Відповідно до цих уявлень токсиканти активують в організмі утворення вільних радикалів, які, своєю чергою, ушкоджують клітини, ініціюють розвиток мляво плинного запального процесу в різних органах і тканинах. Проте, як у першому, так і в другому випадку, підтвердити ці гіпотези достатніми об'єктивними даними дотепер не вдалося.

Нарешті, НПХС може бути наслідком реакції у відповідь на стрес, пов'язаний з реальною дією у минулому хімічних речовин. Набута в результаті такого "досвіду" реакція страху може з плином часу призводити до соматичної патології. При цьому у потерпілого створюється переконання, що спостережувані відхилення від норми є наслідком дії хімічних речовин.

Сформовані спеціальні напрями практичної і теоретичної токсикології, які розробляють методологію оцінки ризиків. Проте, панівний у суспільстві емоційний настрій із цього приводу, як правило відрізняється від офіційної позиції, і мало залежить від наукових кіл. На думку більшості громадян розвинених країн, ризик захворіти внаслідок дії "забрудненого" середовища неухильно зростає, не дивлячись на те, що реально система охорони довкілля за останні роки у цивілізованих державах значно зміцніла. Це зросло занепокоєння з приводу хімічної небезпеки частково пов'язане з об'єктивною причиною, а саме, з істотним зростанням хімізації усіх сфер виробництва і побуту, проникненням нових синтетичних і вироблюваних у величезних масштабах речовин в усі сфери життя сучасної людини. Частково мають значення і суб'єктивні причини. Поки що панує відсутність елементарної токсикологічної грамотності у населення і навіть у багатьох фахівців медико-біологічного профілю. Не завжди коректно екотоксикологічні проблеми й аспекти хімічної небезпеки висвітлені в засобах масової інформації (Dickens, Suarez-Balcazar, Allen-Meares & Brazil, 2025).



У сучасну добу страх захворіти від дії хімічних речовин чи радіації істотно збільшив кількість звернень до лікарів, скарг і вимог компенсацій за спричинені страждання. Поза сумнівом, емоційний статус людини, спосіб громадського сприйняття проблеми такі ж реальні, як і наукові дослідження. Але дотепер панує переконання, що перші менше обґрунтовані, ніж методи експериментальної оцінки екотоксичної небезпеки того або іншого чинника довкілля людини.



16.1. Еволюція біосфери як живої складової біогеосфери

Еволюція біосфери – біоти Землі, й освоєного нею простору (косного геокомпонента) одночасно тривала і нині продовжується під впливом сонячної активності, космічної радіації, інверсії земного магнітного поля, змін клімату й хімічного складу атмосфери, тектонічних переміщень земної кори, коливань обсягу води в океані, саморозвитку й самоорганізації органічного світу (Будико, 1984).

Виділяють чотири (за В. Вернадським, 1965) виразних *етапи еволюції* біосфери:

- 1) утворення й розквіт гетеротрофної біоти (панування прокаріот);
- 2) виникнення й розвиток автотрофної біоти у водному середовищі;
- 3) сформування цілісної всепланетної біосфери (освоєння біотою суходолу);
- 4) ноосферний (за геоматичного й інтелектуального впливу людини).

На першому етапі (4 млрд років тому) виникла прадавня прокаріотна біосфера архею, яка використовувала для свого існування хімічні, з-поміж іншого і мінеральні джерела енергії, утворені раніше в геосферах планети, зокрема, атмосфері, гідросфері й корі. Сонце побічно сприяло існуванню життя на планеті: головним чином, підтримувало хімічний кругообіг і загальний температурно-кліматичний баланс Землі. Після виникнення і початку масового поширення (2 млрд років тому) автотрофних організмів (ціанобактерій, що фотосинтезують), біота через появу атмосферного кисню суттєво змінилася, оскільки кисень є сильною отрутою для більшості анаеробних організмів, типових для архею. Завдяки діяльності фотосинтетиків уміст кисню в атмосфері поступово зростав, але ще був далекий від сучасного обсягу. Це надало змогу анаеробам перейти до факультативного дихання. Проте, біосфера тоді не могла бути суцільною системою планети, адже захист від біоцидного короткохвильового проміння був

лише під певною товщею вод океану. Суходіл був мертвим, атмосфера спочатку хімічно агресивною (рис. 16.1) і стерильною. Життя біосфери і, відповідно, її фізична еволюція поступово ставали пов'язаними із сонячною активністю в діапазоні електромагнітних хвиль видимої частини спектру.

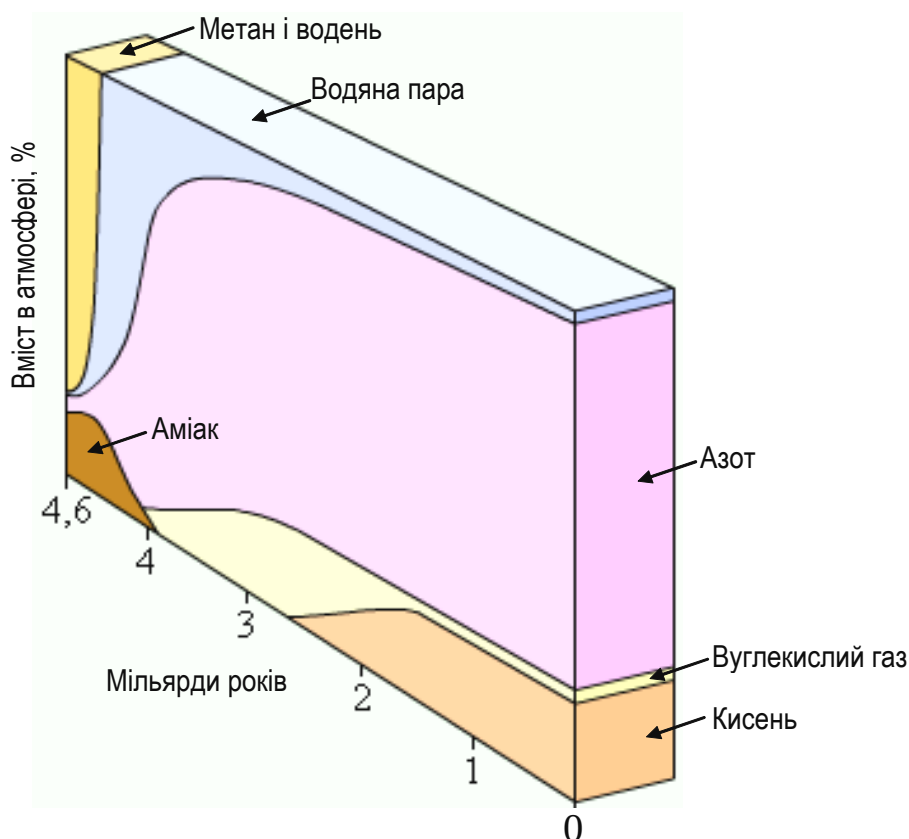


Рис. 16.1. Зміни в газовому складі атмосфери Землі

Другий етап це формування автотрофної біосфери у фізичних межах планетної гідросфери Світового океану. Його початком рахують час 2,7–1,8 млрд років тому, а закінченням коло 400–360 млн років тому. Відбувалося повільне накопичення кисню в атмосфері (рис. 16.2), що сприяло виникненню еукаріот (1,8 млрд років тому), а згодом тварин. Це був період формування океанічної частини біосфери, а з іншого боку час формування сучасної за газовим складом атмосфери. Другий етап ознаменувався суттєвою перебудовою в біосфері початком освоєння суходолу живими організмами. У цей час почався фанерозойський "вибух" біотичного різноманіття на планеті (рис. 16.3).

Третій етап розтікання життя суходолом і формування суцільної всепланетної "плівки життя" цілісної біогеосфери. Його початок 400–360 млн років тому, а завершення із появою **нової геоматичної сили – діяльності людини**.

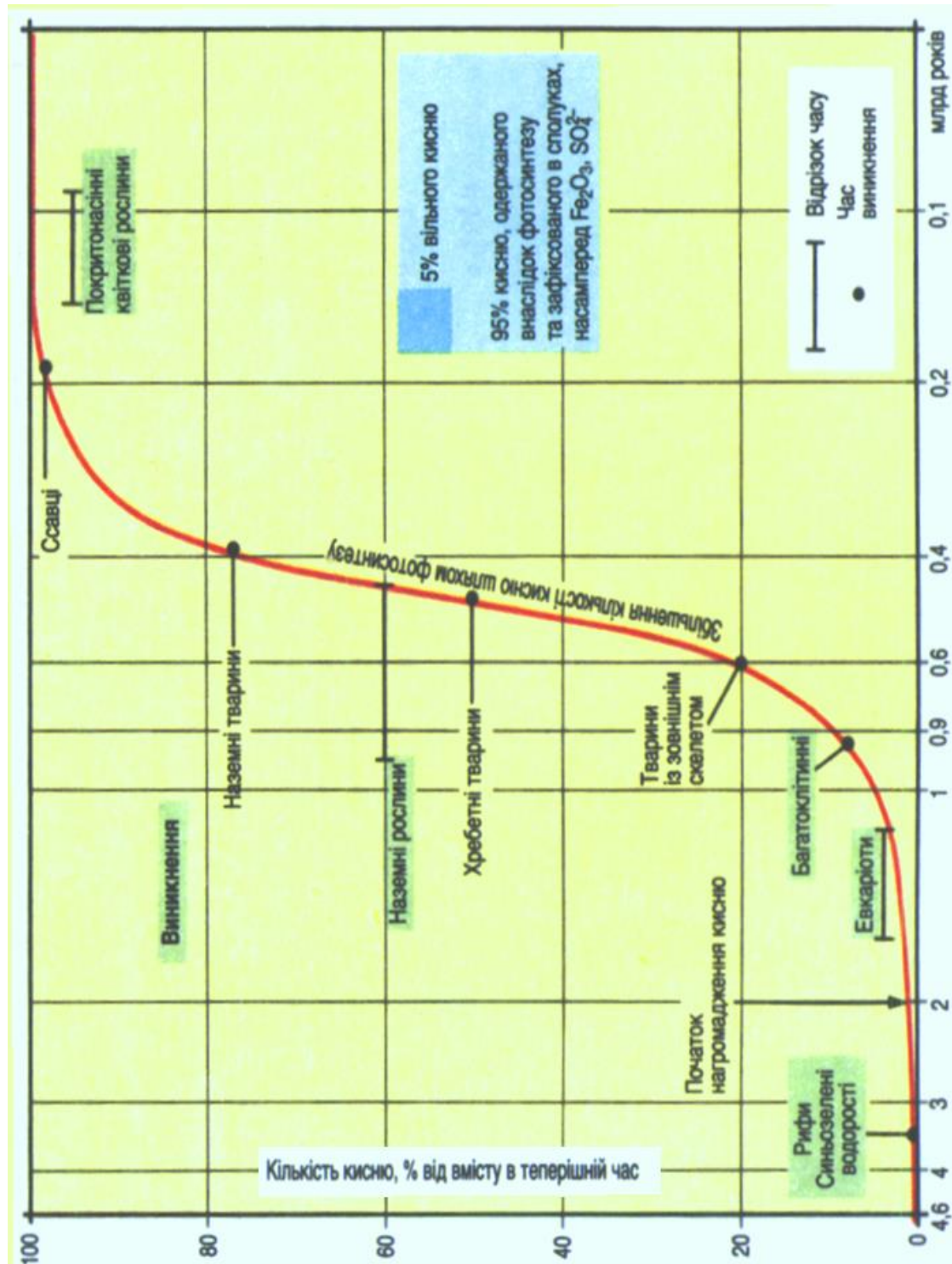


Рис. 16.2. Віхи розвитку біоти Землі та крива нарощування теперішнього обсягу кисню в атмосфері (Гайнріх, Гергт, 2001)

Помітною антропоїзація природного довкілля стала між другим і першим тисячоліттями до Р.Х. з початком залізного віку, рільництва, розпаду первіснообщинного суспільного устрою. Упродовж третього етапу з'являються тварини на суходолі, формується потужний рослинний покрив.

Докорінно змінюється біогеохімічний обмін у біосфері. Опанування біотою суходолу спричинило формування ґрунтового покриву і гумусу. У

певні кліматичні періоди біотична продуктивність сягала таких рівнів, що органіка не розкладалася, а утворювалися великі її поклади.

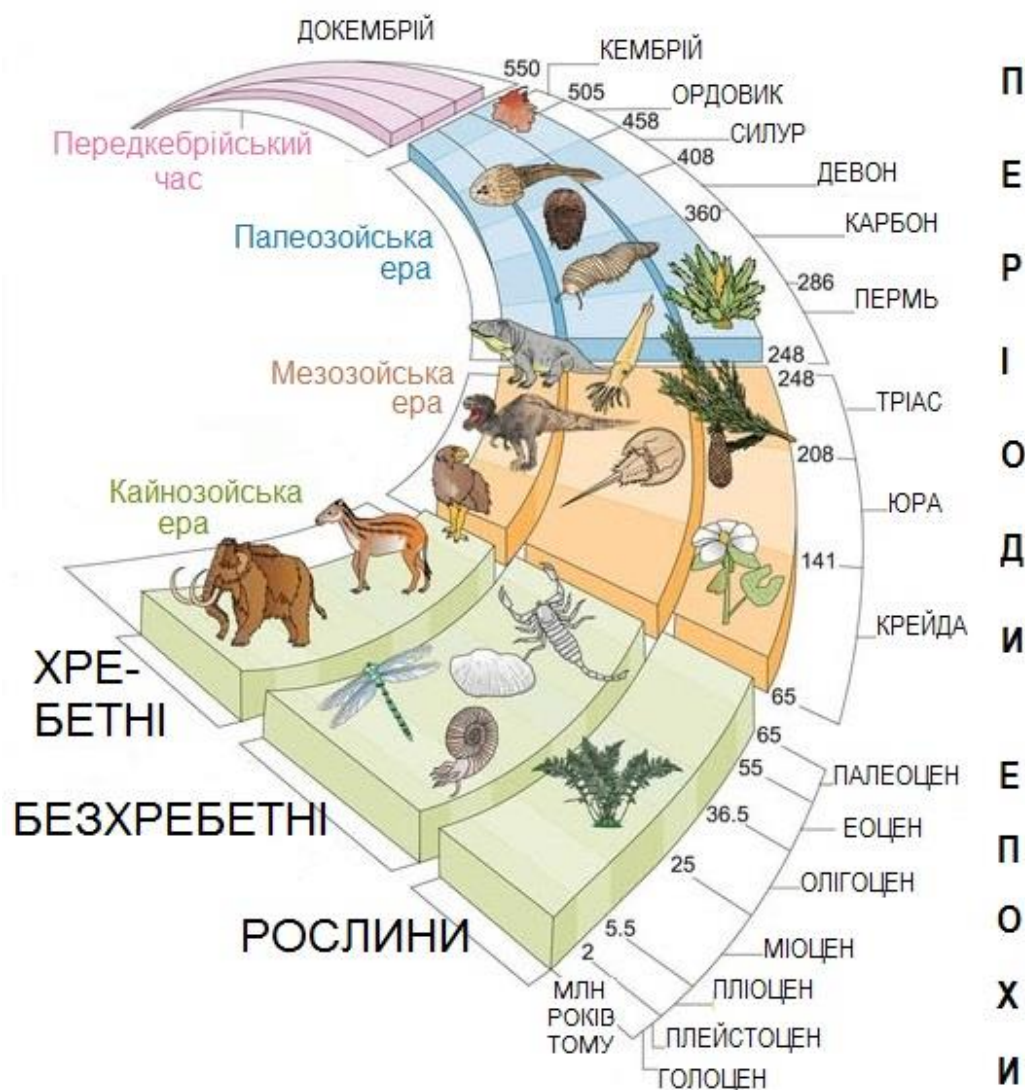


Рис. 16.3. Розвиток біоти Землі в останні 550 млн років упродовж Палеозою, Мезозою і Кайнозою – остаточне формування сучасної біосфери у Плейстоцені

Вони під впливом геоматичних процесів перетворилися у горючі сланці, вугілля, графіт, а в специфічних умовах у алмази.

Упродовж останніх 1–1,5 млн років людина стає геоматичною силою, яка зумовлює нові тенденції у розвитку біогеосфери перехід її до ноосферного етапу.

Четвертий етап ноосферний, розпочався із першим тисячоліттям до Р.Х., коли стає помітним вплив виробничої діяльності людини на структуру біоти, зокрема, рослинності, а також ґрунтового покриву. Біосфера

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...

