

С. Д. Рудишин

# БІОГЕОХІМІЯ З ОСНОВАМИ ЕКОЛОГІЇ

Навчальний посібник

Дніпро  
«Середняк Т. К.»  
2023

УДК 574 (075.8)+504: 550.47

Р 83

Рекомендовано до друку вченою радою  
Глухівського національного педагогічного університету  
імені Олександра Довженка  
(протокол № 13 від 26.04.2023 року).

**Рецензенти:**

**В. М. Боголюбов** – завідувач кафедри загальної екології, радіо-біології та безпеки життєдіяльності Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор педагогічних наук, кандидат технічних наук, професор;

**С. В. Міщенко** – головний науковий співробітник Інституту луб'яних культур НААН, доктор сільськогосподарських наук;

**В. Г. Петрук** – завідувач кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, директор науково-дослідного інституту екологічного проектування та природоохоронних технологій Вінницького національного технічного університету, доктор технічних наук, професор.

**Р 83 Рудишин С. Д.**

**Біогеохімія з основами екології** / С.Д. Рудишин. – Дніпро: Середняк Т. К., 2023. – 320 с.

Перехід суспільства ХХІ ст. до збалансованого розвитку потребує наукового забезпечення з позицій екології, яка методологічно обґрунтовує доцільність об'єднання зусиль двох чинників: природовідповідної поведінки людини (екологізація економіки, виробництва, освіти); збереження біологічного та ландшафтного різноманіття. У пропонованому навчальному посібнику розглянуто теоретичні і прикладні аспекти екології та біогеохімії; основні екологічні закони, принципи, теорії і категорії в біогеохімічному дискурсі; хімічний склад живих організмів, участь живої речовини і продуктів її розкладу в процесах міграції, розподілу, розсіювання та накопичення хімічних елементів у біосфері; біогеохімічні колообіги біогенних елементів; закономірності міграції радіонуклідів та пестицидів; принципи біогеохімічного районування ландшафтів, причини деградаційних процесів екосистем України, особливості біогеохімічних процесів в умовах техногенезу; методологію подолання екологічної кризи.

Для студентів вищих навчальних закладів. Прислужиться всім, хто цікавиться питаннями екології та біогеохімії.

ISBN 978-917-8245-38-2

УДК 574 (075.8)+504: 550.47

© Рудишин С. Д., 2023

# ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА .....</b>	<b>7</b>
<b>1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СУЧАСНОЇ ЕКОЛОГІЇ: БІОГЕОХІМІЧНИЙ ДИСКУРС .....</b>	<b>8</b>
1.1. Сучасна екологія: предмет, методи, завдання, структура .....	8
Основні напрями сучасної екології.....	12
1.2. Біогеохімія як наука.....	23
В. І. Вернадський – фундатор біогеохімії .....	23
Сутність, предмет і завдання біогеохімії.....	26
1.3. Особливості методології біогеохімії.....	29
1.4. Основні екологічні закони, правила, теорії в біогеохімічному дискурсі.....	36
<b>2. БІОСФЕРА: ПОХОДЖЕННЯ, РОЗВИТОК, ОРГАНІЗАЦІЯ, СТАБІЛЬНІСТЬ. ГЕОХІМІЧНА РОБОТА ЖИВОЇ РЕЧОВИНИ .....</b>	<b>48</b>
2.1. Походження і розвиток біосфери.....	48
Походження людини та її роль в біосфері.....	61
2.2. Будова, склад та межі біосфери.....	65
2.3. Жива речовина. Геохімічна робота живої речовини .....	68
2.4. Біогеохімічні процеси в біосфері з позицій термодинаміки і синергетики. Стабільність біосфери.....	78
<b>3. ХІМІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ В БІОСФЕРІ: ПОШИРЕНІСТЬ, СИСТЕМАТИКА, ЗАКОНОМІРНОСТІ НАКОПИЧЕННЯ.....</b>	<b>91</b>
3.1. Кларки хімічних елементів. Органогени живої речовини.....	91
3.2. Особливості Карбону як елемента життя .....	96

3.3. Геохімічна класифікація хімічних елементів.....	101
3.4. Закономірності поширення і накопичення хімічних елементів живою речовиною.....	108
Геохімічні бар'єри .....	115

#### **4. БІОГЕННА МІГРАЦІЯ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І РЕЧОВИН.....**

4.1. Роль біогенної міграції у колообігу хімічних елементів.....	121
4.2 Великий (геологічний) і малий (біологічний) колообіги.....	126
4.3. Біогеохімічний колообіг.....	129
4.4. Біогеохімічний колообіг органогенів.....	134
Біогеохімічний колообіг Карбону (C).....	134
Біогеохімічний колообіг Нітрогену (N).....	137
Біогеохімічний колообіг Оксигену (O).....	142
Колообіги Гідрогену (H) і води (H <sub>2</sub> O).....	148
4.5. Особливості біогеохімічних циклів деяких макро- і мікроелементів.....	157
Біогеохімічний цикл Сульфуру (S) .....	157
Біогеохімічний цикл Фосфору (P) .....	163
Біогеохімічні цикли Натрію (Na) і Калію (K) .....	166
Біогеохімічний цикл Кальцію (Ca) .....	168
Біогеохімічний цикл Магнію (Mg) .....	171
Біогеохімічні цикли Алюмінію (Al), Феруму (Fe), Мангану (Mn).....	173
Біогеохімічний цикл Купруму (Cu).....	179
Біогеохімічний цикл Цинку (Zn).....	182
Біогеохімічний цикл Йоду (I) .....	185
Біогеохімічний цикл Силіцію (Si).....	188

4.6. Закономірності біогеохімічної міграції радіонуклідів Стронцію (Sr) і Цезію (Cs).....	193
4.7. Особливості біогенної міграції пестицидів .....	198

**5. ТЕХНОГЕННА МІГРАЦІЯ АТОМІВ І РЕЧОВИН.  
БІОГЕОХІМІЧНЕ РАЙОНУВАННЯ ЛАНДШАФТІВ.  
БІОГЕОХІМІЧНІ ЕНДЕМІЇ.....**

5.1. Загальні особливості техногенної міграції. Техногенні геохімічні аномалії.....	203
Біогеохімічна оцінювання техногенних аномалій.....	208
5.2. Техногенні системи: еколого-геохімічний аналіз.....	209
5.3. Особливості біогеохімічного районування ландшафтів, біогеохімічні провінції та ендемії .....	222
Принципи біогеохімічного районування ландшафтів .....	226
Біогеохімічні ендемії.....	232
Важкі метали як екотоксиканти .....	234
5.4. Біоіндикація .....	244

**6. МЕТОДОЛОГІЯ ПОДОЛАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ КРИЗИ .....**

6.1. Екологічна криза як загроза людству.....	251
6.2. Основні причини деградаційних процесів екосистем України.....	253
6.3. Керована коеволюція як стратегія подолання глобальної екологічної кризи .....	254
6.4. Екомережа як оптимальна соціально-природна система.....	259
Принцип планування природних і культурних ландшафтів з дотриманням співвідношення «золотої пропорції» .....	263
6.5. Ідея ноосфери: від зародження концепції до стратегії сталого (збалансованого) розвитку .....	266

Ноосфера: генеза, концептуальні положення ідеї .....	266
Сталий розвиток (sustainable developmet): стратегія, цілі .....	274
Роль і місце знань з екологі та біогеохімії в реалізації стратегії сталого розвитку .....	278
<b>ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ</b> .....	282
<b>ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК</b> .....	293
<b>ЛІТЕРАТУРА</b> .....	306

# ПЕРЕДМОВА

*Екологічні проблеми – проблема людства, не біосфери  
Людина – розумна (Homo sapiens), Природа – мудра, знає краще  
Біосфера – наш дім, хазяїн-годувальник, ми – розумні консументи  
Обираємо стратегію коеволюції людства і біосфери на засадах  
сталого розвитку*

На сьогодні потребують розв'язання дві найголовніші науково-політичні проблеми людства – продовольство (їжа) і екологічна безпека. Усі інші – соціальні, економічні, енергетичні, демографічні, проблеми сучасних технологій – безпосередньо або опосередковано пов'язані з ними. Звідси, екологічна проблематика набуває особливого сенсу не тільки в таких галузях знань як природничі науки, охорона здоров'я, агрономічні науки, але й у гуманітарні, соціальні, поведінкові.