поступово зазнає все більшого впливу ноосфери. Згодом людина почала змінювати приповерхневий пласт літосфери, втрутилася у життя Світового океану і навіть забруднила екзосферу та ближній космос.

Що ж таке біосфера у теперішньому її стані? І що таке біогеосфера?



Біосфера у її первісному трактуванні (від Ламарка і Зюсса) означала цілісну сукупність усіх живих організмів на Землі (на суходолі, в атмосфері, літосфері й океані).

За сучасним екологічним уявленням, **біогеосфера** (гр. βίος життя, γηα земля, σφαῖρα куля) це частини земної оболонки: літо-, гідро- й атмосфери, які освоєні живими організмами, є під їхніми впливами і впливом продуктів та енергії життєдіяльності біоти (біосфери як підсистеми), у т.ч. людини біотичної.

Спеціальним розділом екології є вчення про глобальну екосистему Землі, яку утворює вся сукупність живої речовини на ній разом із середовищем свого існування (плівкою життя за В. Вернадським), яке мало



первісну назву біосферологія (сьогодні точніше біогеосферологія П.Г. і О.С.)

Біогеосферологія (вчення про біогеосферу) наука, що вивчає виникнення, еволюцію, структуру й механізми функціонування біосфери у середовищі її існування.

В основу біогеосферології лягли біосферні постулати українського вченого В. Вернадського. При розробленні принципів біогеосферології він намагався узгодити концепцію еволюції біосфери з теорією еволюції Ч. Дарвіна.

Як система знань, біогеосферологія вивчає екосистему Землі, як глобальну цілісність (об'єкт вивчення), закономірності структурної організації та функціонування найзагальніших її компонентів (**атмосфери, літосфери** та її верхньої частини **педосфери** і, власне, **біосфери**), їх взаємовідношення, динаміку й еволюцію, а також чинники дестабілізації і основи збереження природного довкілля, безпечного для розвитку всепланетної людської спільноти (предмет вивчення). Відповідно до особливостей глобальної екосистеми завданнями дисципліни біогеосферологія є вивчення:

- ✓ унікальних її рис як неповторної надсистеми;
- ✓ глибокої еволюційної історії та неосяжно тривалого майбутнього;
- ✓ необмежено великих ресурсів генетичної інформації;
- ✓ найдосконаліших саморегуляційних механізмів і функцій;
- ✓ всепланетної захисної функції стосовно її біотичних складових;



- ✓ глобального різноманіття життєвих форм, видів, внутрішньовидових структур та екосистем, і їхніх взаємовідношень;
- ✓ величезних запасів і потоків вільної енергії, у т.ч. накопиченої екосистемами минулих епох;
- ✓ геоматичних і перетворювальних стосовно абіотичних компонентів (атмосфери, вод, літосфери, ґрунтів, антропогенних компонентів) глобальних функцій;
- ✓ реакції на космогенні чинники, у т.ч. на новітні забруднення приземного космосу;
- ✓ взаємовідношень з антропогенними факторами, реакції на геоматичну активність людського соціуму і на саму людину біотичну і соціальну.

Підходи до аналізу структурно-функціональної суті й еволюції біогеосфери, моделювання процесів і явищ у глобальній екосистемі мають бути адекватними обсягові її складності. Тому для цього потрібні сучасні комп'ютерні технології, орбітальні супутникові мережі, інтеграція і синтез нових алгоритмів дослідження. Біогеосферологія використовує методи географії, геології, біології, загальної екології, математичного моделювання й інші наукові засоби у найзагальніших цілях.

Біогеосферологія значно розвинула розуміння еволюційного процесу в природі (табл. 16.1). Еволюцію видів, еволюцію живої речовини і еволюцію біосфери В. Вернадський розглядав як взаємопов'язані процеси. При цьому він виходив з принципу вічності, безначальності основних планетних явищ у межах геологічного часу. Не називаючи її так, український учений підходив до вивчення глобальної екосистеми саме з такого бачення, але термін біогеосфера тепер присутній лише у закордонних наукових школах.

Важливо зауважити, що перших три етапи саморозвитку біогеосфери пройшла тільки завдяки виникненню й еволюції біоти. Найвагомішими системотвірними чинниками були час, простір, мертва речовина тіла Землі, космічні субстанції та поля, а також енергія у формі внутрішнього тепла планети, хімічних зв'язків і сонячна радіація. Всі ці чинники діють за жорсткими фізико-хімічними законами самодостатньої природи. На другому етапі розвитку біосфера втратила повну залежність від внутрішньої енергії Землі і трансформувалася в акцептора ("споживача") променевої енергії Сонця завдяки опануванню планети автотрофними організмами.

Теперішня осадова оболонка Землі це стратиграфічно нашаровані один на одного пласти, як сліди екологічної "роботи" минулих біосфер планети. Всі разом вони становлять *метабіосферу* Землі. Подекуди це кількакілометрова товща літосфери, вигляд якої значною мірою визначений діяльністю чотирьох тонких плівок життя: планктонної, донної, наземної та ґрунтової.



Табл. 16.1. Хронологія еволюційних змін на Землі

№	Віхи еволюції	Приблизно років тому
1	Початок утворення нашої галактики Всесвіту (великий вибух)	20 000 000 000
2	Формування земної кулі	4 700 000 000
3	Виникнення перших форм життя	3 800 000 000
4	Утворення багатоклітинних організмів	1 000 000 000
5	Поява хребетних	500 000 000
6	Вихід рослин на суходіл	400 000 000
7	Виникнення ссавців	200 000 000
8	Поява приматів	70 000 000
9	Поява гоміноїдів	15 000 000
10	Поява гомінідів	3 000 000
11	Поява виду <i>Homo sapiens</i>	200 000
12	Формування соціумів у помірних широтах (кінець палеоліту початок неоліту)	10 000

Головними системотвірним ознаками земної атмосфери у нашу епоху стали кількісні параметри наявності в ній кисню й вуглекислого газу, а вагомими кількість озону, метану й інших газів і домішок.

Отже, еволюція біосфери відбувалася за внутрішніми законами її саморозвитку, проте несподівані (випадкові, стихійні) зміни зовнішнього середовища, очевидно, стимулювали стрибкоподібні переходи органічного світу з одного рівня системної організації в інший, вірогідно досконаліший, прогресивніший. Тому, потрібно визнати, що біосфера "не боїться" катастроф. Через тимчасові руйнації її підсистем, перехідний хаос, на "уламках" зруйнованих компонентів вона формує нові особливості своєї структурно-функціональної організації.

16.2. Наслідки антропогенезу для біогеосфери

Від 1992 року антропогенний чинник у функціонуванні біогеосфери називають **екослідом** (Rees, 1992). Оскільки за В. Вернадським людський соціум став новою геоматичною силою на Землі, вчені розробили підхід до оцінювання діяльності людини, як чинника аналога екологічного сліду "роботи" води на планеті (Hoekstra, 2009).

Оцінюючи глибину геоматичних антропогенних змін на Землі, нобелівський лауреат Поль Крутцен 1999 року висловив думку про початок нового

після Голоцену геологічного періоду, який назвав *Антропоценом*. Першим стратиграфічним підтвердженням його початку вчені визнали геоматичний прошарок антропогенних радіоактивних ізотопів в осадових породах і в льодовиках Гренландії, які датують серединою XX ст. початком ядерної ери планети (рис. 16.4). Іншими антропогенними відкладами вважають інертний пластик, сажу від промислових ТЕЦ, розсіяні рідкоземельні елементи.

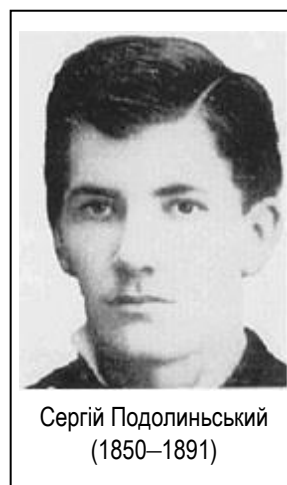
Головні ознаки і складові сучасної біосферної кризи: забруднення природного довкілля (атмосфери, суходолу й Світового океану); зміни клімату і загальне потепління на планеті; деградація ґрунтів; активізація планетарних геоматичних сил; зникнення видів і зменшення біотичного різноманіття; *ресурсна криза*.

Суть глобальної екозагрози в тому, що людство майже повністю вивело себе із системи біосферного саморегулювання, досягнутого природою. Воно безперервно наращує обсяги речовин, які не в стані утилізувати природна екосистема біогеосфера. Їх уже понад 4000 видів. Людство розвиває небезпечні технології, зберігає і перевозить маси хімікатів і вибухових речовин, забруднює атмосферу, гідросферу та ґрунти, наращує енергоємність виробництва, спричинює парниковий ефект тощо.

Ще у XIX ст. своїм дослідженням "Праця людини і її відношення до розподілу енергії" український економіст С. Подолинський (2000) довів, що загальна кількість енергії, накопичена на земній поверхні та є в розпорядженні людства, поступово збільшується і збільшення це відбувається під впливом праці людини й використовуваних нею домашніх тварин.

Сьогодні більшість технологічних новацій, пов'язаних з освоєнням природних ресурсів, спрямована на посилення експлуатації природи. Це призводить до швидкого вичерпання її ресурсів і можливостей. Лише в енергетиці вугілля, нафта і природний газ становлять приблизно 88% світового енергетичного бюджету. Кам'яне вугілля є "брудним" паливом, оскільки видобуток і спалювання його спричинюють істотне регіональне забруднення, в якому радіаційна компонента є найнебезпечнішою. Газові "факели", автотранспорт, авіація і пуски ракет забруднюють і отруюють атмосферу, а магістральні трубопроводи є осередками аварій. Найактуальнішими є питання катастрофічних наслідків глобального потепління. Його пов'язують зі спостережуваним зростанням умісту в атмосфері "парникових газів" (діоксид вуглецю, метан та ін. рис. 16.5).

Проте багато дослідників (Berner & Kothavala, 2001; Scotese et al, 2021), які співставляють реконструйовані графічні моделі геоматичного ходу концентрації діоксиду карбону та температури поверхні планети упродовж



Сергій Подолинський
(1850–1891)

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...

пів мільйона років, не знаходять будь-якої кореляції між цими явищами (рис. 16.6).

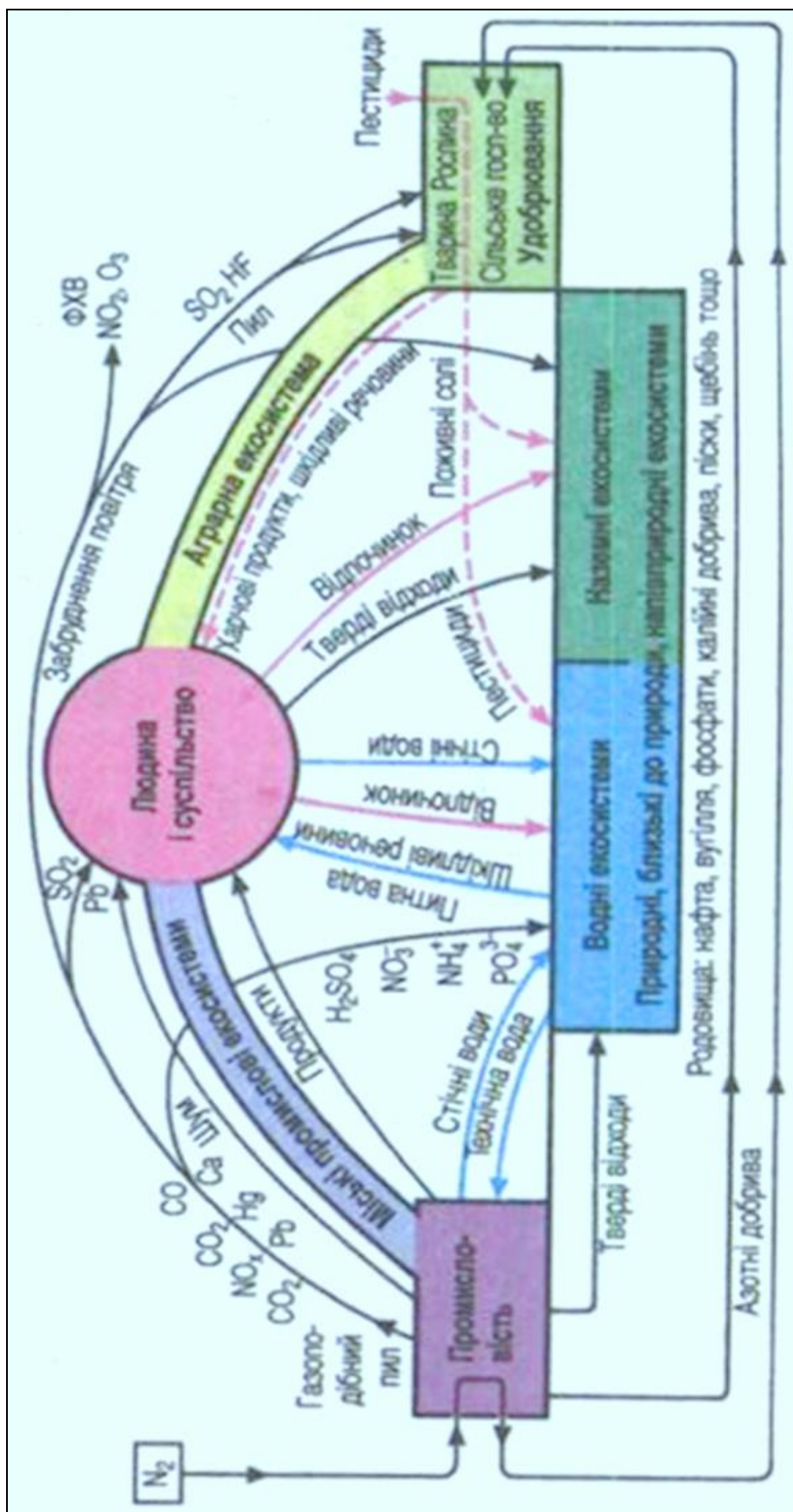


Рис. 16.4. Чинники сучасного внутрішнього середовища біогеосфери (Гайнріх, Гергт, 2001)

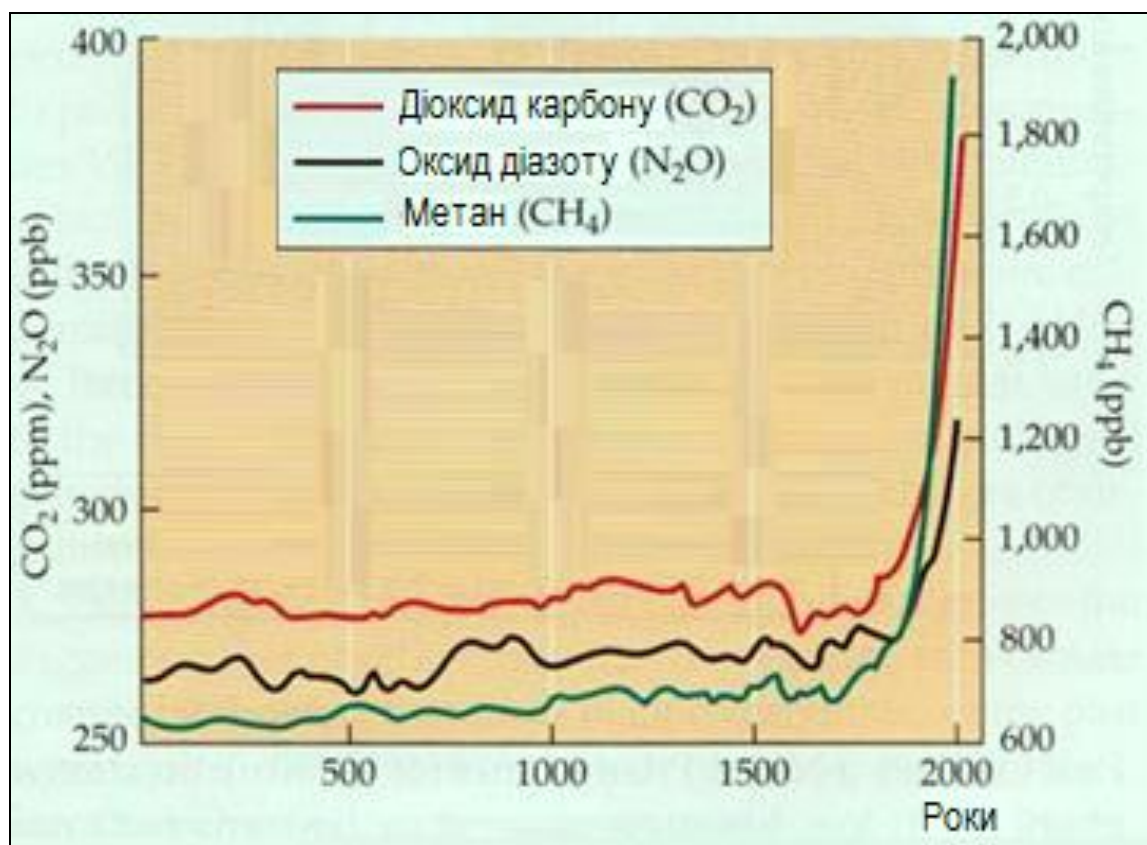


Рис. 16.5. Динаміка концентрації парникових газів в атмосфері від початку нової ери до 2000 р.