Створення навчального посібника «Біогеохімія з основами екології» викликано соціальним замовленням до вчених, політиків, освітян – зберегти екологічні умови існування людства. Це можливо зробити шляхом об'єднання зусиль двох чинників: 1) природовідповідної поведінки людини (екологізації економіки і виробництва), 2) збереження біологічного та ландшафтного різноманіття. Знання екології та біогеохімії тут стануть в нагоді, адже функціонування екосистем, виробництво та розподіл продуктів харчування, кисню забезпечує геохімічна робота різноманіття живої речовини біосфери.

Мета посібника – формування у здобувачів вищої освіти, читачів екологічного мислення на засадах розуміння єдності і взаємозалежності живого і неживого на планеті. Цьому сприяє вивчення та обговорення таких питань: теорія і методологія екології; геохімічна робота живої речовини; біогенна та техногенна міграція хімічних елементів, речовин (води, пестицидів, радіонуклідів); біогеохімічна оцінка техногенних аномалій; біоіндикація довкілля; коеволюційна стратегія існування людства і біосфери на засадах сталого розвитку та ін. Наукова і педагогічна цінність таких знань полягає в тому, що вони можуть ефективно використовуватися викладачами різних дисциплін для якісної екологічної підготовки студентів у ЗВО України.

# 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СУЧАСНОЇ ЕКОЛОГІЇ: БІОГЕОХІМІЧНИЙ ДИСКУРС

## 1.1. Сучасна екологія: предмет, методи, завдання, структура

Формування екології як науки почалося на зламі XIX–XX ст. і триває досі. Сьогодні існує безліч напрямків досліджень в царині екології, які намагаються класифікувати цю науку за принципами галузевої належності, взаємозв'язків, теоретичного та практичного значення. Тільки тлумачень поняття «екологія» декілька десятків варіантів; воно продовжує набувати розмитості і не завжди можна зрозуміти, про що власне йдеться: 1) екологію як біологію екосистем, 2) забруднення довкілля й охорону навколишнього середовища, 3) охорону здоров'я (гігієну), 4) менеджмент в сфері природокористування, 5) екологічну освіту, 6) суспільно-політичний рух. З'явилася і «прижилася» лінгвістична екологія у вигляді таких маргінальних понять (терміноодиниць) як екологія душі, екологічна справедливість, екологічне страхування, екологічна етика, екофемінізм, екологічний туризм, екосистема мови, екосистема дитинства, екосистема творчої діяльності, екосистема програмного забезпечення, електронна екосистема управління освітніми процесами, гендерний вимір екологічної комунікації, екосистема творчої діяльності та ін.

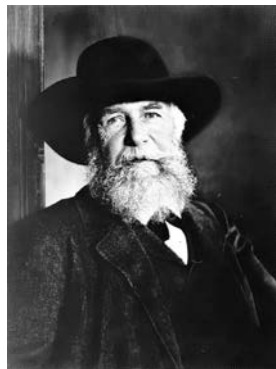
Наслідком такої ситуації є небезпека стирання меж між науковим і метафоричним змістом поняття «екологія», розмивання меж проблемних полів, які описуються за його допомогою. Зокрема, звертаємо увагу на потенційні негативні ризики адаптації біоморфних метафор у мовну політику, оскільки об'єктивізація, перерахування та біологізація поняття «екосистема мови» робить такі метафори природними об'єктами, а не культурними артефактами. Що ж стосується використання екологічних підходів до вивчення взаємовідносин між структурними компонентами неживих / технічних систем, то для цього існують методи системного, структурного та функціонального аналізу. Збереження первинного науково-природ-



ничого змісту понять «екологія», «екосистема» є необхідним, оскільки розв'язання екологічних проблем потребує визначення й інтенсифікації тих напрямів досліджень, де можна віднайти шляхи природовідповідного існування людства (С. Рудишин, 2022, 2023).

Отже, зростання «термінологічної ентропії» примушує біологів і екологів виробити відповідну чітку категоріально-методологічну основу сучасної екології (як науки) і дотримуватися її.

Назву «екологія» вперше використав німецький біолог **Ернест Геккель** у 1866 р. у праці «Загальна морфологія організмів». У дослівному перекладі (грец. «ойкос» – дім, оселя; «логос» – наука), тобто, екологія – це наука про «дім», де кожен перебуває в постійному контакті з усіма, хто мешкає поруч, так й атмосферою, гідросферою і літосферою та іншими чинниками навколишнього середовища. Отже, екологія спочатку сформувалась виключно як біологічна наука.



Ернест Геккель  
(1834 – 1919) рр.

Сучасна екологія – міждисциплінарна наука, яка спирається на різні області знань: біології, хімії, географії, геології, фізики, соціології, природоохоронної діяльності, економіки, психології, різних технологій, теорії культури, але зберігає своє біоцентричне ядро. В екології домінує біологічний тип пізнання, екологічна проблематика не існує без врахування взаємозв'язків «живої речовини» В. Вернадського (біорізноманіття) з довкіллям, мета усіх міждисциплінарних напрямів екології – зберегти умови комфортного існування людини як біологічного виду.



**Екологія** – біоцентрична міждисциплінарна наука, вивчає сукупність живих організмів, які взаємодіють один з одним і утворюють з навколишнім природним середовищем єдність – екосистему, у межах якої відбувається біотичний колообіг речовини, перетворення енергії та інформації.

Отже, некоректно з наукової точки зору говорити про «погану» чи «добру» екологію, а доцільно вказувати на сприятливе чи несприятливе для людини або інших живих організмів навколишнє середовище / екологічну ситуацію.

Поняття «*навколишнє середовище*» входить в науковий і прикладний вжиток в джерелах літератури різного спрямування. В екологічному дискурсі, зазвичай, мають на увазі природу – природну матеріальну систему, що включає об'єкти, які не створені людиною, а є лише об'єктом людської діяльності. Це сонячне світло, земне тяжіння, енергія надр Землі, ґрунт, вода, повітря, біорізноманіття біосфери та інші матеріальні фактори. Науково коректно окреслювати це поняття повно – «навколишнє природне середовище» – природний компонент середовища, який складає сукупний простір нашої планети Земля з її різноманітними оболонками: атмосфера, гідросфера, літосфера, біосфера.

**Навколишнє природне середовище**, або **довкілля** – уся сукупність абіотичних і біотичних факторів (всі живі та неживі об'єкти), що природно існують на Землі або в деякій її частині. Воно оточує людину, підтримує її існування, створює умови для діяльності і суспільних відносин, безпосередньо впливає на її життя і здоров'я.

**Об'єкти дослідження екології** – організми, популяції, біоценози, екосистеми та біосфера у своїх зв'язках з навколишнім природним середовищем.

**Предметом екології** є різноманітність і структура зв'язків між біосистемами та середовищем їхнього існування, закономірності розвитку та функціонування надорганізованих біосистем.

**Головне завдання сучасної екології** – розкрити закономірності розвитку та функціонування надорганізованих біосистем і навчитися управляти ними. У рамках головного завдання *вивчити*:

- закони та закономірності взаємодії організмів і надорганізмених біологічних систем між собою та з навколишнім середовищем;
- особливості структури, функціонування, формування, розвитку, стійкості, динаміки популяцій, біоценозів та екосистем;
- продукційні, енергетичні та регуляторні функції популяцій, екосистем і біосфери; сутність механізмів їхньої адаптації до біотичних, абіотичних і антропогенних факторів навколишнього середовища.

Конкретні екологічні завдання:

- оцінка та аналіз глобальних, регіональних і локальних екологічних проблем;
- розробка способів і методів управління екосистемними та біосферними процесами.