Значну частку споживаної енергії дають атомні станції. Водночас, промислові відходи цих станцій, аварії на них представлятимуть небезпеку ще багато сотень років. Основні біофільні елементи (вуглець, азот, кисень, фосфор, сірка й ін.) накопичуються в тканинах живих організмів.

Дисбаланси біогеохімічних процесів можуть привести до деяких перехідних станів замкнутих елементарних циклів, погано регульованих у реальних масштабах часу. Наприклад, до тепер піддані сильній деградації або повністю зруйновані приблизно 30–40% ґрунтових ресурсів світу. Щорічні втрати ґрунтів унаслідок забудови, активізації ерозії, трансграничного забруднення й інших небажаних явищ, наближаються до 10 млн га.

Аналогічно несприятливою є ситуація із експлуатацією лісових ресурсів. Якщо врахувати, що ліси світу є легенями планети, то варварське винищення тропічних (Бразилія, Індія, Індонезія й ін.) і бореальних лісів (а Росії належить приблизно 60% світових площ бореальних лісів) стає реальною дестабілізаційною загрозою на планеті.

Як узагальнюють N. A. Eckardt, E. A. Ainsworth, R. N. Bahuguna et al. (2023), зміна клімату є визначальним викликом 21 століття. Останнє десятиліття є критичним часом для вжиття заходів щодо пом'якшення найгірших наслідків для населення та екосистем.

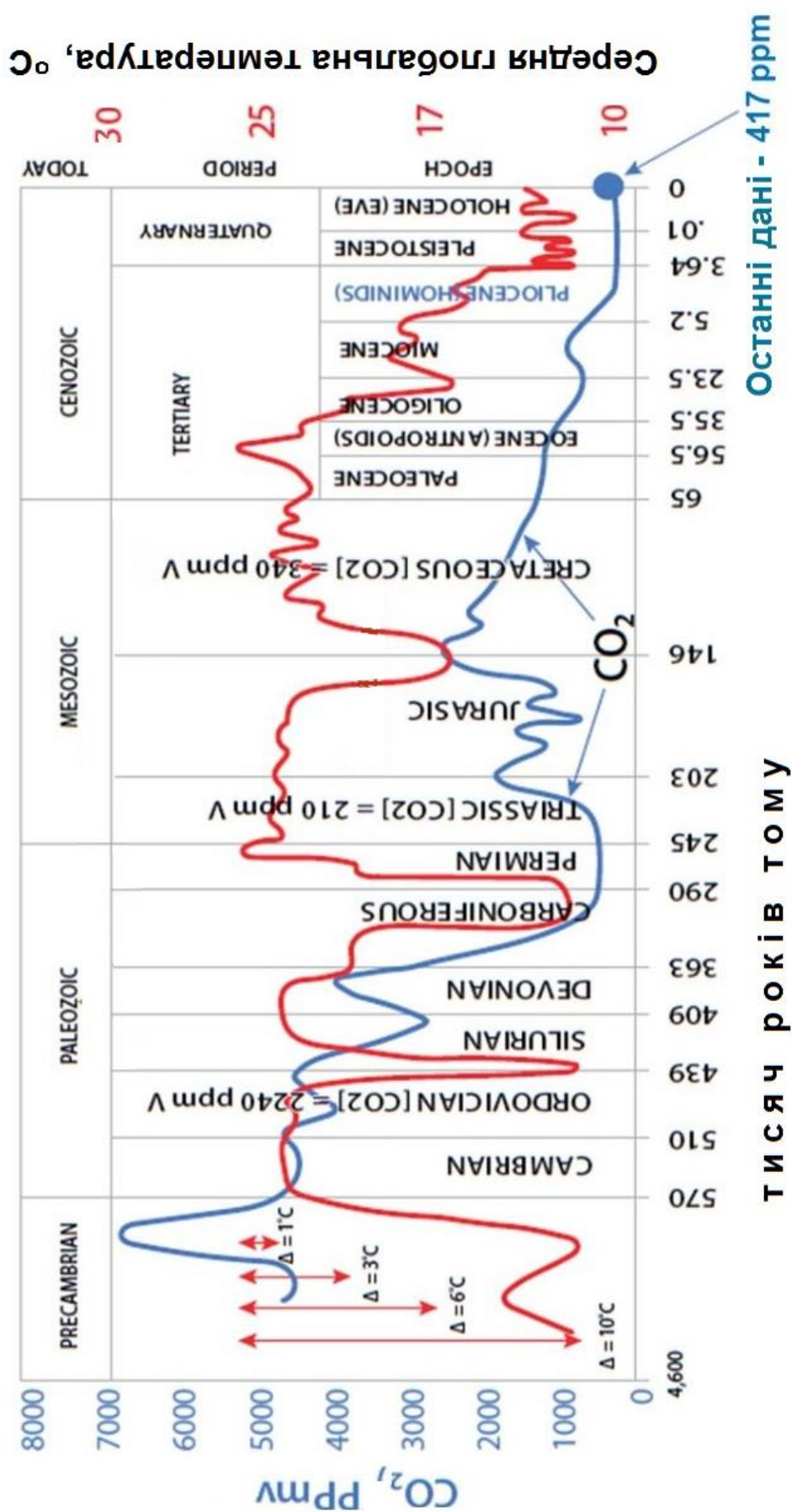


Рис. 16.6. Реконструкція концентрації атмосферного діоксиду карбону (за Berner, 2001) та глобальної середньої температури поверхні на Землі (Scotese, 1999) упродовж 570 тис років геологічної історії

Рослинництво може відігравати важливу роль у разі підвищення стійкості до складних умов (наприклад, спека, посуха, сольовий стрес, поєднані, спалахи хвороб). Створення ефективних посівів, що вловлюють і поглинають вуглець, актуальне.

Узагальнення численних спостережень за температурою поверхні суходолу й океану вказують на тренд потепління на планеті на 0,85°C упродовж 1880-2012 років (рис. 16.7).

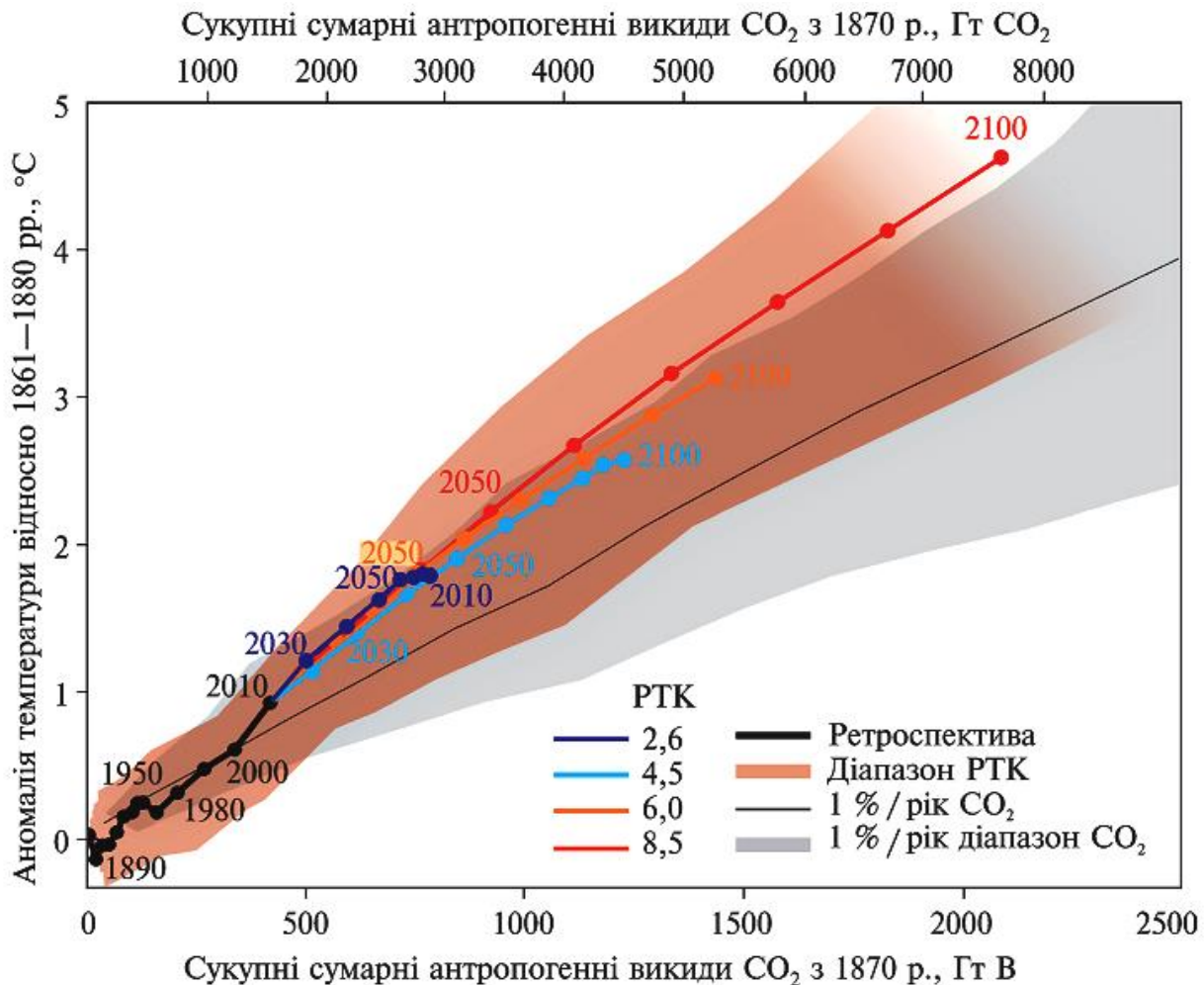


Рис. 16.7. Зв'язок динаміки аномалій температури атмосфери й сумарних викидів вуглекислого газу на Землі за період 1890–2012 рр. (за Ляльком, 2015)

Регіональні коливання з урахуванням помилки спостережень коливаються в межах від 0,6 до 1,06°C. За збереження тенденції до 2050 лінія регресії встановленої закономірності вказує на ймовірний рівень підвищення температури на 1,5-1,8°C.

Внаслідок зумовлених глобальними процесами тенденцій упродовж останніх кількох десятиліть у Західному Лісостепу сталися регіональні змін мезоклімату із закріпленням тенденцій до подальшого зростання

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...

теплових (рис. 16.8) та вологісних ресурсів. Теплозабезпеченість (рис. 16.9) ландшафтних агроєкосистем істотно покращилася, що пояснює закріплення в структурі посівних площ аграрних підприємств таких теплолюбних культур, як зернова кукурудза, соя і соняшник.

Річні обсяги опадів в останні 25 років підтримували тренд до підвищення, але кількість аномально вологих та аномально сухих років зростає. Потребує вивчення питання вологозабезпеченості польових культур, оскільки раптові зливові дощі, як і тривале бездощів'я не сприяють стабільному накопиченню продуктивної вологи в ґрунті через латеральні стоки та підвищений темп випаровування в умовах зростання позитивних температур і регіоні.

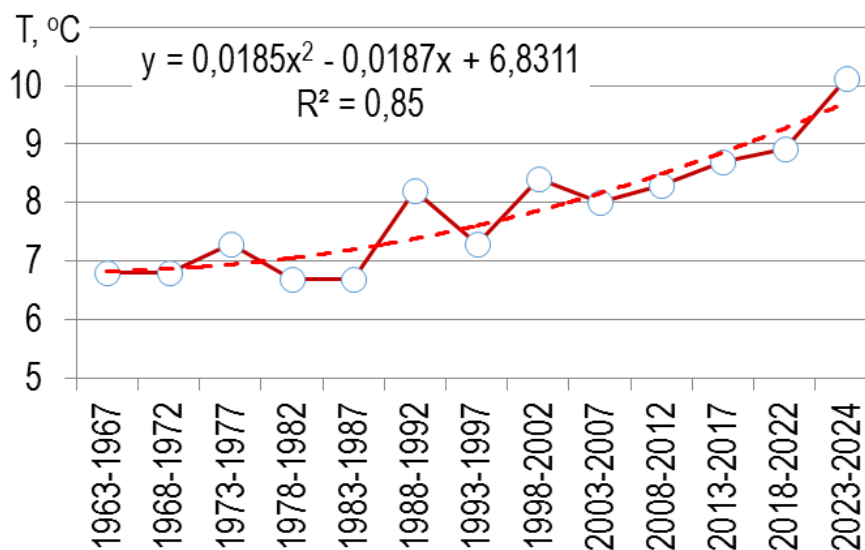
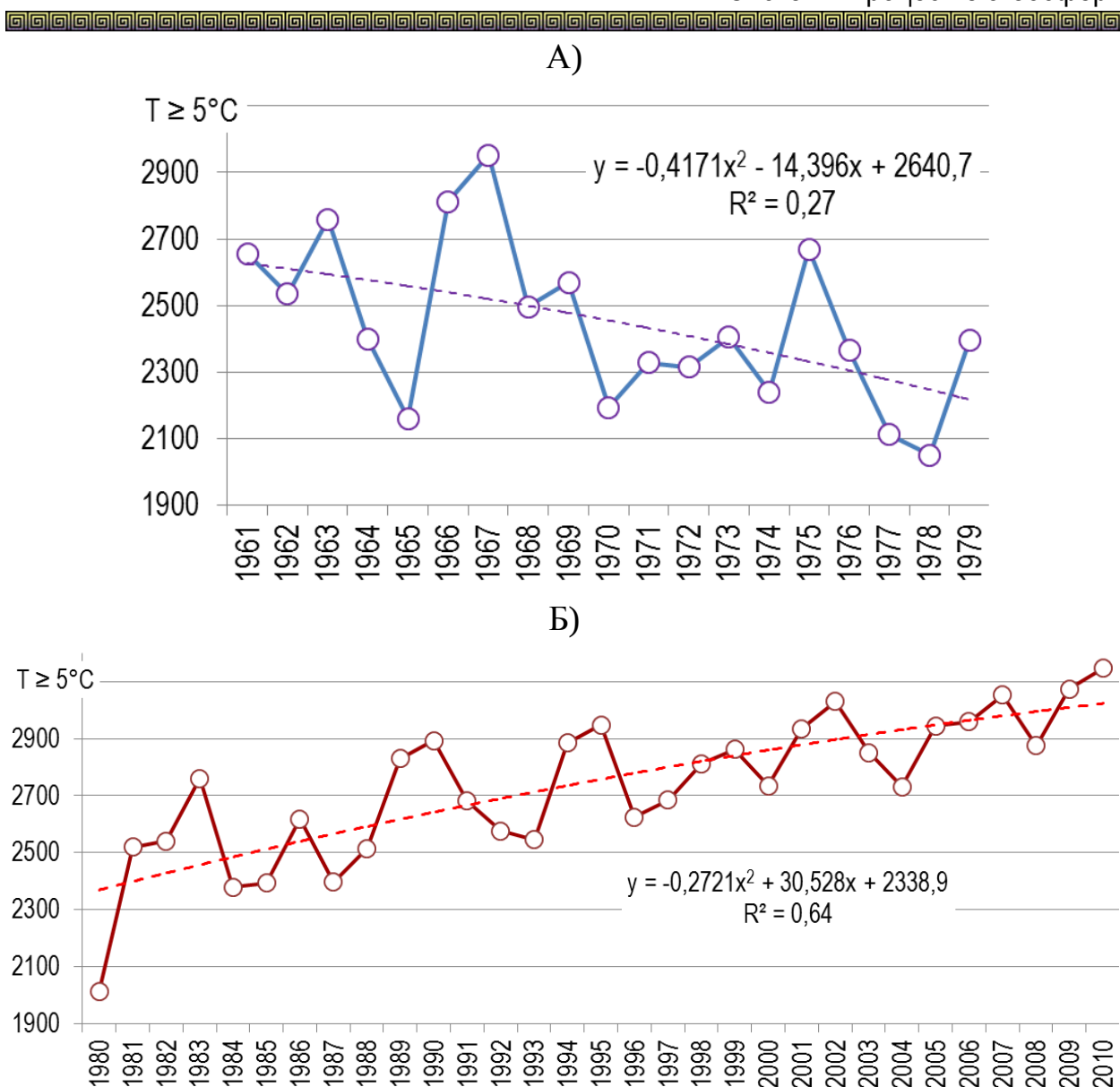


Рис. 16.8. Регресійна модель динаміки середньої річної температури повітря за період 1963–2024 рр. за даними метеостанції м. Рівне, °C

Квітень і травень все частіше бувають теплішими та посушливими, серпень стає спекотнішим, ніж липень, а перші заморозки з'являються значно пізніше звичних.

Недавно виявлене "потовстішання" й ущільнення атмосфери супроводжується щоразу частішими аномальними **погодними катаклізмами**, які в різних куточках планети мають різні назви але однаково страшну руйнівну силу. Наприклад, вперше на Волині влітку 2006 року підчас сильної спустошливої бурі зафіксоване, раніше не спостережуване у цій місцевості, метеорологічне явище вим'яподібні хмари (рис. 16.10). Проте, 2021 року таке явище було зафіксоване вже у Варшаві та у Львові, але без катаклізмів.

Вим'яподібні хмари (*Lenticular mammatus*) – один з різновидів купчасто-дощових хмар, виникають через сильну турбулентність всередині хмар. У дощових і грозових хмарах існують як сильні висхідні, так і низхідні вітри.



**Рис. 16.9. Суми активних температур в Дублянах
(Львівський національний аграрний університет) за період спадання
1961-1979 рр. (А) та за період підйому 1980-2010 рр. (Б), $T \geq 5^{\circ}\text{C}$**

Як тільки злива і гроза починаються, опади випадають з вищого шару повітря в нижчий сухий і значно охолоджують його. Холодніше повітря важче й опускається вниз. У процесі утворюються горбоподібні хмарні кишені. Такі хмари трапляються порівняно рідко і здебільшого у тропічних широтах, що пов'язане з утворенням циклонів. Зазвичай такі атмосферні процеси віщують бурю і супроводжуються кульовими блискавками.

У живої природи також вагомі втрати. Щодня на планеті зникає приблизно один вид організмів. Тепер відомо 4000 кандидатів на внесення їх у список видів, що зникають.



Рис. 16.10. Рідкісні для України вим'яподібні хмари на небосхилі над Волинню 2012 та над Львовм і Варшавою 2021 років (фото авт.)

Глобальний **екологічний слід** це вже приблизно 60% природних територій усіх біомів, які перетворено в напівштучні й штучні екосистеми, внаслідок чого популяції диких видів зазнають неприродного впливу. Зникнення загрожує 25 тис. видів вищих рослин. За збереження такої тенденції є загроза вимирання 75% видів в найближчі кілька століть і це є ще одним узагальненим доказом нового геологічного періоду Антропоцену. Також втручання в біотичний цикл азоту і фосфору в ґрунтах з використанням добрив вважають найбільшим впливом упродовж 2,5 млрд років.

Із розвитком комп'ютерної техніки й інформаційних технологій людство вступило у фазу інформаційного суспільства, яка відрізняється стрімкими темпами розвитку. Включення інформаційних технологій триває в усі сфери нашої діяльності. Інформаційна революція проникла в сферу ринкових відносин, у сферу боротьби за владу (піар-технології і зомбування електорату в передвиборних кампаніях), у сферу навчання й виховання. Інформація стала не лише коштовним товаром, але й засобом дії на суспільну свідомість сприйняття світу.

Українською є тенденція, за якої провідними стають корпоративні інтереси, спрямовані на задоволення необмежених псевдосоціальних потреб вузьких груп осіб, очільників фірм і корпорацій. Державами керують не парламенти, уряди або президенти, а корпорації, інколи політичні чи мафіозні клани. Вектори цілей таких соціально-економічних груп часто не співпадають з інтересами суспільних громад, держав, а тим паче із моральними імперативами. Триває певна хаотизація системи керування соціумом. Тому іде загострення й ескалація негативних тенденцій у співіснуванні суспільства і природи й усередині суспільства.

Підсумовуючи, окреслимо **основні причини глобальної екокризи**.

Соціальний розвиток людини урізноманітнив мету її існування (задоволення соціальних, а не лише біологічних потреб). Тому порушилася повна узгодженість трьох наріжних параметрів еволюції біосфери: необмежене нарощування числа функцій техногенним шляхом, неадекватність



системи колективного мислення й керування, відмова глобальної системи екологічного самоконтролю.

У результаті науково-технічного прогресу й росту щільності населення на планеті спостерігаємо повне розбалансування темпів розвитку біогеосфери й людського соціуму. Найвиразніше криза проявилася, починаючи з періоду промислової революції понад 250 років тому. За комплексом ознак можна стверджувати, що людство вступило у фазу еволюційної кризи з усіма можливими катастрофічними наслідками, оскільки дотепер не володіє дієвими глобальними системними важелями керування процесами.

16.3. Еволюція біоти, системне моделювання біогеосфери та його висновки

Еволюція біогеосфери та адаптація біосфери до геоматичних катаклізмів важлива для розуміння тенденцій та очікувань людської цивілізації. Спалахи видоутворення та катастрофічні вимирання, в тому числі на рівні родин, чергувалися упродовж геологічної історії Землі. Чітко зазначимо, що ми маємо на увазі під "масовим вимиранням" (Ritchie, 2022). Існує природний фоновий темп для часу та частоти вимирань: 10% видів зникають кожні мільйон років, 30% кожні 10 мільйонів років і 65% кожні 100 мільйонів років. Еволюція біосфери відбувається через баланс між "вимиранням – кінцем видів – та видоутворенням – створенням нових видів".

Можна визначити періоди геологічної історії, коли вимирання відбувалися швидше, ніж за фонові швидкості. Це говорить про те, що існували додаткові екофактори і надмірних тиск обставин, який спричиняв більше вимирань, ніж за норми. Масові вимирання – це періоди зі значно вищими темпами вимирання, ніж зазвичай. Вони визначаються як величиною, так і швидкістю, що дозволяють кваліфікувати вимирання.

Під час масового вимирання щонайменше 75% видів вимирають менше, як за два мільйони років. В історії Землі відбулося п'ять масових вимирань, принаймні від 500 мільйонів років тому.

На діаграмі (рис. 16.11) відображені часові рамки подій в геологічній історії Землі. Фоновий темп вимирання є низькими і становить менше 5 родин на мільйон років, але такий темп є перманентним.

Ми бачимо сплески темпів вимирання, позначені як п'ять подій:

- 1) Кінець ордовика (444 млн років тому);
- 2) Пізній девон (360 млн років тому);
- 3) Кінець пермського періоду (250 млн років тому);
- 4) Кінець тріасу (200 млн років тому);

5) Кінець крейдового періоду (65 млн років тому) – вимирання динозаврів.

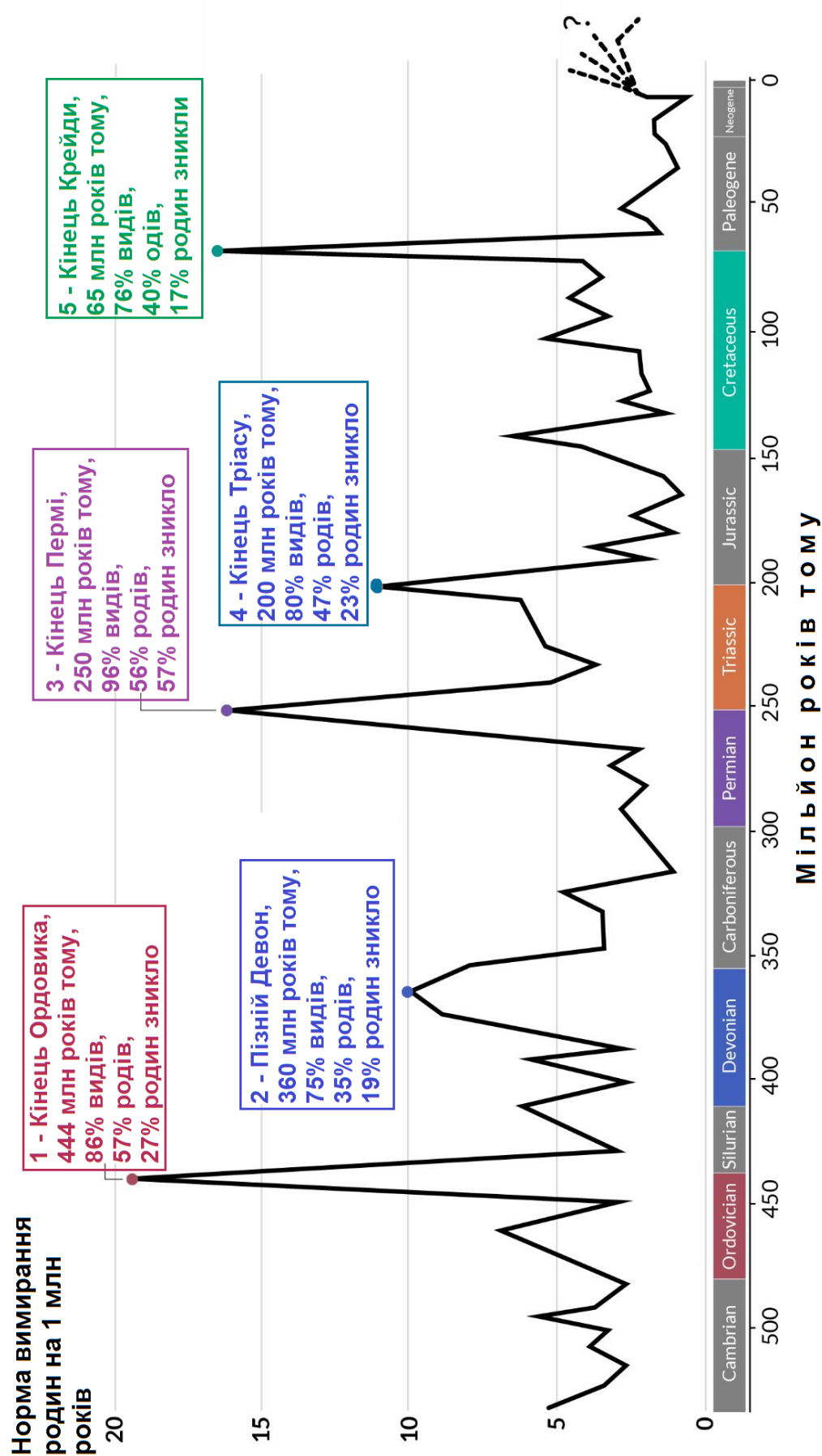


Рис. 16.11. П'ять катастрофічних періодів втрати біорізноманіття на Землі упродовж 500 млн років (Barrosky et al., 2011; McCallum, 2015)



Цілком логічне питання наприкінці цієї часової шкали – що станеться в майбутньому (Barnosky et al., 2011; McCallum, 2015). Можливо, біосфера прямує до шостого масового вимирання. Але наразі ще далеко до шостої точки.

Що спричинило п'ять масових вимирань?

Усі ці події "великої п'ятірки" були спричинені певним поєднанням вагомих і стрімких змін клімату, поєднаних зі значною корекцією властивостей середовищ від зміни вмісту компонентів на суходолі, в атмосфері чи в океані. Це і підкислення океану, кислотні дощі внаслідок інтенсивної вулканічної діяльності.

У таблиці 16.2 детально описано запропоновані причини кожної з п'яти подій вимирання.

Табл. 16.2. Причини п'яти подій вимирання в геологічній історії Землі

Подія вимирання	Вік (млн років)	Відсоток втрачених видів	Причина вимирання
Кінець ордовика	444	86%	Інтенсивні льодовикові та міжльодовикові періоди спричинили значні коливання рівня моря та різко змінили берегові лінії. Тектонічне підняття Аппалачських гір призвело до значних змін у кліматі та хімічному складі океану.
Пізній девон	360	75%	Швидкий ріст та диверсифікація суходольних рослин призвели до швидкого та сильного глобального похолодання.
Кінець пермського періоду	250	96%	Мала місце інтенсивна вулканічна активність у Сибіру. Це спричинило глобальне потепління. Підвищений рівень CO ₂ та сірки (H ₂ S) від вулканів спричинив підкислення океану, встановилися постійні кислотні дощі та відбулися зміни в хімічному складі води Світового океану й суходолу.
Кінець тріасу	200	80%	Підводна вулканічна активність у Центральноатлантичній магматичній провінції спричинила глобальне потепління та стрімку зміну хімічного складу води Світового океану.
Кінець крейди	65	76%	Падіння астероїда на Юкатані (Мексика). Це спричинило стрімкі глобальні катаклізми та швидке охолодження атмосфери. Деякі зміни, можливо, відбулися ще до падіння цього астероїда, з інтенсивною вулканічною активністю і тектонічними підняттями.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...

У найближчому майбутньому людство зіткнеться з багатьма глобальними та локальними викликами (McCallum, 2015; Benn, 2010). Зокрема можливі масові втрати біорізноманіття. У Червоному списку МСОП/SSC 2012 року повідомлялося про оцінку ~56% усіх хребетних. Це включало 97% земноводних, ссавців, птахів, хрящових риб та аксис. Список також містив оцінку ~50% міног, ~38% рептилій та ~29% кісткових риб. Поверхневий огляд масштабів вимирання не одразу показує серйозність поточних втрат біорізноманіття, оскільки вимирання, які спостерігають сьогодні, відбулися за такий короткий час порівняно з попередніми подіями у геологічній історії Землі.

Існують різні проекти збереження біосфери і природного середовища землі у незмінному вигляді. Експерименти із системного моделювання екосередовища й закритих екосистем відомі з часів створення клімакамер, фітотронів (для вивчення екології рослин), із початку запусків космічних пілотованих апаратів і створення орбітальних станцій.

Зокрема, Ю. Одум (1968) уперше описує функціонування штучної, тимчасово самодостатньої екосистеми на прикладі космічного корабля.

За ініціативою науковців Колумбійського університету (штат Нью-Йорк) і за проектом П. Солері компанією "Space Biosphere Ventures" в Арізоні (США) була збудована перша велика, ізольована від чинників середовиществорення Землі, система під назвою "**Біосфера-2**" (рис. 16.12).



Рис. 16.12. Комплекс основної і допоміжних споруд наукового експерименту "Біосфера-2" (<http://www.biospherics.org/experimentchrono1.html>.)

Це величезна споруда, яка була призначена змодельовати замкнену самодостатню екосистему. Доступними були лише зовнішнє тепло, сонячне проміння й силові поля планети. Головним завданням експерименту було з'ясувати, чи зможе людина скільки завгодно часу жити й працювати в штучно створеному нею середовищі. Експеримент був проведений із 26 вересня 1991 року до 26 вересня 1993 року і продовжений у 1994 році.



Біонавти "Біосфери-2"

Об'єм штучної біосфери становив 204 тис. м³, площа 1,5 га, висота найвищих споруд 26 м. Вона була практично повністю герметична. Через скляний дах проникало лише сонячне про-

міння. Внутрішня система була спланована і реалізована так, щоб десятиріччями забезпечувати вісім біонавтів повітрям, водою, їжею, повністю переробляти всі можливі відходи. "Біосфера-2" була забезпечена комп'ютерним зв'язком із зовнішнім світом та електроенергією.

Четверо жінок і четверо чоловіків отримали спеціальну підготовку (вони були біологами, медиками, психологами, інженерами). Вони мали упродовж перших двох років ізолювано від світу жити, інтенсивно працювати, виконувати наукові спостереження, використовуючи біотичні ресурси, які самі вирощуватимуть у межах "Біосфери-2".

Головне завдання було зібрати унікальні дані про функціонування п'яти субекосистем із метою їх подальшого використання для створення колоній на інших планетах (спершу на Марсі).

Усередині "Біосфери-2" було розміщено 7 блоків і 5 ландшафтних екосистем: тропічний ліс, пустеля, саванна, болото, невеличке "море" глибиною 8 м із мангровим естуарієм і справжнім кораловим рифом, а також аграрний сектор і відсік для відпочинку біонавтів (рис. 16.13).