Результати екологічних досліджень мають практичне значення для розробки шляхів переходу суспільства до сталого (збалансованого) розвитку.

**Основні методи екології.** Як будь-яка наука, екологія використовує певні методи отримання й аналізу наукових знань, а саме: спостереження, експеримент, вимірювання, біоіндикація (див. підрозділ 5.4), моделювання, аналіз, синтез, статистичний аналіз, спеціальні (аерокосмічні, картографічні) та ін. Зокрема:

– *методи реєстрації параметрів і оцінки стану навколишнього середовища* – метеорологічні спостереження, вимірювання вологості, температури, освітленості, хімічного складу повітря, води та ґрунту, оцінка техногенного забруднення навколишнього середовища, рослинних і тваринних організмів, реєстрація показників прозорості та солоності води, фізико-хімічних показників ґрунтів, вимірювання радіаційного фону, напруженості;

– *польові спостереження* – дозволяють отримати конкретні відомості про стан окремих видів і популяцій, ролі в існуванні певної екосистеми; залежність від діяльності певних груп організмів, антропогенного впливу; дані про зміну чисельності популяцій;

– *експерименти в природних умовах* – дозволяють моделювати ту чи іншу ситуацію, наслідки її розвитку для конкретної спільноти організмів, біоценозу або біогеоценозу;

– *математичне моделювання* – дозволяє зробити кількісну оцінку досліджуваних процесів і явищ. Воно дає можливість з великою часткою вірогідності, використовуючи накопичені дані, прогнозувати можливий розвиток тих чи інших процесів і ситуацій в екологічних системах.

## Основні напрями сучасної екології

Сучасна екологія системно охоплює дослідження як біології екосистем, так й соціально-економічних потреб людства, антропогенного забруднення довкілля. Це дозволяє виокремити *два напрями екології*, які взаємопов'язані структурно і функціонально: 1) класична / теоретична екологія (біоекологія); 2) прикладна екологія (охорона навколишнього середовища і збалансоване природокористування; сооекологія).

Теоретична екологія розкриває загальні закономірності організації життя в екосистемах, прикладна – вивчає механізми руйнування біосфери людиною, способи запобігання цьому процесу і розробляє принципи збалансованого використання природних ресурсів. Наукову основу прикладної екології становить система загальних екологічних законів, правил і принципів.



**КЛАСИЧНА ЕКОЛОГІЯ (біоекологія)** – досліджує фундаментальні проблеми організації, функціонування і взаємодії біологічних систем різного рівня ускладнення (організмів, популяцій, біоценозів, екосистем, біосфери).

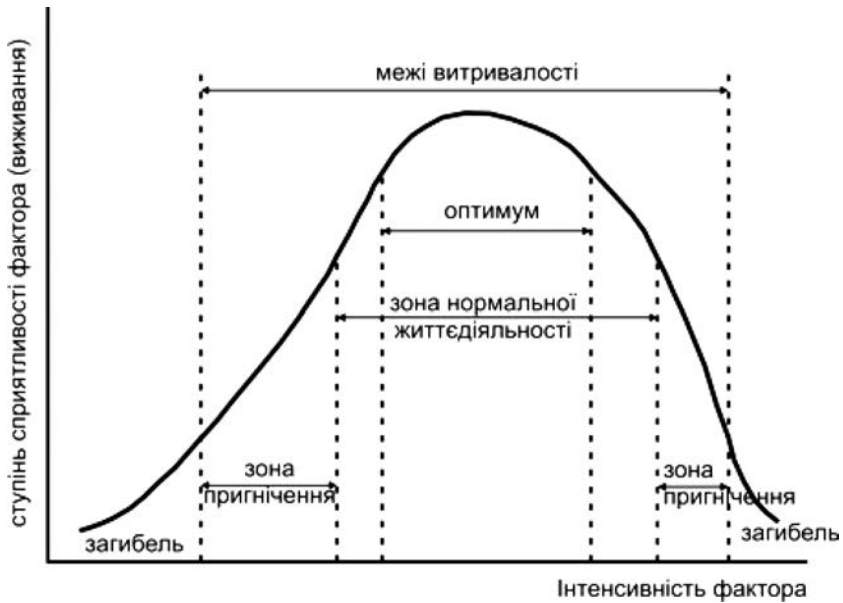
Розділи теоретичної екології (біоекології):

- **Аутекологія** (грец. *αυτός* – сам, один) – розділ теоретичної екології, що вивчає взаємовідносини організмів одного виду (рослини, тварини, гриби, мікроорганізми). Завдання аутекології – виявлення фізіологічних, морфологічних і інших пристосувань (адаптацій) видів до різних екологічних факторів. Під адаптаціями слід розуміти будь-які зміни структури та функцій організмів, які підвищують їхні шанси на виживання.

**Екологічні фактори** – чинники середовища, що впливають на організм (прямо або опосередковано). Класифікація: 1. Абіотичні – фактори неживої природи: енергія Сонця; освітленість; температура; вологість; газовий склад атмосфери; тиск; склад ґрунту; рельєф, нахил схилу; гідрологічний фон та ін. 2. Біотичні (форми впливу живих істот одна на одну: симбіоз, хижацтво, паразитизм). 3. Антропогенні (викликані діяльністю людини).

Закон аутекології – *закон оптимуму (закон толерантності Шелфорда)* – будь-який живий організм має верхню й нижню межі витривалості (толерантності) до будь-якого екологічного фактора. Інтервал сприятливої сили впливу фактору, що забезпечує найкращі / оптимальні умови життєдіяльності особин, називають *зоною оптимуму* екологічного фактора (мал. 1).

Біля кордонів толерантності розташовані зони пригнічення, де види найуразливіші до дії несприятливих екологічних чинників, включаючи і вплив людини. Межі витривалості між критичними точками називають екологічною валентністю живих істот відносно конкретного чинника середовища. За екологічною валентністю організми поділяють на еврибіонти та стенобіонти. *Еврибіонти* – організми з широкими пристосувальними можливостями; витримують широкі коливання факторів довкілля (таргани, горобець, кімнатна муха, сірий пацюк, бурий ведмідь, вовк, північний олень). *Стенобіонти* – можуть існувати у вузьких сталих умовах (орхідеї,



**Мал.1.** Якщо на графіку по вертикалі відкласти ступінь виживання особини (її фізіологічну активність – швидкість росту, розмноження тощо), а по горизонталі інтенсивність дії екологічного чинника (температура, вологість, освітленість, солоність та ін.), то існує зона оптимуму – інтервал сприятливих (оптимальних) значень цього чинника.