Рис. 16.13. Блоки саван і моря у середині Біосфери-2

Кількість живих істот в експерименті понад 3800 видів: з-поміж іншого і 300 видів вищих рослин (35 видів злаків і бобових), мавпа, черепаха, ящірки,

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...

жаби. Їх ретельно підбирали екологи в усьому світі з таким розрахунком, що після неминучої загибелі з часом певної кількості рослин і тварин (від чверті до половини) ті, що залишаться, зможуть підтримувати екологічну рівновагу в "Біосфері-2".

Ділянка для землеробства мала площу 0,2 га, на якій вирощували картоплю, пшеницю, суниці, боби, рис, папайю, кавові зерна тощо, і вона давала 46 видів рослинних продуктів. На пасовищі утримували кіз, диких курей, в'єтнамських свиней, у штучних водоймах рибу і креветки. Отже, біонавти отримували яйця, молоко, м'ясо та рибопродукти. У житловому відсіку, крім кают і лабораторій, був комп'ютерний центр, з якого за допомогою понад 2500 датчиків вели спостереження за температурою, вологістю і хімічним складом повітря, води, ґрунту.

Надзвичайно важливий з усіх позицій експеримент, на жаль, завершити, згідно з наміченою програмою, не вдалося. Ціла низка проблем виникла одразу ж після його початку у кінці 1991 і на початку 1992 року. Виникали вони і під час роботи другої зміни біонавтів у 1994 році. Особливістю "Біосфери-2" було те, що її "океан" і "суходіл" мали співвідношення 8:92, а не 7:3, як на планеті Земля. При цьому "Біосфера-2" випереджувала в 64 рази реальну біосферу (в біомі тропіків) за середньою продуктивністю свого суходолу. Окрім того, співвідношення між біомасою і загальною кількістю вуглекислого газу у "Біосфері-2" майже в 6000 разів перевищувало реальну біогеосферу. Це спричинило різницю у швидкості кругообігу вуглекислого газу, яка у реальній біогеосфері становить 8 років, а в експериментальній всього 12 годин.

Під час першого етапу рівень кисню почав падати на 0,5% щомісяця (з 21 до 16% і менше), що призвело до ситуації, коли люди вимушені були жити в умовах кисневого голодування (як на висоті 4,080 м над р.м. на Землі). Ті рослини, які повинні були очищувати повітря, дуже швидко втрачали ці свої властивості у створених умовах через невідомі вченим причини. В результаті формувався хімічний склад повітря, непридатний для життя людей і тварин. Почалося збільшення кількості вуглекислого газу. Вірогідно, падіння рівня кисню було спричинене непередбаченим активним розмноженням мікробів. Агрофітоценози, савана і ліс були перенаселені мікроорганізмами, які почали винищувати сходи.

Багато клопоту з самого початку виникало з адаптацією майже кожного з видів рослин чи тварин. Бджоли, яких узяли в "Біосферу-2" для запилювання рослин, через нез'ясований оптичний ефект, чи з інших причин, розбивалися об скло. Їх замінили після дуже складних пошуків на популяцію колібрі. Було втрачене саморегулювання кількості деяких комах, вони спричинилися до знищення культурних рослин, надзвичайно розмножилися ґрунтові бактерії.



Трави і чагарники агресивно освоювали пустелю, бо штучний клімат постійно був дещо перезволожений від непередбачених ранішніх "дощів", котрі випадали зі скляного даху, де конденсувалася волога. Тропічний ліс у таких умовах розрісся удвічі. За відсутності вітру і розгойдування крон дерева ставали крихкими й обламувалися. Деякі злаки, що в природних умовах мають висоту до 60-ти см, виростили до 4-х м. Швидко зменшилася популяція планктону у штучному морі й вимирали корали, для яких він є кормом.

Усі перші біонавти за час ізоляції значно втратили вагу тіла. Тієї кількості необхідних продуктів харчування, яка була запланована, виростити не вдалося. Її обсяг становив лише 80–85% від потреби. "Мала Земля", відтворена стараннями вчених і конструкторів, поступово ставала непридатною для життя. Стабілізувати штучну екосистему, привівши її структуру і функції до запланованих показників за допомогою найсучасніших знань та обладнання (суперкомп'ютеризовані системи параметричного контролю головних екофакторів, використання рослин і тварин тощо) так і не вдалося.

Отже це безперспективний шлях!...

Найпершими це відчули власне біонавти. На внутрішній стіні учасники експерименту залишили напис на пам'ять: "Лише тут ми відчули, наскільки залежні від навколишньої природи. Якщо не буде дерев нам нічим буде дихати, якщо вода забрудниться нам нічого буде пити".

Проте, експеримент "Біосфера-2" загалом дав для науки велику кількість важливих, хоч і несподіваних результатів, які важко переоцінити. Але головний підсумок експерименту це чіткий висновок, що втекти від розв'язання кризових проблем на Землі або ізолюватися від них не вдається, тому їх потрібно вирішувати всією розумною спільнотою планети, а ще краще попереджувати їхнє виникнення.

16.4. Концепція виживання людства

Усвідомлення потреби шляху на виживання цивілізації, спонукало інтелектуальну еліту планети ще 1982 року на Генеральній Асамблеї ООН створити Міжнародну комісію з навколишнього середовища і розвитку. Діяльність Комісії забезпечила підготовку і проведення 1992 року Конференції ООН зустрічі на найвищому рівні очільників 179 держав із найактуальніших на Землі питань довкілля і розвитку. Конференція засвідчила,



що надалі охорону навколишнього природного середовища і соціально-економічний розвиток неприпустимо розглядати як різні системні завдання.

1992 року була прийнята спільна **Декларація з довкілля і розвитку**, як сукупність принципів сталого розвитку, що

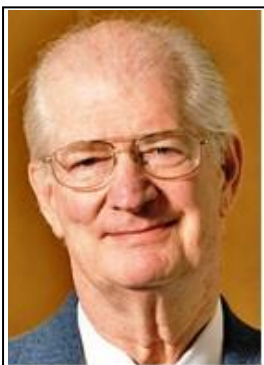
СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...

визначають права народів на розвиток та їх обов'язки щодо збереження спільного для людства глобального середовища існування.

Для досягнення мети всесвітнього сталого розвитку Конференція прийняла ще чотири важливих документи:

- 1) Програму дій. "Порядок денний на XXI сторіччя" (Agenda-21);
- 2) Заяву про принципи керування і захисту всіх видів лісів, життєво необхідних для забезпечення економічного розвитку і збереження всіх форм життя;
- 3) Конвенцію ООН про зміни клімату;
- 4) Конвенцію про біотичне різноманіття.

Другий розділ Програми "Збереження і раціональне використання ресурсів з метою розвитку" присвячений питанням раціонального використання природних ресурсів, зокрема охорони атмосфери, землі, лісів, біотичної різноманітності, водних екосистем тощо. Весь цей розділ пронизаний духом гуманізму, турботою про здоров'я і благополуччя людей, забезпечення тепер і в майбутньому сприятливих умов для їх нормального і щасливого існування. У кожному його підрозділі наголошено на тому, що досягненню мети сталого розвитку на планеті має передувати розумна, скоординована діяльність усіх держав, незалежно від їхнього політичного ладу й рівня економічного розвитку.



Герман Дейл
(1938-2022)

Проте, сама наукова і практична суть сталого розвитку, а головне економічний механізм, залишаються не розробленими. Відомий економіст Г. Дейлі (2003) зазначає, що ідеї безпечного розвитку, існували й активно обговорювалися ще задовго до початку роботи Комісії Брундтланд. Так Дж. Міл запропонував концепцію стабільної економіки ще 1857 року, називаючи її "стаціонарним станом". Під ним він розумів "нульове зростання населення" і запасів фізичного капіталу в умовах постійного технічного й етичного вдосконалення людства. Отже, Дж. Міл виступав, по суті, за сталий розвиток, тобто розвиток без фізичного зростання ресурсів, при якому якісне поліпшення життя відбувається без кількісного збільшення матеріальних цінностей. У добу життя й діяльності Дж. Міла припинення зростання населення бодай в одній державі було фантастичною ідеєю. Сьогодні така тенденція є у багатьох розвинутих країнах, але нажаль залишається на рівні минулих віків у відсталих регіонах світу.

Г. Дейлі доводить, що сьогодення традиційна економічна теорія починається із нефізичних параметрів (технології, преференції і розподіл доходу вважаються заданими). Він дослідив, яким чином треба скоригу-

вати фізичні змінні параметри економічної системи кількість вироблених товарів і використаних ресурсів, щоб вони відповідали стану рівноваги (або врівноваженому темпу зростання), що визначені нефізичними параметрами звичними нормами споживання й розкошів. Отже, нефізичні якісні властивості є заданими, а фізичні кількісні величини підлягають коригуванню. В неокласичній теорії економіки таке "коригування" майже завжди включає в себе зростання. Тут варто додати, що економічна оцінка багатьох природних ресурсів (з-поміж іншого й умов) ще не є адекватною. Тобто ми не платимо сповна ні за повітря, ні за воду, ні за енергію тощо, а беремо ці ресурси у біосфері задарма.



Проте парадигма, яка сьогодні у стадії формування (стабільний стан, сталий розвиток), починається із заданих сталих фізичних параметрів економічної системи (обмежені можливості довкілля, складні екологічні взаємовідносини, закони термодинаміки) і намагається з'ясувати, **як можна досягти справедливої рівноваги між нефізичними змінними параметрами (технологіями,**



преференціями, розподілом і стилем життя) та складною біофізичною системою, частиною якої є біогеосфера.

За новітнього підходу **заданими є фізичні кількісні параметри, а змінними стають нефізичні якісні моделі життя матеріальні й духовні потреби (стиль життя, рівень розкоші тощо).** Ця новітня парадигма передбачає якісний розвиток, а не обов'язкове кількісне зростання.

Тому на підставі сучасних уявлень про реальний прогрес цивілізації доцільно вважати, що **сталий розвиток** це такий загальносвітовий поступ соціальної та економічної сфер, який:

1) не потребує залучення більших, ніж може витримати біосфера (природне довкілля) без її (його) розбалансування й руйнування (деградації), обсягів невідновних матеріально-енергетичних ресурсів;

2) ґрунтується на науково-технологічному і соціальному збалансуванні виробництва, споживання і народонаселення, а також на безпечній нейтралізації продуктованих людством відходів;

3) загалом не загрожує виживанню теперішнього і майбутніх поколінь.

Проте переважна більшість економістів мислить консервативно і новаторський підхід Г. Дейлі важко пробиває собі дорогу до свідомості вчених і політиків. Розроблення фундаментальних наукових засад екобезпечного розвитку триває.

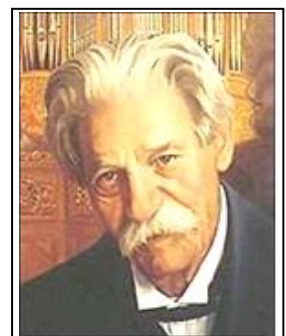
СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...

Є й *альтернативні стратегії розвитку* людства, які базуються на теоріях: біотичної регуляції і стабілізації навколишнього середовища; симбіотичного шляху розвитку; екологічного розвитку; екологізації виробництва; коеволюції тощо. Заслуговує уваги шлях еко-соціальної ринкової економіки, який є європейською моделлю сталого розвитку.

У дискусіях і суперечках вчені розглядають загалом *три сценарії майбутнього* людства. Може продовжитися *інерційний* шлях, чи розвиток "як звичайно" стихійний, некерований централізовано процес розвитку, при якому продовжуватимуться тенденції, які спостерігаємо сьогодні. Не виключений *ультраталітарний* варіант, коли запанує тверда світова диктатура кількох політичних блоків (можливо дво-, або триполюсна) як щодо "третього світу", так і стосовно власного населення. Цивілізацію поглинуть безупинні сутички за ресурси, війни, нещадна соціальна й біологічна евгеніка. Цілком імовірний *трансформаційний* шлях швидке усвідомлення загроз, пов'язаних з руйнуванням навколишнього середовища, адекватна реакція на соціально-екологічну кризу, прорив до нового світосприймання та нової системи цінностей на основі глобальних колективних дій.

Таке усвідомлення можливе лише за однієї універсальної умови якщо люди подолають невігластво, безграмотність і бідність. Отже необхідний якісно новий рівень освіти людей у всіх куточках планети й, зокрема екологічна освіта населення. Особливо це стосується осіб, котрі можуть або хочуть займати посади державних службовців, очолювати громадські рухи, партії, мати інший суспільно значущий статус. Люди повинні не тільки знати свій земний дім, де вони живуть, тобто особливості й закони розвитку довкілля, біосфери, але й уміти жити в ньому.

У такому разі на планеті запанує *екоетика* – моральні правила й норми поведінки із позицій екологістичного імперативу. Вони беруть свій початок від універсальної етики А. Швейцера "благочиння перед життям". Цей принцип є головним і вичерпним для морально гідної поведінки людини. Сутність його полягає у збереженні життя добро, це те, що слугує збереженню й розвитку життя, а зло це все, що знищує життя, або шкодить йому. Тому правильною є поведінка людини, яка поважає іншу волю до життя та сприяє його збереженню й розвитку (Карась, 2003).



Альберт Швейцер
(1875–1965)

В етиці А. Швейцера існують принципи: індивідуальної відповідальності; активної індивідуальної етичної дії; гуманізму; самостійності й творчості мислення; критичності; відмови від влади. Основоположник екологістичної етики А. Леопольд сформулював головні її принципи, у яких жива природа і людство є цілісною системою, а людина повинна відчувати особисту відповідальність за "здоров'я" природи. У цьому принципі



сфокусована суть системної ролі людини у сучасній біогеосфері. Оскільки людина стала планетарною силою та за розумного підходу здатна накопичувати сонячну енергію, доля цивілізації в її руках.



Місія людини, як головна сучасна системна функція на Землі конструювати своє рукотворне довкілля на принципах власної органічної та гармонічної єдності індивідуальних антропоєкосистем з природним внутрішнім середовищем біогеосфери.

На початку ХХІ сторіччя стрімко почали набувати суспільної популярності в інтелектуально й економічно розвинутих державах новітні різновиди сучасної ідеології, філософії й сучасного світогляду **екологізм** та **інвайронменталізм**. Популяризація екології та загострення проблем довкілля призвели до того, що широким колам освічених людей, небайдужих до стану природи і свого середовища життя, все більше "подобаються" гармонійні закони функціонування природи.

Щораз виразніші нез'ясовані кліматичні аномалії на Землі в останні десятиріччя спонукали лідерів націй шукати вирішення проблем. Уряди країн погодилися утримувати потепління на рівні не вище як 1,5°C, тобто на доіндустріальному рівні, за яким межа, після якої існує реальна небезпека серйозних наслідків для клімату у Світі. Перед початком Конференції понад 180 країн зобов'язалися зменшити й обмежити викиди вуглецю. Цього недостатньо, щоб зростання глобальної температури збереглося на рівні 2°C. Насправді це призведе до зростання на 2,7°C або і вище. 187 країн висунули свої плани щодо того, як скоротити свої викиди не до 2020 року, а до 2030. Загальна тенденція останніх років щодо усвідомлення глобальної небезпеки позитивна.

Продукт **наукової революції** у сфері інформаційних технологій Інтернет, продовжує змінювати світ, у т.ч. і саму науку. Вона стає дедалі більше глобальною і відкритою, приходячи в протиріччя із закритими кордонами держав. Ключовим чинником сучасних досліджень стає легкість створення наукових кооперацій з колегами по всьому світу. Інше найважливіше завоювання у тому, що академічні дослідження і вища освіта швидко інтернаціоналізуються.

Радикально руйнується класична ідеологія споживацького суспільства і виробництва для виробництва, а це без сумніву призупинить виснаження ресурсів планети. Культ споживання панував настільки довго, наскільки це було можливо. Помірне споживання, розмірене життя і повільне приймання їжі, як сучасна модна тенденція це лише кілька видів взаємодії з навколишнім світом, які на контрасті показують, наскільки абсурдним було наше життя в минулому. Багато хто відмовляється від авто, від надмірних витрат.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ КОМПОНЕНТІВ...

Культура харчування у сучасному світі настільки деградувала, що монопольні компанії-виробники дуже часто продають нам фактично синтетичну отруту замість їжі й напоїв.

Свідоміші люди переорієнтовуються на здорову і органічну їжу. Мале фермерство й органічне землеробство знову стає в пошані у ланцюгу виробництва. Люди навіть вдаються в крайнощі, вирощуючи в помешканнях овочі і фрукти. Економіка системно змінюється, оскільки змінюються цінності споживання.