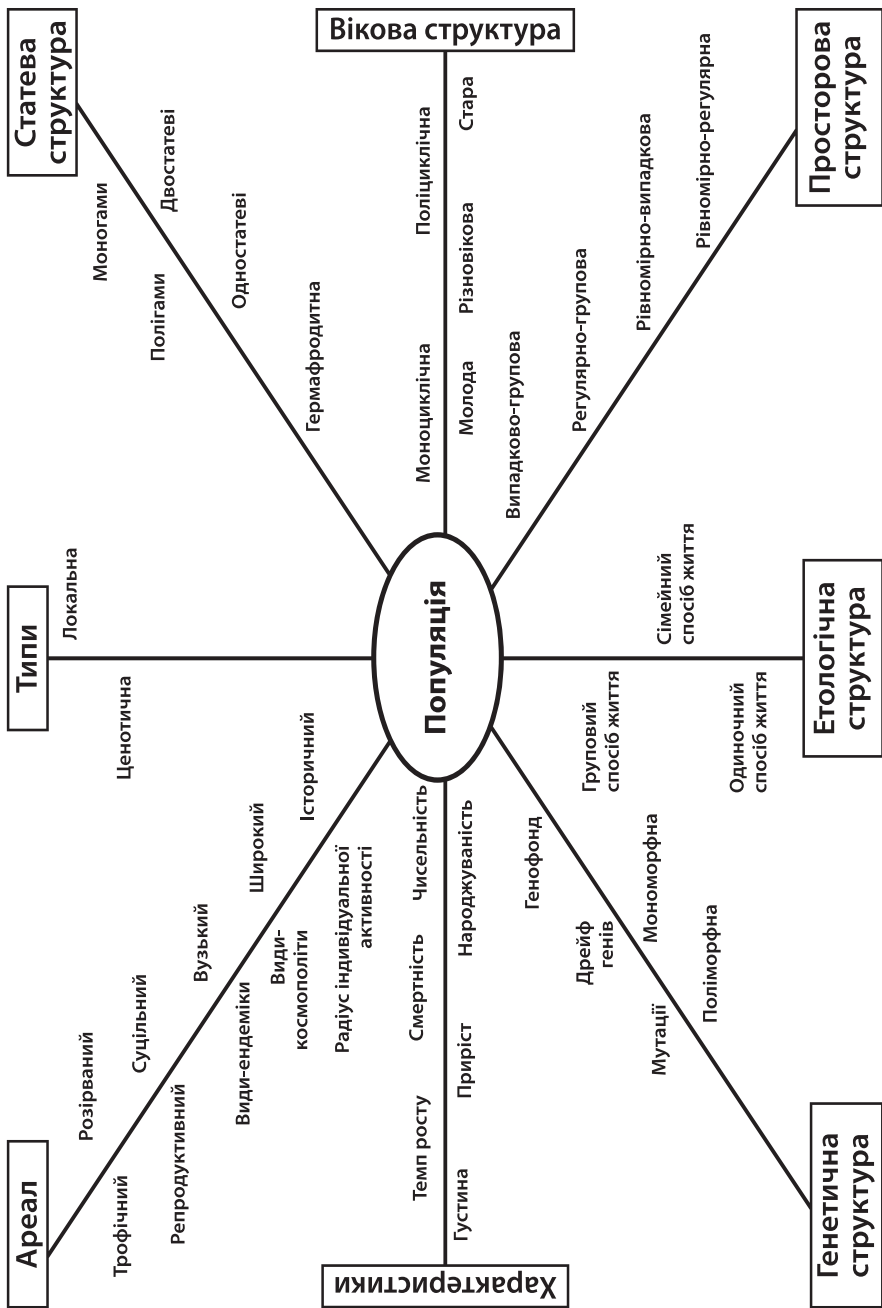
глибоководні риби, форель). Стенобіонти є кращими біоіндикаторами стану довкілля, ніж еврібіонти.

- **Демекологія** – екологія популяцій.

**Популяція** – це група особин одного виду, які населяють певний ареал (певну територію / акваторію) протягом життя багатьох поколінь, відокремлені від інших подібних угруповань, вільно схрещуються і дають плодюче потомство. Вид складається з популяцій. Популяція – елементарна одиниця еволюції

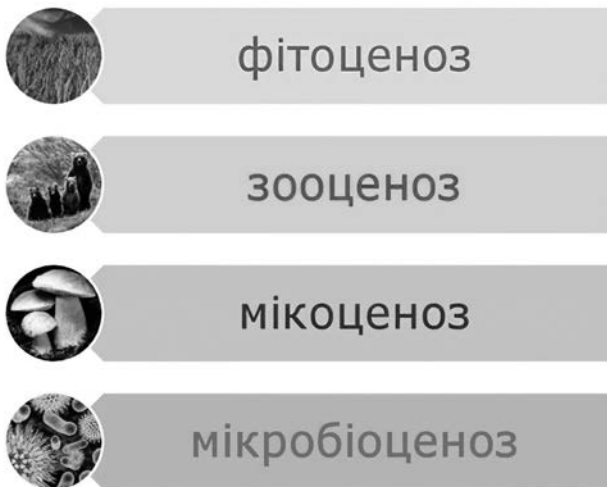
- **Синекологія** – екологія угруповань, біоценологія.

**Біоценоз** – біологічна система у вигляді сукупності популяцій різних видів рослин, грибів, тварин та мікроорганізмів, які населяють певний біотоп.



Мал. 2. Характеристика популяції за різними показниками.

## СКЛАДОВІ ЧАСТИНИ БІОЦЕНОЗУ



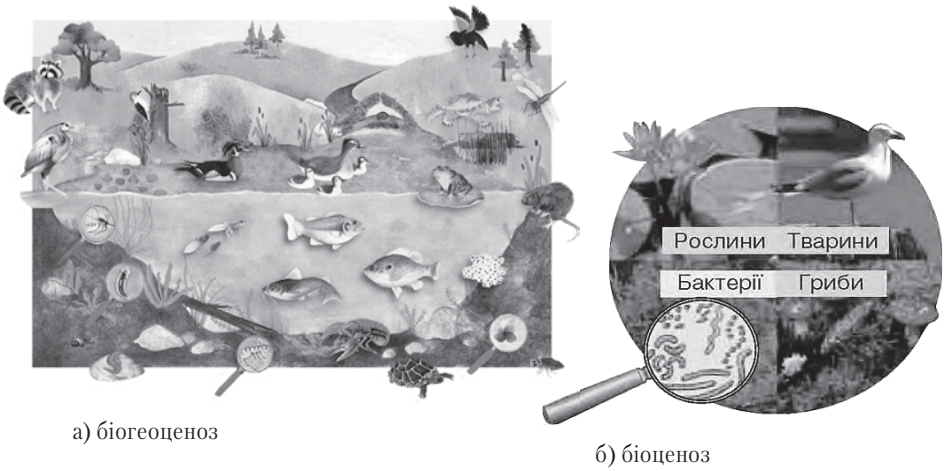
Мал. 3. Біоценоз: складові.

Взаємозв'язки організмів у біоценозі різноманітні. За класифікацією В. Беклемішева виділяють такі *форми біотичних зв'язків*: трофічні, топічні, форичні, фабричні. Крім того, екологи виокремлюють *форми біотичних взаємовідносин*: конкуренція, нейтралізм, симбіоз, хижацтво, паразитизм.

• **Біогеоценологія** – екологія сукупності угруповань біоценозу (рослин, грибів, тварин, мікроорганізмів) і біотопу (певної ділянки земної поверхні), які разом пов'язані обміном речовини, енергії і інформації). Біогеоценоз (екосистема) – це сукупність біоценозу і біотопу.

**Екосистема (біогеоценоз)** – головна функціональна одиниця в екології; єдиний природний комплекс, утворений сукупністю живих організмів (біоценозом) і місцем їхнього існування (біотопом, неживою частиною), в межах якого здійснюється колообіг речовин, перетворення потоку енергії та передача інформації.





а) біогеоценоз

б) біоценоз

**Мал. 4.** Природна екосистема: а – біогеоценоз як сукупність угруповань біоценозів (б) різних організмів (рослин, грибів, тварин і мікроорганізмів) на певній ділянці земної поверхні (біотопі).

Біотична складова екосистема представлена окремими біосистемами: продуцентами – утворювачами органічної речовини шляхом фотосинтезу (рослини) і хемосинтезу (бактерій), консументами – споживачами живої органічної речовини (тварини, люди), редуцентами – бактеріями і грибами, які розкладають і мінералізують мертві рештки. Абіотична складова екосистеми (біотоп) – це мікроклімат, освітленість, водний режим, ґрунтовий покрив, тиск, висота над рівнем моря тощо.

Кожний біогеоценоз характеризується біомасою та продуктивністю, має свою просторову й видову структури, певну сукупність ланцюгів живлення, які пов'язуються потоками речовини й енергії, визначають його інформативність.

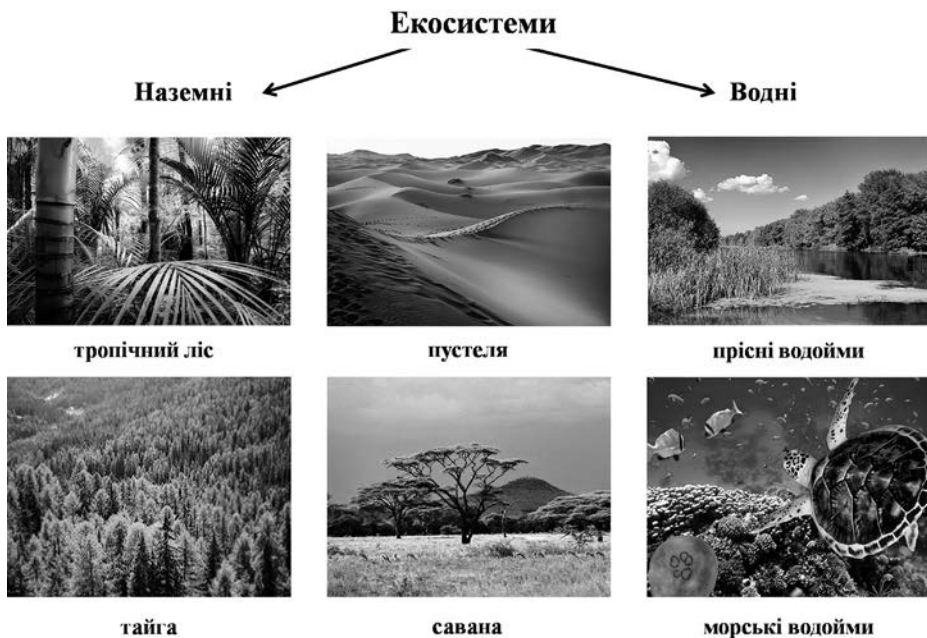
Сукупність біогеоценозів із відносно схожими характеристиками (передусім – рослинністю), які займають значну територію й розвиваються в схожих кліматичних умовах, називають біомами.

• **Екологія біомів.** Поняття «біом» увів Ф. Клементс (1916) для позначення великої сукупності біоценозів певної територіальної одиниці (зони, області, регіону). Сучасне розуміння біому:

**Біом** – макроекосистема, яка за територіальними межами відповідає фізико-географічній зоні з певною інтенсивністю надходження сонячної радіації, випадом опадів та макрокліматом, характеризується схожим типом рослинності (деревним, чагарниковим, трав'яним); великий за розмірами тип біогеоценозів у певному регіоні планети, який характеризується схожим кліматом і характером рослинності.

Типи біомів: *наземні* – тундра, тайга, листопадний ліс, степ, савана, пустеля, вічнозелений тропічний ліс (джунглі); *водні* – прісноводні (озера, річки, водосховища) і морські; проміжне положення займають болота – надмірно зволожена ділянка суші з застійним водним режимом, на якій відбувається нагромадження рослинних решток, що не розклалися (мал. 5).

Біомі мають певну цілісність. Між зонами листопадних лісів і степів розташована лісостепова зона, де трапляються біомі лісу та степу. Горизонтальні межі біомних екосистем найдоречніше визначати за межами фізико-географічних зон; верхню їх межу слід «підняти» до рівня верхньої



Мал. 5. Біомні екосистеми.

## Карта природних зон України



Мал. 6. Рівнинна частина України належить до трьох біомних екосистем: мішаних лісів, лісостепової та степової.

межі тропосфери, у якій відбувається формування гідротермічного режиму екосистем, а нижньою межею охопити найглибші горизонти залягання підземних вод.

Відповідно до цього, рівнинна частина України належить до трьох біомних екосистем: мішаних лісів, лісостепової та степової (мал. 6).

• **Біосферологія** – екологія біосфери – оболонки життя нашої планети (див. розділ 2).

**Біосфера** – сфера поширення життя на Землі, склад, структура та енергетико-інформаційні параметри якої визначаються минулою і сучасною діяльністю живих організмів; охоплює населену організмами верхню частину літосфери, гідросферу і нижню частину атмосфери (тропосферу).

**ПРАКТИЧНА ЕКОЛОГІЯ (охорона навколишнього середовища і збалансоване природокористування, соціоекологія)** – науковий напрям, який органічно поєднаний з теоретичною екологією, але не є останньою, оскільки має власну понятійно-категоріальну базу, предметне поле та коло закономірностей. Прикладом наслідків розуміння різних підходів можуть бути вирази типу «екологічно чисті продукти», «екологічно чистий двигун», «екологічно чисте виробництво», «безвідходне виробництво», «екологічні класи, де навчаються діти», які з позицій біоекології є некоректними (дивись визначення екології). Відчувається недостатність змістової і функціональної ознак «біологічної ментальності» сучасних техно- і соціоекологів різного рівня. Заважає і спрямованість на єдине правило розв’язання екологічної проблематики та невиправданий псевдооптимізм.

*Охорона навколишнього середовища і збалансоване природокористування* – розділ прикладної екології, що вміщує геоекологію, техноекоекологію, урбоекологію, агроекоекологію, ландшафтну екологію, які з’ясовують різні аспекти дії людини на довкілля і спрямовані на розв’язання головним чином практичних питань. Цей напрям обумовлений тим, що людина – єдина істота на Землі, яка знищує і забруднює природні екосистеми – залишає після себе сміття (його в природі не існує), вирубує ліси, осушує болота, добуває нафту і газ, будує гідроелектростанції, висаджує на величезних площах рослини, які потрібні людині та ін. Отже, назва «прикладна екологія» науково коректна, оскільки переймається проблемами переробки та утилізації відходів, розробки і впровадження технологій водоочищення та відновлювальних джерел енергії (сонця, вітру, хвиль), раціонального використання природних ресурсів, нітратів і пестицидів в сільському господарстві, радіаційного забруднення та ін.

Включення *соціальної екології* до напрямку практична екологія пов’язане з тим, що людина поєднує в собі три сутності: а) біологічну (тіло ссавця); наш найближчий генетичний родич – шимпанзе бонобо (мал. 7); б) соціальну – людина є громадянином, студентом, вчителем, сусідом тощо; в) духовну (культурну) – людині притаманне розуміння власної гідності, добра і зла, совісті, сорому тощо. Підкреслимо, що суспільний розвиток – це наслідок соціальної, а не біологічної еволюції.

*На відміну від тварин людина:* 1) не адаптується до природи, а відокремлюється від неї за рахунок вогню, енергії корисних копалин, відновлювальних джерел, атомної енергетики, знарядь праці, зброї, одягу, синтезу нових речовин, добування корисних копалин та ін.; 2) з усіх живих істот тільки людина знищує власне середовище існування,



**Мал. 7.** Шимпанзе бонобо (*Pan paniscus*) – наш найближчий генетичний родич.

власну екологічну нішу; залишає після себе хімічне, фізичне «сміття», що забруднює довкілля (у природі все поглинається і трансформується в трофічних ланцюгах). Залишається відкритим питання: Якщо людина є частиною природи, то чому частина знищує ціле?; 3) психічна діяльність людини, яка здійснюється у теперішньому часі, визначається образом майбутнього, екстраполює цю поведінку у майбутнє. Жодна мавпа не виготовить будь-яке знаряддя наперед, не візьме про запас палку, щоб дістати банан (тварина користується тим, що є поряд). Людина засвоює суспільний досвід поведінки і знань інших людей, щоб використати їх у майбутньому. Німецький психолог Адемар Максиміліан Гельб (*Gelb, 1887–1936*) сформулював парадоксальне і привабливе положення, що тварина не може робити щось біологічно безглузде, а тільки людина здатна це робити; 4) мова людини – тип соціального успадкування (в генах не закодована), «діти-мауглі» є тому свідченням. Мова тварин вроджена вид, вони її не вивчають. Курча чи котеня, яке народилося в ізоляції від своїх братів чи сестер, завжди володіє видовим «словарним запасом», який притаманний курці чи кішці; 5) крім статевого, харчового і захисного інстинктів людині притаманний інстинкт власної гідності, що недосяжно тваринам; тільки людина може боротися чи піти добровільно на смерть за ідею, власну систему цінностей (мову, віру). Отже, тільки людина здатна вбивати іншу людину (внутрішньовидове вбивство) не тільки з біологічних причин (як трапляється у тварин), а за моральні і культурні цінності.