Як висловився відомий філософ Етьєн Фермеєрс (2000):



"Землю необхідно розглядати як єдине ціле, як обмежену систему, в якій рослини, тварини і люди формують комплексну взаємодію з сонячним промінням, повітрям, водою й іншою субстанцією, і порушення одного з компонентів може спричинити руйнівні наслідки щодо інших".



Альберт Гор
(народ. 1948)

Уперше в історії 2007 року за суспільну діяльність у приверненні уваги людства до проблем довкілля, потреби його захисту, дослідження причин зміни клімату був удостоєний Нобелівської премії миру громадський діяч США Альберт Гор. Під його керівництвом створений просвітницький фільм щодо впливів людської діяльності на клімат землі, який має назву "Незручна істина", який досі актуальний. У 2006 року фільм "Незручна правда" отримав "Оскара". Зі своїми емоційними та достатньо науково підготовленими виступами на захист клімату й біосфери майбутній лауреат об'їздив кілька десятків міст світу. У вересні 2013 року А. Гор став веганом.



ЛІТЕРАТУРА

- Бачинский Г. А. Социозкология: теоретические и прикладные аспекты. К.: Наук. думка, 1991. 153 с.
- Бондаренко Л. Б., Чумак В. Л. Біотрансформація органічних сполук: Метод. вказівки. К.: ІВЦ Політехніка, 2004. 36 с.
- Василюк О., Пархоменко В. Асканія-Нова. Антологія публікацій та друкованих видань (1845-1945) у 7-ми томах. Том 6: 1932-1937 / Наук. ред. В. Шаповал. Київ–Чернівці: Друк Арт, 2024. 624 с. URL; https://www.researchgate.net/publication/386459228_Period_represij_1930-h_rokiv_u_zapovidniku_Askania-Nova.
- Вовк В. М., Дрогомирецька З. Б. Основи системного аналізу: Навчальний посібник / Львівський нац. ун-т ім. І. Франка Львів, 2002. 248 с.
- Воронов С. А. (Ред.). Токсикологічна хімія харчових продуктів та косметичних засобів / С. А. Воронов, Ю. Б. Стецишин, Ю. В. Панченко, В. П. Васильєв. Львів: В-во Львівської політехніки, 2010. 316 с.
- Гайнріх Д, Гергт М. Екологія: dvt-Atlas: Пер. з 4-го нім. вид. / Наук. ред. В. В. Серебряков. К.: Знання-Прес, 2001. 287 с.
- Гнатів П. С. Вирощування цукрових буряків // В кн.: "Науково обґрунтована система ведення господарства на основі технологічних стандартів в колгоспах і радгоспах Ровенської області" / А. Н. Артюшов, В. А. Архангельский, М. В. Бушинська та ін. Рівне-Мінськ, 1986. С. 95-105.
- Гнатів П. С. Антропогенне зрушення азотного балансу і реакція деревних рослин. *Промышленная ботаника*. Вып. 3. 2003. С.113–119.
- Гнатів П. С. Біоіндикація екотопів за спектром хімічного складу сухої речовини листків дерев // Наук. вісн. Чернівецького університету. Вип. 416: Біологія. 2008. С.249–255.
- Гнатів П. С. Біологічний баланс поживних речовин в сівозміні // Основні результати досліджень за 1976-1982 роки. Рівне: Облполіграфвидав, 1983.
- Гнатів П. С. Вирощування цукрових буряків // В кн.: "Науково обґрунтована система ведення землеробства на основі технологічних стандартів в сільськогосподарських підприємствах Ровенської області" / А. Н. Артюшов, В. А. Архангельский, А. Г. Балан та ін. Рівне-Мінськ, 1988. С.146–154.

ЛІТЕРАТУРА

- Гнатів П. С. Динаміка біотичної різноманітності та сучасні загрози довкіллю: Україна і світовий досвід. *Наукові праці ЛАНУ*. 2008. Вип. 6. С.125–128. URL: http://www.nbu.gov.ua/portal/Chem_Biol/Nplanu/2008_6/LAN_6_Hnatiw.pdf.
- Гнатів П. С. Динаміка біотичної різноманітності та сучасні загрози довкіллю: Україна і світовий досвід. *Наукові праці ЛАНУ*. Львів: РВВ НЛТУ України, 2008. Вип. 6. С.125–128.
- Гнатів П. С. Динаміка ландшафтних екосистем та еволюція соціуму Південно-Західного Поділля упродовж голоцену. *БІОРЕСУРСИ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ*. Том 7, №3 4, 2015. С.49-57.
- Гнатів П. С. Природне й антропогенне середовища: їхня суть і значення, методологія наукового пізнання // Зб. наук. праць IV Міжнар. наук. конф. "Фальцфейнівські читання". 24–26 травня 2007 р. Херсон: ПП Вишемирський, 2007. С.68–71.
- Гнатів П. С. Природні ресурси України : навч. посібн. / П. С. Гнатів, П. Р. Хірівський, О. Д. Зинюк та ін. Львів: Камула, 2012. 216 с.
- Гнатів П. С. Природні ресурси: проблеми збереження і використання. Львів: *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Вип. 12. С. 277-283.
- Гнатів П. С. Середовище, антропогенні чинники й адаптація рослин. *Науковий вісник Волинського нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Біол. науки*. Вип. 3. 2008. С.257–264.
- Гнатів П. С. Функціональна діагностика в дендроекології : наук. моногр. Львів: В-во Камула, 2014. 336 с.
- Гнатів П. С., Артемовська Д. В. Властивості зовнішнього і внутрішнього середовища листків дерев як чинники адаптації рослин у трансформованому довкіллі. *Наукові праці ЛАНУ*. Львів: РВВ НЛТУ України, 2009. Вип. 7. С.98–103.
- Гнатів П. С., Голуб С. М., Голуб В. О. Вивчення акумуляції цезію-137 макроміцетами в умовах Волинського Полісся у віддалений період після аварії на ЧАЕС // *Природа Західного Полісся та прилеглих територій* : зб. наук. пр. / Відп. ред. Ф. В. Зузук. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2010. № 7. С.169–176.
- Гнатів П. С., Голубець М. А. Середовищезнавство / Екологічна енциклопедія: У 3 т. // Т.3: О–Я. К.: ТОВ "Центр екол. осв. та інф.", 2008. (472 с). С.236-237.
- Гнатів П. С., Коршиков І. І. Накопичення важких металів і ґрунті та зольність листків деревних рослин насаджень міста Львів. *Промышленная ботаника*. Вип. 6. 2006. С.28–34.
- Гнатів П. С., Кулачковський Р. І. Моделювання географічної ситуації у гірському регіоні Львівщини засобами геоінформаційних систем. *Наук. вісн. Національного ун-ту біоресурсів і природокористування України*. К.: НУБіП України, 2009. №128. С.235–243.

- Гнатів П. С., Кучерявий В. П. Урбанізаційні процеси: суть явища і наслідки для гірських ландшафтів Львівщини. Вип. 21.16. 2011. С.53-58.
- Гнатів П. С., Лопотич Н. Я. Урбанізаційні процеси у Бескидах історичні та еколого-економічні аспекти. *Наук. вісник НЛТУ України*, Вип. 21.16. 2011. С.98–104.
- Гнатів П. С., Нечай О. С. Генетичні ефекти трансформації довкілля. *Науковий вісник Волинського нац. ун-ту ім. Лесі Українки*. Вип. 9. Біол. науки. 2009. С.204–212. URL: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/nvnu/biolog/2009_9/R5/Hnativ.pdf.
- Гнатів П. С., Нечай О. С. Генетичні ефекти трансформації довкілля. *Науковий вісник Волинського нац. ун-ту ім. Лесі Українки*. Вип. 9. Біол. науки. 2009. С.204–212.
- Гнатів П. С., Хірівський П. Р. Теорія систем і системний аналіз в екології: Львів: В-во Камула, 2010. 204 с.
- Голубець М. А. Екосистемологія. Львів: Поллі, 2000. 316 с.
- Голубець М. А., Гнатів П. С. Фундаментально про екологію, середовищезнавство, охорону природи, охорону довкілля та геосоціосистемологію. *Екологія та ноосферологія*. Том. 18. 2007. №1-2. С.7–15.
- Давидюк Г. В. та ін. Вплив технологій вирощування на вміст мікроелементів і важких металів у рослинах пшениці озимої. *Agroecological Journal*. No. 3. 2019. С. 62-70. doi.org/10.33730/2077-4893.3.2019.183475.
- Дейлі Г. Поза зростанням. Економічна теорія сталого розвитку / Пер. з англ.: Інститут сталого розвитку. К.: Інтелсфера, 2002. 312 с.
- Дмитрук Ю. М. Еколого-геохімічний аналіз ґрунтового покриву агроєкосистем: монографія. Чернівецький національний ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці : Рута, 2006. 328 с.
- Добровольський В. В. Основи теорії екологічних систем: Навч. пос. К.: Професіонал, 2005. 272 с.
- Екологічна біохімія : навч. посібн. / В. М. Ісаєнко, В. М. Войціцький, Ю. Д. Бабенюк та ін. К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. 440 с.
- Екологічна енциклопедія: У 3 т. // А. В. Толстоухов та ін. К.: ТОВ "Центр екол. осв. та інф.", 2006.
- Екологічна оцінка якості поверхневих вод суші та естуаріїв України. К.: Мінприроди України, 1994. 37 с.
- Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. Основи системного аналізу. К.: Вид. група ВНУ, 2007. 544 с.
- Зербіно Д. Д., Сердюк А.М. Чернівецька хімічна хвороба: нове екологічне захворювання? Львів, 1998. 278 с.

ЛІТЕРАТУРА

- Зербіно Д. Д., Гжегоцький М. Р. Екологічні катастрофи у світі та в Україні. Львів: БаК, 2005. 280 с.
- Злобін Ю. А. Популяційна екологія рослин: сучасний стан, точки росту. Суми: Університетська книга, 2009. 263 с. URI: <http://repo.sau.sumy.ua/handle/123456789/1480>
- Злупко С. Екосистеми і людина (М. А. Голубець. Екосистемологія. Львів: Поллі, 2000. 316 с.). *Вісник НАН України*. №3. 2001. С.65-68.
- Злупко С. Космогенно-енергетична теорія розвитку економіки С. Подолінського // *Основи історії економічної теорії*. Львів: Львівський нац. ун-т ім. Івана Франка, 2001. С.406–420.
- Іванюк В. Я., Гнатів П. С. СИСТЕМА ТОЧНОГО РІЛЬНИЦТВА (землеробства). Термінологічний словник. Довідкове видання. Оброшине: ІСГ КР НААН. 100 с.
- Карась, А. Ф. (2019) Від практичного розуму до практичної філософії: наслідок наявності цивільного статусу. Осмислення формування світу в різних філософських підходах: Колективна монографія / З. М. Атаманюк, Є. Р. Борінштейн та ін. Львів-Торунь: Ліга-Прес, (SENSE) С. 192-217.
- Карась А. Семіотична перспектива інтерпретації реальності як дійсності // *Філософська думка*. № 3, 2008.
- Карась А. Філософія громадянського суспільства в класичних теоріях і неklasичних інтерпретаціях. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2003. 520 с.
- Катренко А. В. Системний аналіз об'єктів та процесів комп'ютеризації. Навчальний посібник. Львів, "Новий світ-2000", 2003. 424 с.
- Крамаренко В. П. Токсикологічна хімія : підручн. К.: Вища школа, 2001.
- Кучерявий В. П. Загальна екологія. Частина 1. Львів : "Новий Світ – 2000", 2025. 290 с.
- Кучерявий В. П. Урбоекологія. Львів, Видавництво "Новий Світ-2000", 2021. 460 с.
- Кучерявий В. П. Урбоекологія: підручник для студентів вищих навчальних закладів. Львів, Видавництво "Новий Світ-2000", 2024. 460 с. URL:
- Лаврик В. І. Методи математичного моделювання в екології. К.: Академія, 2002. 204 с.
- Ладанюк А. П. Основи системного аналізу. Навчальний посібник. Вінниця: Нова книга, 2004. 176 с.
- Лесенко М. Д. Основи системного підходу: теорія, методологія, практика: Навч. посіб. Львів: ЛРІДУ УАДУ, 2002. С.89–100.
- Лойт А. О. Общая токсикология / Под ред. А. О. Лойта. "Элби", 2006. 224 с.
- Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. К.: Держмінекобезпеки України, 1998. 28 с.

- Наближене до природи та багатофункціональне ведення лісового господарства в Карпатському регіоні України та Словаччини : посібн. / за ред. Г. Т. Криницького і М. В. Чернявського. Ужгород: ПП "Коло". 2014. 279 с.
- Наука в інтересах стійкого майбутнього // Доповідь з науки: на шляху до 2030 року, 2015. URL: <http://www.unesco.org/new/ua/celebrations/world-science-day-2015/>
- Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/natsionalni-dopovid-pro-stan-navkolyshnogo-prirodno-gosedovyshha-v-ukrayini/>
- Нечай О. С. Адаптаційні морфологічні зміни в плаценті людини як наслідок впливу ксенобіотиків. *Вісн. наук. досліджень*. Тернопіль, 2003. №1. С.85-87.
- Нечай О. С. Комплексна оцінка стану довкілля та здоров'я населення у сільських районах Львівщини // Екологічні проблеми техногенно навантажених регіонів / Матеріали Міжнар. н.-п. конф. (12–14.05.2008). Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т, 2008. С.69-71.
- Нечай О. С. Комплексний підхід до профілактики патологічного стану плода у жінок з репродукційними втратами // О. С. Школьник, А. В. Самохвалова, В. І. Солощенко, М. Б. Школьник / Збірник наукових праць IV з'їзду генетиків України. Львів, 9-11 жовтня 2008. С.37.
- Нечай О. С. Стан довкілля і здоров'я населення сільських районів Львівщини // Праці Наукового товариства ім. Шевченка. 2008. Том XXIII. С.336–347.
- Нечай О. С. Стан довкілля і здоров'я населення сільських районів Львівщини // Праці Наукового товариства ім. Шевченка. 2008. Том XXIII. С.336–347.
- Нечай О. С., Гнатейко О. З., Заморська Л. Активність окисних ферментів і морфологія плаценти людини в умовах хімічно забрудненого довкілля // *Acta Medica Leopoliensia*. 2003. V.9, №3. С.46–52.
- Нечай О. С., Гнатейко О. З., Заморська Л. Активність окисних ферментів і морфологія плаценти людини в умовах хімічно забрудненого довкілля. *Acta Medica Leopoliensia*. 2003. V. 9, № 3. С.46–52.
- Нечай О. С., Лозинська М. Р. Оцінка частоти самовільних викиднів і мутагенних ефектів у вагітних із регіонів з різним рівнем хімічного забруднення довкілля // Актуальні проблеми акушерства і гінекології, клінічної імунології та медичної генетики: Зб. наук. пр. Вип. 12. Київ-Луганськ, 2005. С. 280–288.

ЛІТЕРАТУРА

- Околітенко Н. І., Гродзинський Д. М. Основи системної біології. К.: Либідь, 2005. 360 с.
- Панкратова, Н. Д. Системний аналіз. Теорія та застосування : підручник / Н. Д. Панкратова ; НАНУ, НТУУ "КПІ", ІПСА НАНУ. Київ : Наук. думка, 2018. 347 с.
- Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки / За ред. Лялька В. І. Київ: НВП "Видавництво "Наукова думка" НАН України", 2015. 283 с.
- Пащенко В. М. Екоеволюція від сталого розвитку. *Супутник Київ. географ. щорічника*. Вип. 5. Київ: КВ УГТ, 2005. 112 с.
- Подолінський С. А. Вибрані твори. К., 2000. С.281.
- Проневич В. А., Якубовська В. В., Гнатів П. С. Баланс поживних речовин в спеціалізованих сівозмінах Лісостепу Рівненської області. *Вісник сільськогосподарської науки*. № 2. 1985.
- Рассел Б. Історія західної філософії / Пер. з англ. Ю. Лісняка, П. Таращука. К., 1995. 759 с.
- Ситник К. Проблеми сталого розвитку в усьому світі і в Україні. URL: <http://www.ualogos.kiev.ua/fulltext.html?id=581>
- Слободян С. О., Гутий Б. В., Гуфрій Д. Ф., Гнатів П. С., Мурська С. Д. Вплив селеніту натрію і кормової добавки "Метісевіт плюс" на протеїнсинтезувальну функцію та функціональний стан печінки щурів за тривалого кадмієвого та свинцевого навантаження. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С.З. Гжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2020. Т. 22. № 100. С. 53-58. DOI: 10.32718/nvlvet10010.
- Снітинський В. В., Хірівський П. Р., Гнатів П. С. та ін. Екотоксикологія : навч. посібн. / друге вид. / Херсон: Олді-плюс. 2019. 330 с.
- Снітинський В. В., Гребельна Н. В. Зміни основних параметрів ґрунту під впливом свинцю та кадмію. *Вісник ЛДАУ: Агрономія*. 2008. №2. С.21-26.
- Снітинський В. В., Лозовицька Т. М., Воробець Н. М. Вплив забруднень ґрунту свинцем і кадмієм на фотосинтетичний апарат суниці ананасної (*Fregarsa ananassa* Duch.). *Вісник ЛДАУ. Агрономія* №8. 2004 С.3–7.
- Соколовський Я. І. Моделювання систем в середовищі GPSS World : навч. посібн. / Я. І. Соколовський, Ю. В. Шабатура, Я. І. Виклюк та ін.; за ред. В. В. Пасічника. Львів: "Новий Світ-2000", 2014. 288 с.
- Стойко С. М. Вчення про біосферу наукова основа її охорони. *Укр. ботан. журн.* 2009. 66, №3. С.293–306.
- Стойко С. М. Геосозологія наука про охорону біосфери як глобальної соціоекосистеми. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2006, вип. 16.8. С.157-164.