Біологічні проблеми функціонування екосистем нині тісно пов'язані з політичними, демографічними, енергетичними, продовольчими і сировинними проблемами. Матеріальні і духовні потреби існують одночасно із біологічними, і разом утворюють якісно новий суспільний вид потреб – соціологічні, медичні, рекреаційні, освітні, культурні, релігійні. Людина потребує певної якості природного середовища, при збереженні якого можливе повноцінне життя і здоров'я. Людина здатна це усвідомити і змінити стиль своєї життєдіяльності в біосфері на засадах ноосферної ідеї, трансформованої нині у концепцію сталого (збалансованого) розвитку (див. Розділ 6).

Соціоекологія вивчає взаємодії і взаємозв'язки людського суспільства з навколишнім природним середовищем, вплив останнього на людські популяції, етноси (народи, народності). Це потребує пених дій, а саме : діагностики стану біосфери та її ресурсів, визначення порога витривалості біосфери відносно антропогенних навантажень, формування екологічної свідомості, екологічної культури, екологічного права за допомогою нових методів і підходів екологічної освіти та виховання, формування принципів і критеріїв екологічного менеджменту та екологічної політики (Г. Білявський, М. Клименко, В. Боголюбов, Т. Гардашук, В. Крисаченко, В. Аніщенко, С. Рудишин, та ін.).

Проблематика сучасної екології потребує філософського осмислення. На думку методологів екології (М. Кисельова., Ю. Шеляг-Сосонко, Г. Білявського та ін.) в сучасній екології межі дослідження розширені від вивчення відношення «організм – середовище» до « людина – природа». На часі формування нової екологічної філософії, стратегій поведінки людського суспільства, економіки та технологій, які приведуть масштаби та характер людської діяльності у відповідність до екологічної витривалості природи і запобігатимуть екологічній кризі. Ми маємо співпрацювати з природою, поважати її закони.

Відповідні два напрями сучасної екології вже увійшли як у цілому, так і своїми підрозділами в різні освітні програми закладів вищої освіти, за якими готують бакалаврів і магістрів в Україні. При цьому теоретична екологія була і залишається науковою базою для практичної. Охорону навколишнього середовища та збалансоване природокористування, соціоекологію можна визначити як галузі знань/діяльності, що розробляють комплекс заходів, спрямованих на підтримання гармонії між соціумом і трьома середовищами

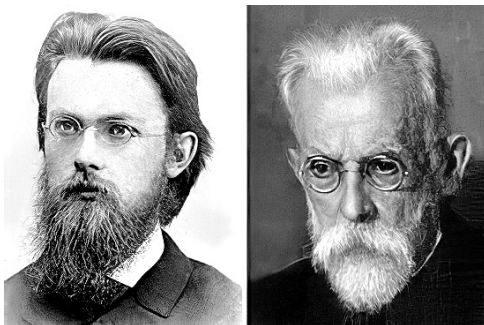


(природним, штучним, соціальним), в яких він (соціум) знаходиться і які формує / створює дружнє (friendly) середовище, займається освітою для сталого розвитку (О. Пахомов, Я. Дідух, В. Кучерявий, М. Мальований, Й. Царик, Д. Шабанов, 2014; С. Рудишин, 2009–2022; В. Боголюбов, 2018; І. Коренева, 2019; В. Самілик, 2019; Ю. Скиба, 2014; М. Хроленко, 2022).

Таким чином, формування сучасної екології відбувається із врахуванням того, що *Homo sapiens*, як найактивніший компонент у біосфері, є потужним фактором, що впливає на екосистеми всіх рівнів організації.

## 1.2. Біогеохімія як наука

Біогеохімія як наука виникла на межі біології, геології і хімії; вона поєднує напрацювання дослідників минулого і сьогодення. Спочатку це був новий науковий напрям геохімії, основні положення якої сформулював наш геніальний співвітчизник, творець і перший президент Української академії наук В. І. Вернадський. Учений створив дещо більше, ніж нові науки (геохімію, біогеохімію, космохімію, гідрохімію, радіогеологію), – він сприяв формуванню нового погляду на природу в цілому.



Володимир Іванович Вернадський  
(1863 – 1945).

### В. І. Вернадський – фундатор біогеохімії як науки

Володимир Іванович Вернадський народився 12 березня 1863 року у Петербурзі, а дитинство провів у Харкові. У 1876 р. родина повернулася до Петербурга, але глибокий зв'язок з Україною В. Вернадський відчував завжди. Уже в перших наукових студентських рефератах і доповідях В. Вернадський поставив питання, які потім стали ключовими в його на-

уковій діяльності, почав розмірковувати про людство в ролі природного чинника планетарного масштабу.

У щоденнику за 1884 р. він написав, що мінерали є пам'ятками реакцій, які відбувалися на Землі, а історію планети можна розглядати як низку інтенсивних змін матерії в одному місці світового простору. Згодом В. Вернадський розвинув свою еволюційну теорію походження мінералів – генетичну мінералогію, що методологічно допомогло успішно розв'язати науково-практичні проблеми геохімії: з'ясування будови силікатів та алюмосилікатів, походження та розподілу рідкісних і розсіяних елементів, пошуку радіоактивних мінералів, визначення абсолютного віку гірських порід, ролі живих організмів у геохімічних процесах та ін. Його вчення про роль каолінового ядра і будови алюмосилікатів започаткувало основи сучасної кристалографії, а уявлення про парагенезис і ізоморфні ряди – один із наукових методів пошуків корисних копалин.

У 1889 р. В. Вернадський перебував у науковому відрядженні від Петербурзького університету в Італії, Німеччині, Франції. Працював в Мюнхені у лабораторії «короля кристалографії» того часу Пауля Грота; в Парижі – в лабораторії Ле Шательє, з яким проводив тривалі наукові бесіди. Це вплинуло на розвиток ідей про механізми підтримання рівноваги у біосфері. Сьогодні вчені визнають, що рушійними силами, які утримують біосферу в стані динамічної рівноваги (гомеостазу), є біологічне і ландшафтне різноманіття, реалізація різних життєвих стратегій організмів, екологічні ніші, сукцесії тощо.

За В. Вернадським, мінералогія із традиційно описової науки поступово перетворилася на нову динамічну галузь – геохімію – науку про геологічну історію планети, перетворення і колообіг хімічних елементів на Землі. Він також поглибив думку Василя Докучаєва (1846–1903) щодо ролі живої речовини в геологічній історії планети. В. Вернадський одним з перших почав виявляти роль води у формуванні будови і геологічної історії Землі, розвивав поняття про диссиметрію гідросфери, про її різноманітність не тільки в залежності від різних геосфер, але й у зв'язку з взаємодією в системі газ – вода – порода – жива речовина. Вчений наголошував, що вода може існувати і постійно утворюватись у земній корі без впливу живого, але життя без води в умовах Землі існувати не може.



До відкриттів В. Вернадського основні процеси, які відбувалися і відбуваються на земній поверхні, традиційно пояснювали роботою річок, вітру, моря, вулканів, льодовиків тощо (за рахунок розливу, перенесення, осадження, гідролізу, адсорбції, десорбції, коагуляції та ін.); з цим і пов'язували утворення більшості осадових порід (глини, піски, солі тощо). Саме В. Вернадський довів, що живі організми своїм диханням, живленням, метаболізмом, розкладанням створили планетарний процес – міграцію хімічних елементів. Про космічну роль живих організмів як перетворювачів сонячної енергії В. Вернадський доповідав у своїх лекціях у Карловому університеті (Прага) та Сорбонні (Париж) у 1923–1924 рр. Це стало яскравим прикладом застосування нової методології пояснення інтенсивної геологічної роботи живої речовини на земній поверхні упродовж мільярдів років.

Усю сукупність живих організмів у біосфері він назвав «живою речовиною», довів, що живі організми є не лише одним із геологічних чинників, а найінтенсивнішою геологічною силою, яка діяла й діє на земній поверхні упродовж чотирьох мільярдів років. В. Вернадський вперше звернув увагу на відносну стабільність біосфери протягом відомого людству геологічного періоду; вказав на те, що для існування живої речовини (рослин, тварин, мікроорганізмів тощо) ланцюжки хімічних перетворень в цілому є типовими для земного середовища і термодинамічно узгодженими. Це дозволило йому зробити оптимістичний на той час висновок: стабільність та незмінність біосфери є надійною запорукою неможливості глобальної екологічної кризи. Локальні екологічні кризи, на думку вченого, можливі і належать до необхідних елементів еволюційних змін форм життя (наприклад, вимирання окремих видів організмів на межі геологічних періодів).

Власні думки, теорії та філософські роздуми він оформив як основу нової науки – біогеохімії. Остаточню її основні положення В. Вернадський сформулював у працях «Біосфера» (1926), «Нариси геохімії» (1927).

Отже, час народження припадає на 1908–1920 рр.; місце народження – кафедра мінералогії Московського університету, якою з 1891 р. керував В. Вернадський. Він створив школу талановитих молодих учених. З 1927 р. і до смерті Володимир Іванович обіймав посаду директора Біогеохімічної лабораторії при Академії наук СРСР, що згодом стала Інститутом геохімії та аналітичної хімії ім. В. І. Вернадського. Його послідовники О. Виногра

дов, О. Ферсман, А. Шкляревський, Я. Самойлов, В. Ковальський, К. Ненадкєвич, В. Хлопін, Г. Вульф, Л. Іванов, І. Іловайський, Б. Полинов, О. Перельман, М. Школьник, Я. Пейве та ін. сформували ядро біогеохімічної школи В. Вернадського. Ідеї вченого стали основою уявлень про великий геологічний і малий біологічний колообіги, розроблені академіком В. Вільямсом та розвинуті в дослідженнях В. Ковди, С. Зонна, Н. Базилєвича, В. Добровольського, О. Саукова, О. Безуглової, О. Ковалєвського, М. Бєлова, В. Алексєнко, Г. Гетьмана, В. Гуцулюка, та ін.

Науковий доробок академіка В. Вернадського складає понад 700 наукових праць. За широтою наукового кругозору та різноманітністю наукових відкриттів Володимир Іванович Вернадський займає особливе місце серед великих вчених нашого часу. Молекулярні кристалічні структури, планетарні геохімічні оболонки, історія мінералів і геосфер, міграція хімічних елементів Землі, геологічна роль «живої речовини» в історії планети, вчення про біосферу, гіпотеза ноосфери і значення наукової думки як планетного явища – таке коло наукових інтересів вченого-мислителя, ідеї якого набувають з часом все більшу актуальність. І сьогодні, майже через 80 років після його кончини, актуально звучать слова учня, друга, соратника В. Вернадського академіка О. Ферсмана, написані в 1945 р.: «... ще багато років прийдеться попрацювати і його учням, й історикам природознавства, щоб виявити основні шляхи його наукової творчості, розгадати складні, ще далеко не зрозумілі побудови його тексту. Це завдання лежить на майбутніх поколіннях...» [Ферсман А. Е. Владимир Иванович Вернадский (Общий облик ученого и мыслителя). В. И. Вернадский: pro et contra. СПб., 2000. С. 44].

## **Сутність, предмет і завдання біогеохімії**

Дві найголовніші науково-політичні сучасні проблеми людства – продовольство (їжа) і екологічна безпека – пов'язані з біогеохімічною проблематикою, оскільки нормальне функціонування екосистем та виробництво продуктів харчування забезпечує геохімічна робота живої речовини в біосфері. Перехід суспільства до збалансованого розвитку потребує наукового забезпечення з позицій біогеохімії.

**Біогеохімія** (грец. *bios* – життя, *gē* – земля і хімія) – системна наука, що вивчає хімічний склад живих організмів, участь живої речовини і продуктів її розкладу в процесах міграції, розподілу, розсіювання та накопичення хімічних елементів у земній корі, тобто геохімічні процеси в біосфері за участі живої речовини.

Отже, біогеохімія розглядає не окремі особини чи види організмів, а їх сукупність – живу речовину, яка характеризується масою, хімічним складом, енергією та інформацією, що забезпечує їй можливість здійснювати геохімічну роботу в біосфері.

Біогеохімія має власну понятійно-категоріальну базу, предметне поле і закономірності. *Об'єктом вивчення біогеохімії* є жива та нежива природа, їхній хімічний склад і структурно-функціональні взаємовпливи. *Предмет сучасної біогеохімії* охоплює: хімічний склад біосфери; геохімічні процеси, які відбуваються в біосфері за участю живої речовини; закономірності міграції, розподілу й нагромадження хімічних елементів у біосфері; закономірності біоіндикації довкілля; форми і механізми антропогенної деградації біосфери.

Біохімія покликана розв'язати багато завдань, що сприятимуть пізнанню навколишнього світу, головними з них є:

- 1) вивчення хімічного складу живих організмів і ролі хімічних елементів у їх розвитку;
- 2) дослідження шляхів і механізмів біогенної та техногенної міграції хімічних елементів;
- 3) побудова кількісних моделей геохімічних циклів біогенних елементів;
- 4) визначення ролі живих організмів різних таксономічних груп у біологічному колообігу хімічних елементів і речовин;
- 5) з'ясування природи і встановлення закономірностей фракціонування ізотопів живими організмами;
- 6) виявлення ролі живої речовини в геохімічних процесах зони гіпергенезу та в процесах вивітрювання;
- 7) з'ясування особливостей біогеохімічного районування та причин біогеохімічних ендемій;
- 8) встановлення закономірностей біоіндикації довкілля;

9) розроблення теоретичних знань і практичних рекомендацій для запобігання екологічно небезпечним наслідкам господарської діяльності людини та нейтралізації вже існуючих екологічних проблем. Основні напрями сучасних біогеохімічних досліджень представлено на мал. 8.



Мал. 8. Основні напрями сучасних біогеохімічних досліджень.

*Процесуальний складник біогеохімічних досліджень* передбачає:

- відбір проб різних природних об'єктів для визначення їх хімічного складу;
- аналітичні дослідження по визначенню вмісту хімічних елементів та форм їх знаходження;
- математичне опрацювання результатів аналітичних досліджень: визначення статистичних параметрів, побудова графіків і діаграм, факторний та інші види математичного аналізу;
- науковий аналіз і синтез одержаних результатів: вивчення закономірностей розподілу хімічних елементів у природі, процесів їх міграції, концентрації та розсіювання, формування біогеохімічних провінцій, ролі хімічних елементів у розвитку живих організмів та ін.

Біогеохімічним знанням властиві міждисциплінарність, інтегративність та системність, що охоплює різні ієрархічні рівні організування матерії – від атомарного до біосферного. Вони відображають природничо-наукову картину світу і водночас є засобом пізнання та перетворення дійсності, сприяють формуванню розуміння проблем і механізмів функціонування біосфери в умовах антропогенного тиску, методів біогеохімічного аналізу природних об'єктів, контролю якості навколишнього середовища.