- Соціально-демографічна ситуація в Україні: шляхи подолання наслідків війни. 2022. Національний інститут стратегічних досліджень. URL: <https://niss.gov.ua/news/komentari-ekspertiv/sotsialno-demohrafichna-sytuatsiya-v-ukrayini-shlyakhy-podolannya>
- Ткач В. П. Ліси та лісистість в Україні: сучасний стан і перспективи розвитку / В. П. Ткач // Український географічний журнал. 2012. № 2. С. 49-55.
- Ткачук О. П., Разанова А. М. Порівняльна оцінка накопичення Zn розтопленою плямистою (*Silybum marianum*) залежно від виду мінеральних добрив. *Agroecological Journal*. No. 1. 2020. С. 98-103. doi.org: 10.33730/2077-4893.1.2020.201278.
- Трахтенберг І. М. та ін. Альтернативні методи і тест-системи // Лікарська токсикологія / За ред. І. М. Трахтенберга. К.: Авіцена, 2008. 272 с.
- Українська енциклопедія лісівництва. У двох томах / За ред. С. А. Генсірука. Львів, 1999. Том 1. 464 с.; 2007. Том 2. 470 с..
- Царик Й. Консорція і збереження біологічного різноманіття // Екологічний збірник НТШ. Львів: Наукове товариство ім. Шевченка. № VII. 2001. С.237-248.
- Чорнобай Ю. М. Трансформація рослинного детриту в природних екосистемах. Львів: вид-во ДПМ НАНУ, 2000. 352 с.
- Шарапов О. Д., Дербенцев В. Д., Семьонов Д. Є. Системний аналіз: Навч.-метод. посібник для самост. вивч. дисциплін. К.: КНЕУ, 2003. 154 с
- About Masdar City. 2012. URL: <http://www.masdar.ae/en/masdar-city/the-built-environment>.
- Ackoff R. The future of operational research is past. *Journal of the Operational Research Society*. 30. 2 (February 1979). 93-104.
- Adamopoulos, T. & Restuccia, D. 2021. *Geography and Agricultural Productivity: cross-Country Evidence from Micro Plot-Level Data*. National Bureau of Economic Research. Working Paper No. 24532.
- Adams K. MacGr., 2012. Systems theory: A formal construct for understanding systems. January 2012. *International Journal of System of Systems Engineering*. 3(3/4):209-224. DOI: 10.1504/IJSSE.2012.052684
- Adaptive & Decisive CEO. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/environmentalism-must-evolve-environmental-science-khoury-uffye/>
- Adhikari K., Hartemink A. E. 2016. Linking soils to ecosystem services – A global review. *Geoderma*. Volume 262, 15 January 2016, Pages 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Alexander L. Climate Change 2013 / L. Alexander, S. Allen, N. Bindoff // The Physical Science Basis. Oxford, 2013. 30 p.
- Banerjee O., Crossman N. D., de Groot R. S. 2013. Ecological Processes, Functions and Ecosystem Services. In book: *Ecosystem Services in*

- Agricultural and Urban Landscapes. January 2013. DOI: 10.1002/9781118506271.ch2
- Barnosky A. D., Matzke, N., Tomiya S., Wogan G. O., Swartz B., Quental T. B., ... & Ferrer E. A. 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471(7336), 51-57.
- Barry K. E., Mommer, L., van Ruijven, J., Wirth, C., Wright, A. J., Bai, Y. et al. 2019. The future of complementarity: disentangling causes from consequences. *Trends in Ecology & Evolution*, 34, 167–180.
- Bates D. G. 2012. "On forty years: Remarks from the editor". *Hum. Ecol.* 40 (1): 1-4.
- Baveye Ph. C., Baveye J., Gowdy J. 2016. Soil "Ecosystem" Services and Natural Capital: Critical Appraisal of Research on Uncertain Ground. *Sec. Soil Processes*. V. 4. 2016.
<https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2016.00041/full>
- Benn H. 2010. Viewpoint: Biodiversity nears 'point of no return'. BBC News. 17 January. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8461727.stm>
- Berner R. A., & Kothavala Z. 2001 . Geocarb III: A Revised Model of Atmospheric CO₂ over Phanerozoic Time. *American Journal of Science*, 301(2), 182–204. doi.org/10.2475/ajs.301.2.182
- Bertalanffy L. von. General system theory : foundations, development, applications. Publisher New York : G. Braziller. 1973. 295 p.
- Bertalanffy L. von. General system theory. A critical review. "General Systems", vol. VII, 1962, p. 1–20. URL: <http://macroevolution.narod.ru/bertalanfi.htm>.
- Bilous A., Matsala M., Radchenko V. 2019. Coarse Woody Debris in Mature Oak Stands of Ukraine: Carbon Stock and Decomposition Features. *Forestry Ideas*, 2019, vol. 25, No 1 (57): 196–219. URL: <https://www.researchgate.net/publication/334645385>
- BIOSPHERE 2: The Experiment. Invention, Creation & Mission 1. A Brief Chronology. URL: <http://www.biospherics.org/experimentchrono1.html>.
- Boincean B. & Charles F. Agroecological rotation designs reduce dependence on industrial inputs. In: *Agroecology and Sustainable Food Systems*, Taylor and Francis Group, USA, 2017.
- Bommarco R., Kleijn, D. & Potts, S.G. 2013. *Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. Trends in Ecology & Evolution*, 28, 230–238.
- Borden R. 2008. "A brief history of SHE: Reflections on the founding and first twenty five years of the Society for Human Ecology" (PDF). *Human Ecology Review* 15 (1): 95–108.
- Borovikov V. Statistica. The art of data analysis on the computer. For professionals. Piter, St. Petersburg (2003). 688 c.

- Brock W. H. 2025. Developments in agricultural, animal, and food chemistry of Justus, baron von Liebig. The Editors of Encyclopaedia Britannica. Last Updated: Apr 14, URL: <https://www.britannica.com/biography/Justus-Freiherr-von-Liebig/Developments-in-agricultural-animal-and-food-chemistry>
- Bünemann E. K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R. E., De Deyn, G. & de Goede R. 2018. Soil quality – a critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125.
- Cairo A. 2012. The Functional Art. An introduction to information graphics and visualization. Berkeley 2012. *Toruńskie Studia Bibliologiczne* 7(2(13): 207. DOI: 10.12775/TSB.2014.025
- Chan K. M. A. et al. 2012. Where are cultural and social in ecosystem services? A framework for constructive engagement. *Bioscience* 62, 744–756. doi: 10.1525/bio.2012.62.8.7
- Charron S. F. Ecohealth research in practice: Innovative Applications of an Ecosystem Approach to Health. Springer, IDRC 2012.
- Copenhagen Accord 2010. URL: <http://ecoperestroika.ru/v-kopengagene-prinyata-deklaraciya>.
- Corwin E. H. L. Ecology of health. New York: Commonwealth Fund, 1949. Cited in le Riche WH, Milner J. *Epidemiology as Medical Ecology*. Churchill Livingstone. Edinburgh and London. 1971.
- Cunningham W. P., Cunningham M. A., Saigo B. W. *Environmental Science: a global concern*. Eighth edition. Boston-Toronto: Wm. C. Brown Publishers, 2005. 600 p.
- de Groot R. S., Wilson M. A. & Boumans R. M. J. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecol. Econ.* 41, 393–408. doi: 10.1016/S0921-8009(02)00089-7
- Dickens C., Suarez-Balcazar Y., Allen-Meares P. & Brazil E. 2025. Using Ecological Systems Theory to Enhance Community Health Literacy. *Health Lit Res Pract.* 2025 Feb 1;9(1): e29–e36. doi: 10.3928/24748307-20241126-01
- Doebley J. Genetics, development and plant evolution. *Current opinion in Genetics and Development*. 1993. P. 865–872.
- D'Odorico P., Laio F. and Ridolfi L. 2006. Vegetation patterns induced by random climate fluctuations. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19404. doi:10.1029/2006GL027499.
- Drack M. 2009. Ludwig von Bertalanffy's Early System Approach. *Systems Research and Behavioral Science*. 26: 563–572.
- Drack M. & Pouvreau D. 2015. On the History of Ludwig von Bertalanffy's General Systemology, and on its Relationship to Cybernetics – Part III: Convergences and Divergences. *International Journal of General Systems*

- 44: 523–5571. URL:
https://www.researchgate.net/publication/359209423_The_systems_approach
- Eckardt N. A., Ainsworth E. A., Bahuguna R. N. et al. 2023. Climate change challenges, plant science solutions. *Plant Cell*. 2023:35(1): 24–66. Doi: 10.1093/plcell/koac303
- Eckardt N. A., Ainsworth E. A., Bahuguna R. N. et al. 2023. Climate change challenges, plant science solutions. *Plant Cell*. 2023: 35(1):24–66. Doi: 10.1093/plcell/koac303
- Egerton F. N. History of Ecological Sciences, Part 47: Ernst Haeckel's Ecology. 2013. 244 p. <https://doi.org/10.1890/0012-9623-94.3.222>
- Enger E. D., Smith B. F. Environmental Science: a study of interrelationships. Ninth edition. Boston-Toronto: Wm. C. Brown Publishers, 2004. 477 p.
- Fedonkin M. A. Cold dawn of animal life. 2000. Nature. 9. URL:
<http://evolution.powernet.ru/library/dawn.htm>
- Gates B. 2023. The Age of AI has begun. Gates Notes. 21 March 2023. URL:
<https://www.gatesnotes.com/The-Age-of-AI-Has-Begun>
- Gimbutienė M. The civilization of the goddess : the world of Old Europe. HarperSanFrancisco. 1991. 529 p.
- Gleeson P. 2019. Importance of the System Approach Principle. URL:
<https://smallbusiness.chron.com/importance-system-approach-principle-81413.html>.
- Gnoli C. 2017. Classifying Phenomena, Part 3: Facets. In Dimensions of Knowledge: facets for knowledge organization, eds. Richard Smiraglia and Hur-Li Lee. Würzburg: Ergon, 55-67. URL:
https://www.researchgate.net/publication/359209423_The_systems_approach
- Gnoli C. 2020. Integrative Levels Classification (ILC). In Birger Hjorland and ClaudioGnoli eds., ISKO Encyclopedia of Knowledge Organization. URL:
https://www.researchgate.net/publication/359209423_The_systems_approach
- Haeckel E. H. P. A. 1866. Generelle Morphologie der Organismen. Allgemeine Grundzüge derorganischen Formen-Wissenschaft, mechanische Begründet durch die von Charles Darwinreformirte Descendenz-Theorie. Volume I: Allgemeine Anatomie der Organismen. 32 + 574 p.; v. II: Allgemeine Entwicklungsgeschichte der Organismen. 140 + 462 p. GeorgReimer, Berlin, Germany.
- Hammond D. 2008. Philosophical and Ethical Foundations of Systems Thinking. Communication Capitalism & Critique Open Access Journal for a Global Sustainable Information Society. 3(2). 1-27 p. DOI: 10.31269/vol3iss2pp20-27.
- Hayes B. J., Chen C., Powell O., Dinglasan E., Villiers K., Kemper K. E., Hickey L.T. 2023. Advancing artificial intelligence to help feed the world. Nat Biotechnol. 2023:41(9):1188–1189. 2023. Doi: 10.1038/s41587-023-01898-2

- Heidegger M. Being and Time. URL:
http://www.gumer.info/bogoslov_Buks/Philos/Haid_BtVr/index.php
- Hemsley A. R. et al. 1994. The role of self-assembly in biological systems: evidence from iridescent colloidal sporopollenin in selaginella megaspore walls. *The Royal Society Philosophical Transactions*. 1994345 (1312): 163-173. DOI:10.1098/rstb.1994.0095
- Hinton G. E. 2013. Where do features come from? *Cognitive Science*, Vol. 38(6), pp 1078-1101. URL:
<https://www.cs.toronto.edu/~hinton/absps/cogsci14.pdf>
- Hnativ P. S. An euthrophication of transformation ecotopes by the indexes of nitric and phosphoric feed of arboreal plants // *Forestry and landscape gardening*, №2. URL: <https://ejournal.studnubip.com/zhurnal-2>
- Hnativ P. S., Lopotych N. Ja. Renewable water resources of northeastern macroslopes of Eastern Carpathians and their quality // *Біоресурси і природокористування. Електронний журнал*. №5-6. 2015. URL:
http://nbuv.gov.ua/j-pdf/bpc_2014_6_5-6_24.pdf
- Hnativ P. The conservation of biodiversity in the botanical garden of Ukrainian State University of Forestry and Wood Technology // *Botanische Gärten und Erhaltung Biologischer Vielfalt. Ein Erfahrungsaustausch*. Berlin: Bundesamt für Naturschutz, 2001. P.105-106.
- Hnativ P., Artemovs'ka D. Pollution of a city, physiological reaction of plants and phito-reclamation of the environment // *NATO Advanced Research Workshop: Public Health Consequences of Environmental Pollution*. Lviv-Ukraine, 1997. P.11
- Hoekstra A. 2009. "Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis". *Ecological Economics* 68 (7): 1963–1974.
https://opac.kpi.ua/F/YCELNQ7CMS2UJTNTQ1VH1PNH9YF86FT4E1KY71AJPY9CEPAPHT03413?func=full-set-set&set_number=004232&set_entry=000001&format=999
- Hunter M. C., Smith R. G., Schipanski M. E., Atwood, L. W. & Mortensen D.A. 2017. Agriculture in 2050: recalibrating targets for sustainable.
- Imboden D. M., Pfenninger S. 2013. Introduction to Systems Analysis. Mathematically Modeling Natural Systems. Publisher Springer Berlin, Heidelberg. 252 p. doi.org/10.1007/978-3-642-30639-6
- Jeffers R. An introduction to systems analysis : with ecological applications. London : E. Arnold, 1978. 252 c.
- Joly A., Goëau H., Bonnet P. et al. 2014. Interactive plant identification based on social image data. *Ecological Informatics*. 2014, 23:22-34. doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.07.006.
- Jungk A. 2009. Carl Sprengel – the founder of agricultural chemistry: A re-appraisal commemorating the 150th anniversary of his death. *Journal of*

ЛІТЕРАТУРА

- Plant Nutrition and Soil Science. 172(5): 633-636. DOI: 10.1002/jpln.200900065
- Jungk A. Carl Sprengel-The founder of agricultural chemistry: A re-appraisal commemorating the 150th anniversary of his death. October 2009. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 172(5): 633-636. DOI: 10.1002/jpln.200900065.
- Karas A. Civil identity as ethical self-determination // Філософія освіти. 2013. № 2 (13). С. 36-41.
- Khoury M. P. 2025. Environmentalism Must Evolve into Environmental Science & Sustainability.
- Korlepara D. B. et al. 2019. Differentiating the mechanism of self-assembly in supramolecular polymers through computation. *Chemical Communications*. 2019. 55: 3773-3776. doi.org/10.1039/C9CC01058K
- Krajewski P., 2016. Agricultural Biodiversity for Sustainable Development, Problemy Ekorozwoju/ Problems of Sustainable Development 12(1): 135-141.
- Kropotkin Peter. Mutual Aid: A factor of evolution. 902. [URL: http://dwardmac.pitzer.edu/Anarchist_Archives/kropotkin/muta-idcontents.html.
- Kumar A., Desai S. V., Balasubramanian V. N. et al. 2021. Efficient maize tassel-detection method using UAV based remote sensing. *Remote Sens Appl.* 2021:23:100549. Doi: 10.1016/j.rsase.2021.100549
- Kumar P., Subhash B., Gopika B., Jaisuriyan K. 2024. Hydroponic System: Hope and Hype. In: Kumar, N. (eds) *Hydroponics. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series*. Springer, New York, NY. doi.org/10.1007/978-1-0716-3993-1_3
- Kurzweil R. Technology, innovation and inclusive growth. October 5, 2016 URL: <http://www.kurzweilai.net/international-monetary-fund-new-economy-forum>
- Lehmann J., Bossio D. A., Kögel-Knabner I. & Rillig M. C. 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1, 544–553.
- Liebig J. von. Die Grundsätze der Agrikultur-Chemie mit Rücksicht auf die in England angestellten Untersuchungen. Viehweg Sohn, Braunschweig. 1855.
- Liebig J. von. The Natural Laws of Husbandry. Arno Press, 1863. 387 p.
- Liebig, J. von .1855. Die Grundsätze der Agricultur-Chemie mit Rücksicht auf die in England angestellten Untersuchungen (The Relations of Chemistry to Agriculture and the Agricultural Experiments of Mr. J. B. Lawes). 1st and 2nd ed. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig (in German).
- Lima-de-Faria A. Evolution without selection: form and function in autoevolution. Amsterdam: Elsevier, 1988. 372 p.

- Lima-de-Faria A. Praise of chromosome "folly: confessions of an untamed molecular structure. 2008. 428 p.
- Lima-de-Faria A. One hundred years of chromosome research and what remains to be learned. Publisher: Kluwer Academic Publishers: 2004. 228 p
- Living Planet Report 2008 (PDF). Worldwide wildlife fun. Retrieved 4 February 2010.
- López-Quílez A. 2025. AI, IoT and Remote Sensing in Precision Agriculture. Department of Statistics and Operations Research, Faculty of Mathematics, University of Valencia, 46100 Valencia, Spain. Appl. Sci. 2025, 15(6), 2890; doi.org/10.3390/app15062890.
- Loreau M. & Hector, A. 2001. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412, 72–76.
- Magee C. L. & de Weck O. L. 2004. Complex System Classification. In Proceedings of the 14th Annual International Council on Systems Engineering International Symposium. France, Toulouse, 20-24. URL: https://www.researchgate.net/publication/359209423_The_systems_approach.
- Mansvel J. D. von. Boincean B. Justus von Liebig's transition from chemist to agronomist, adept of the ecological agriculture. *Științe Agricole. Akademos* 4, 2017. P. 66-71.
- Margalef R. Informacion y diversidad especifica en las comunidadesde organismos. "Invest. Pesquera", vol. 3, 1956.
- Margalef R. Perspectives in ecological theory // Co-Evolution Quarterly. Summer 1975. 49 p.
- Marth W, Praetorius S, Voigt A. 2015. A mechanism for cell motility by active polar gels. *J. R. Soc.* 12: 20150161. doi.org/10.1098/rsif.2015.0161.
- McCallum, M. L. 2015. Vertebrate biodiversity losses point to a sixth mass extinction. *Biodiversity and Conservation*, 24(10), 2497-2519.
- Meadows D. H. et al. The limits to growth. *Green Planet Blues*. Edition 5th. 2015. P. 5.
- Meadows D. H. Thinking in systems: A Primer. Chelsea Green Publishing Co. 2008. 240 p.
- Measuring the health-related Sustainable Development Goals in 188 countries: a baseline analysis from the Global Burden of Disease Study 2015 Published Online September 21, 2016.
- Metcalfe G. S. et al. 2021. Introduction to the Handbook of Systems Sciences. Springer, Singapore. P. 3–25. doi.org/10.1007/978-981-15-0720-5_81
- Michael Friendly, Howard Wainer. A History of Data Visualization and Graphic Communication. Hardcover. 2021. URL: <https://www.hup.harvard.edu/books/9780674975231>

ЛІТЕРАТУРА

- Milcu A. I., Hanspach J. Fischer J. 2013. Cultural ecosystem services: a literature review and prospects for future research. *Ecol. Soc.* 18, 44. doi: 10.5751/ES-05790-180344
- Mobus G. E. & Kalton M. C. 2014. *Principles of Systems Science*. New York, NY, USA: Springer.
- Montgomery D. R. *Growing a Revolution. Bringing our soil back to life*. W.W. Norton and Company Inc. 2017. 316 p.
- Moran D. D. Kitzes J. A. et al. 2008. "Measuring sustainable development Nation by nation". *Ecological Economics* 64 (3): 470–474.
- Moran D. D.; Kitzes, Justin A. et al. 2008. "Measuring sustainable development Nation by nation". *Ecological Economics* 64 (3): 470–474.
- Muller A. et al. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nat Commun* 8, 1290 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01410-w>
- Myers David C. *Social psychology* (8th ed.). Boston-Toronto: McGee, 2005. 663 p.
- Nechay O., Havrylyuk J. The study of reproductive losses and placental condition in Lviv region // International Conference "Placentologic Monitoring Studies and Ecotoxicologic Aspects of Genetic Diseases". 2000. Cracow. P. L-2.
- Ober E. A., Lemaigre F. P. 2018. Development of the liver: Insights into organ and tissue morphogenesis. *J. Hepatol.* PMID: 29339113 DOI: 10.1016/j.jhep.2018.01.005.
- Odum E. P. 1971. *Fundamentals of ecology*. 2nd Edn., W. B. Saunders Company and Toppan Company, Philadelphia, U.S.A. 575 p.
- Open AI. 2024. ChatGPT. April 2024. URL: <https://chat.openai.com/chat>.
- Orenstein D. 2013. More than language is needed in valuing ecosystem services. *Bioscience* 63, 913–913. doi: 10.1525/bio.2013.63.12.17
- PARIS SMART CITY 2050. 8 PROTOTYPES OF POSITIVE ENERGY TOWERS ECO-CONCEIVED TO FIGHT GLOBAL WARMING. Paris 2014-2015, France. URL: <http://animalworld.com.ua/news/Projekt-Zelenyj-Parizh-2050-The-2050-Paris-Smart-City>.
- Paull J. 2023. The Global Growth and Evolution of Organic Agriculture. In J. N. Bhakta & S. Rana (Eds.), *Research Advancements in Organic Farming* (Ch.1, pp. 1-17). New York: Nova Science Publishers.
- Paz Roca H. M. et al. 2024. Factors influencing the implementation of digitalization in the livestock industry 4.0. *Environment. Technology. Resources*. Vol. 1: 288-294. doi.org/10.17770/etr2024vol1.8006Environment.
- Pereira P. et al. 2018. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*.

- Volume 5, October 2018, Pages 7-13.
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>
- Perfecto I., Vandermeer J. and Wright A. 2009. *Nature's Matrix: Linking Agriculture, Conservation and Food Sovereignty*. London: Routledge.
- Pianka E. R. *Evolutionary Ecology*. Harper & Row, 1978. 397 p.
- Pilla S. P. et al. 2019. Dissecting macromolecular recognition sites in ribosome: implication to its self-assembly. *RNA Biology*. P. 1300-1312.
doi.org/10.1080/15476286.2019.1629767.
- Ploeg R. R. van der, Böhm W. & Kirkham M. B. 1999. On the origin of the theory of mineral nutrition of plants and the law of the minimum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1055–1062.
- Pouvreau D. & Drack M. 2007. On the History of Ludwig von Bertalanffy's General Systemology, and on its Relationship to Cybernetics. *International Journal of General Systems* 36: 281–337.
<https://doi.org/10.1080/03081070601127961>
- Powlson D. S., MacDonald A. J. & Poulton J. P. The Continuing Value of Long-Term Field Experiments: Insights for Achieving Food Security and Environmental Integrity. In: *Soil as World Heritage* edited by David Dent, Springer, 2014.
- Radchenko V. G., Matiashuk R. K., Zhyhalenko O. A., Grusha V. M. 2017. Creation and implementation of electronic database and marking system for identifying and obtaining information on plant species in Botanical Gardens, Dendrological Parks, and Park Monuments of the landscape art. *Science and Innovation*. V. 13, I. 6, P. 51–55. DOI
[10.15407/scine13.06.051](https://doi.org/10.15407/scine13.06.051)
- Radchenko V. H., Pesenko Y. A. *Biology of bees (Hymenoptera, Apoidea)* / Ed. g. with. H. S. Medvedev. St. Petersburg : 1994. 350 p.
- Rajaseger G., Chan K. L., Tan K. Y. Et al. 2023. Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*. 2023;19(9): 925–938. doi:
[10.6026/97320630019925](https://doi.org/10.6026/97320630019925)
- Razanov S. F. Et al. 2020. Intensity of heavy metal accumulation in plants of *Silybum marianum* L. in conditions of field rotation. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 10 (2). P. 131-136. Doi: [10.15421/2020_75](https://doi.org/10.15421/2020_75).
- Ritchie H. (2022). There have been five mass extinctions in Earth's history. Published online at Our World in Data. org. Retrieved from: URL:
<https://ourworldindata.org/mass-extinctions>
- Ross A. D. & Wade J. P. 2015. A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach. *Procedia Computer Science*. 44: 669–678.
- Rousseau D. 2017. Three General Systems Principles and their Derivation: Insights from the Philosophy of Science Applied to Systems Concepts. In *Disciplinary Convergence in Systems Engineering Research*. Chapter 46.

- New York, NY: Springer. URL:
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62217-0_46.
- Roy S. et al. 2020. Celebrating 20 years of genetic discoveries in Legume nodulation and symbiotic nitrogen fixation. *The Plant Cell*, **32**, 15–41.
- Scotese Ch. R., Song H., Mills B. J.W., Meer D. G. van der. 2021. Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years. *Earth-Science Reviews*. V. 215, 2021, 103503
doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103503
- Setten G., Stenseke M. & Moen, J. 2012. Ecosystem services and landscape management: three challenges and one plea. *Int. J. Biodivers. Sci. Ecos. Serv. Manage.* 8, 305–312. doi: 10.1080/21513732.2012.722127
- Simin T. M., Rodić V., Glavaš-Trbić D., 2019. Organic agriculture as an indicator of sustainable agricultural development: Serbia in focus, *Economics of Agriculture* 66(1): 265-281, DOI: 10.5937/ekoPolj190126T
- Shmalgauzen I. I. *Cybernetic issues of biology / Under the general editorship of R. L. Berg, A. A. Lyapunov*. Novosibirsk: Nauka, 1968. 223 p.
- Shmalgauzen I. I. *Problems of Darwinism*. Nauka, 1969. 493 p.
- Sprengel C. 1828. Von den Substanzen der Ackerkrume und des Untergrundes (About the substances in the mold and the subsoil). *J. Tech. Ökonom. Chem.* 2, 423–474; and 3, 42–99, 313–352, and 397–421.
- Sprengel, C. 1826. Ueber Pflanzenhumus, Humussäure und humussaure Salze (About plant humus, humic acids, and salts of humic acid). *Arch. Gesamte Naturl.* 8, 145–220.
- Sturgen B. *Crundlagen der allgemeinen Ökologie*. VEB Gustav Fischer Verl. Jena, 1974.
- Surmin Yu. P. 2003. *Systems Theory and Systems Analysis*. Kiev: MAUP.
- Tanaka G. There is something extraordinary happening in the world. Oct 13, 2015. URL: <https://medium.com/the-global-future-of-work/there-is-something-extraordinary-happening>
- Terentieva A. V. 2018. System analysis as a method of decision making. *Public management*. № 5(15). P. 246-255. DOI: 10.32689/2414-0562-2018-15-5-246-255
- Teuwen J, Moriakov N. 2020. Convolutional neural networks. In: *Handbook of medical image computing and computer assisted intervention*. London, United Kingdom: Elsevier; 2020. p. 481–501.
- The Economics of the Food System Transformation (FSEC). Global Policy Report. By Laderchi R., Lotze-Campen C., DeClerck H. et al. Food System Economics Commission. 2024. 117 p.
- Tomaš-Simin M. et al. Institutional Development of Organic Farming in the EU. *Problemy Ekorozwoju*. 2023. 18(1):120-128. DOI: 10.35784/pe.2023.1.12.

- Tomonaga M. Fat face illusion, or jastrow illusion with faces, in humans but not in chimpanzees // i-Perception. 2015. 6(6). P. 1-5. URL: <http://langint.pri.kyoto-u.ac.jp/langint/> URL: <https://orgprints.org/id/eprint/45507/1/Paull2023.Ch1.BookOrganicFarmin g.pdf>
- Vandermeer J. & Perfecto I. 2017. Ecological Complexity and Agroecology. London: Routledge. doi: 10.4324/9781315313696
- Vandermeer J. et al. 2019. The community ecology of herbivore reulation in an agroecosystem: lessons from complex systems. BioScience 69:974996. doi: 10.1093/biosci/biz127
- Varela S., Zheng X., Njuguna J. et al. 2025. Breaking the barrier of human-annotated training data for machine learning-aided plant research using aerial imagery. Plant Physiology, V. 197, I. 4, 2025. P. 1-14. doi.org/10.1093/plphys/kiaf132
- Ventura J. et al. 2024. Models of Chemical Communication for Micro / Nanoparticles Acc. Chem. Res. 2024. 57. 815–830. https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00619open_
- Vukicevich E., Lowery T., Bowen P., Úrbez-Torres J. R. & Hart M. 2016. Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 48.
- Waddington C. H. 1968. The Basic Ideas of Biology. Biological Theory. 3 (3):238-253. DOI; 10.1162/biot.2008.3.3.238.
- Wallace P. 2015. Introduction to information systems. Boston, MA: Pearson. 43 p.
- White F., Stallones L. & Last J. M. 2013. Global public health: Ecological Foundations. Oxford University Press.
- Whiteman D., Murphy M., Hey K. at al. Reproductive factors, subfertility, and risk of neural tube defects: A Case-Control Study Based on the Oxford Record Linkage Study Register // Am. J. of Epidemiology. 2000. V. 152., № 7. P. 823–828.
- Whitney N. E. & Rolfes Sh. R. 2012. Understanding Nutrition (edit. 13th). Cengage Learning. C. 82–83.
- Wiener N. Home computers cybernetics or control and communication in the animal and the machine. Reissue of the 1961 second edition. Foreword by Doug Hill and Sanjoy Mitter. 1961. 344 p.
- Woodward G., and Bohan D. 2013. Ecological Networks in an Agricultural World. London: Academic Press.
- Yahiaoui et al., 2012. Leaf shape descriptor for tree species identification. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Multimedia and Expo.Pp. 254-259. doi.org/10.1109/ICME.2012.13.

ЛІТЕРАТУРА

- Zadrozna M., Zamorska L., Nechay O. & Niwelinski J. Compensatory morphochemical modifications developed in human placentae in the Carpathian mountains affected by xenobiotics // Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. 1998. V. 52, Supplement. P.175–180.
- Zadrozna M., Zamorska L., Nechay O., Zolnierrek M. & Niwelinski J. Noxious effect of progressing environmental pollution in southern poland on the human placenta and foetus // International Conference "Anthropogenic Changes of the Content of Elements in the Environment and Human Food Chain". 1997. Cracow. P.80–83.
- Zhang W., Ricketts T. H., Kremen C., Carney K., and Swinton S. M. 2007. Ecosystem services and disservices to agriculture. *Ecol. Econ.* 64, 253–260. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.02.024
- Zhang Y., Holzapfel C. & Yuan, X. 2013. "Scale dependent ecosystem service," in *Ecosystem Services in Agricultural and Urban Landscapes*, eds S. Wratten, H. Sandhu, R. Cullen, and R. Costanza (Oxford: Wiley-Blackwell), 107–121.
- Zimmer C. 2011. The wired atlas of the human ecosystem (2011). URL: https://www.wired.com/2011/09/mf_microbiome/

Наукове видання

Монографія

ГНАТІВ Петро Степанович, СТАСІВ Олег Федорович

Системний аналіз та агроєкосистеми

<https://doi.org/10.32636/9786178433079/2>

ISBN 978-617-8433-07-9



Формат 30x42/4. Тираж 300 пр. Ум. друк. арк. 24,2

Видавець та виготовлювач:

Інститут сільського господарства Карпатського регіону

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів

видавничої продукції

ДК № 7457 від 28.09.2021 р



<https://isgkr.com.ua/>