### 1.3. Особливості методології біогеохімії

Методологія біогеохімії – це система наукових положень діалектики, наукознавства та природничих наук на яких базуються дослідження в цій галузі, правила мислення при створенні теорії цієї науки. У біогеохімії використовують системний, інформаційний, історичний та синергетичний підходи до вивчення геохімічних процесів за участю живих організмів. Ці підходи ґрунтуються на:

– філософських положеннях про єдність живої і неживої природи, біологічної і соціально-духовної сутності людини; про місце людини в біосфері; про ідеї ноосфери; про ціннісні орієнтири екології в біогеохімічному контексті (В. Вернадський, Т. Гардашук, М. Голубець, Р. Карпінська, М. Кисельов, Б. Коммонер, К. Корсак, В. Крисаченко, В. Кучерявий, Я. Мовчан, М. Моїсеєв, Ю. Одум, П. Тейяр де Шарден, І. Шкловський, С. Рудишин та ін.);

– біологічних, хімічних, геохімічних, ландшафтно-морфологічних, медико-географічних та екологічних законах, теоріях, положеннях і принципах, які науково обґрунтовують:

1) можливість атомів С, Н, О в процесі фотосинтезу заряджатися енергією і ставати геохімічними акумуляторами енергії в біосфері, що дає змогу енергії Сонця проникати всередину планети (В. Вернадський, М. Белов, С. Мороз, О. Перельман, М. Реймерс);

2) закономірності біогенної міграції хімічних елементів, їх накопичення та розсіювання живою речовиною у просторі та часі (В. Вернадський, О. Виноградов, Ю. Дмитрук, В. Докучаєв, Ф. Кларк, М. Клименко, В. Ко-

вальський, В. Ковда, М. Коржнев, В. Кучерявий, Ю. Одум, О. Перельман, Б. Полинов, А. Потіш, М. Реймерс, О. Ферсман, V. Bashkin);

3) необхідність коеволюціонного існування системи «біосфера-суспільство» (В. Вернадський, М. Голубець, М. Моїсеєв, М. Реймерс, С. Рудишин, Ю. Шеляг-Сосонко, Я. Мовчан, В. Шестопалов);

4) можливість об'єктивного дослідження еколого-геохімічного стану антропогенних ландшафтів (В. Полинов, М. Солнцев, М. Глазовська, В. Добровольський, І. Волошин, В. Гетьман, В. Гуцуляк, Г. Денисик, М. Коржнев, Л. Малишева, В. Присакар, Л. Руденко, І. Смолянинова, Ю. Сущик, Л. Шевченко, Р. Брукс, Ю. Дмитрук, В. Боголюбов, В. Чайка).

– синергетичні засади функціонування відкритих систем (І. Пригожин, Г. Хакен, І. Стенгерс) щодо їх можливості до самоорганізації.

**Системний підхід в біогеохімії.** Все, що існує довкола (від атома до Всесвіту), можна уявити у вигляді системи, яка складається з кількох пов'язаних між собою об'єктів. Її компоненти упорядковано взаємодіють, взаємозалежать один від одного та утворюють єдине ціле. Біогеохімічна система – об'єкт або сукупність об'єктів, які умовно виокремлюються і піддаються теоретичному або експериментальному вивченню.

Специфіка біогеохімії полягає у вивченні міграції хімічних елементів в природних системах за участі живої речовини на атомарному та молекулярному рівнях. Внаслідок міграції відбувається концентрація та розсіювання елементів. Системи, що вивчає біогеохімія, поділяють на такі типи:

– абіогенні системи, в яких відбуваються тільки процеси механічної та фізико-хімічної міграції (наприклад, виверження вулкану, торнадо, шторм, землетрус, припливи, відпливи, танення льодовиків та ін.);

– живі організми та їх асоціації, які здійснюють біогенну міграцію хімічних елементів і речовин (наприклад, бактерії, рослини, гриби, тварини);

– біокосні системи (грунти, мули, ландшафти, природні води та ін.), для яких характерне взаємопроникнення живої і неживої матерії (за В. Вернадським). Найбільша біокосна система – це біосфера;

– техногенні системи (міста, підприємства, транспортні комунікації тощо), у яких відбувається неприродна (техногенна) міграція.

*Структуру біогеохімічної системи утворюють її складові частини і спосіб зв'язку між ними.*

Ціле у вигляді системи має *емерджентні властивості*, які відсутні в частинах-підсистемах і не дорівнюють сумі властивостей елементів-компонентів. Наприклад, молекула кисню ( $O_2$ ) – система, що складається з двох атомів Оксигену; молекула озону ( $O_3$ ) – з трьох атомів, і це якісно різнить озон за властивостями від кисню. У свою чергу, атомарний Оксиген – це система, що складається з ядра і електронів, і теж має відповідні специфічні властивості.

Прикладом феномену емерджентності є також група дерев, чагарників, трав, тварин, грибів, мікроорганізмів, які разом формують нову якість – ліс. Русійним механізмом слугує можливість досягнення більшої надійності при об'єднанні – діє *правило конструктивної емерджентності*, за яким надійна система може бути сформована з ненадійних елементів або підсистем, не здатних до індивідуального існування. «Кооперативний ефект» виявляється на усіх рівнях організації матерії, оскільки забезпечує значні речовинно-енергетичні та інформаційні переваги. Прикладами емерджентності є органи людини (серце, легені, нирки та ін.), колоніальні організми (корали), суспільні комахи (мурахи, бджоли, терміти) тощо.

За усієї очевидності аксіоми емерджентності людина не завжди усвідомлює її в практичній діяльності. Техногенні системи з біогеохімічного погляду є випадковими об'єднаннями в природі, оскільки зумовлені антропогенними чинниками.

Природні екосистеми, які знищені людиною і стали сотнями тисяч гектарів сільськогосподарських угідь чи поселень, не можуть бути відновлені у первісному стані. Екосистема, втративши певні елементи, формує інші зв'язки, стає екологічно новим природним утворенням. Це відображає *закон незворотності еволюції Л. Долло*.

Навіть якщо намагатися відновити втрачену екосистему, якою вона була років 300–500 тому, то вона неминуче еволюціонуватиме інакше, оскільки генетична конструкція її популяцій вірусів, бактерій, рослин, грибів і тварин вже різниться від вихідної. Тому перенесення давно вибулих із складу екосистеми видів у процесі реакліматизації є фактично впровадженням нового виду в оновлену екосистему. Вид ніколи не щезає один, разом із його відсутністю змінюються складні хар-

чові та інформаційні мережі, відбувається каскадна за ієрархією систем глобальна перебудова. Одні види безповоротно зникають, інші їх заміщують (з причин необхідності каскадного перетворення сонячної енергії).

Отже, біологічна система має властивість самоорганізації, саморегуляції і у разі будь-яких сторонніх втручань, змін її розвиток відбуватиметься новим шляхом.

**Інформаційний підхід у біогеохімії.** Прийнято вважати, що матеріальний світ складається з речовини (характеризується масою спокою), поля (йому притаманна енергія) та вакууму (властивості досліджуються і обговорюються вченими на основі побудови теоретичних моделей). Закони збереження речовини та перетворення енергії є фундаментальними узагальненнями природознавства. Однак у другій половині ХХ ст. речовинно-енергетична картина світу виявилася недостатньою і виник її новий аспект – інформаційний.

Термін «інформація» (лат. *informatio* – повідомлення, пояснення, викладення) використовували раніше на позначення будь-яких відомостей, що передаються від людини до людини, від тварини до тварини, від людини – машині, від машини – людині і т. д. Проте передавання відомостей чи знань нині трактують як поодинокий випадок інформації. Під інформацією нині розуміють вибір одного (або кількох) сигналів, параметрів, варіантів, альтернатив з багатьох можливих, що має запам'ятовуватися. Це деяке ідеальне повідомлення, яке зменшує або повністю знімає невизначеність у виборі однієї з кількох можливих альтернатив. Інформація дорівнює нулю, якщо вибір не зроблено. У широкому розумінні інформацію трактують на основі категорій різноманітності системи. Інформаційний підхід свідчить, що стабільність біогеохімічних циклів хімічних елементів в біосфері забезпечується різноманіттям (біологічним і ландшафтним), а не техногенними (навіть дуже досконалими) системами.

Інформаційні процеси охоплюють збирання, зберігання, передавання, опрацювання та видання інформації. Якщо соціальна інформація зберігається в пам'яті людей, в книжках, фотографіях, електронних носіях, а її передавання здійснюється по радіо, телебаченню, Інтернету, розмові,



то жива речовина зберігає спадкову інформацію у вигляді ДНК (чи РНК) генів різних організмів.

Геохімічна робота живої речовини в інформаційному контексті все більше зацікавлює вчених. Адже космічний процес фотосинтезу запускає створення з  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  різноманітних складних біомолекул (вуглеводів, білків, нуклеїнових кислот та ін.). Це не лише збільшує, а й ускладнює початкову інформацію (хімічну) до виникнення якісно нового її виду – спадкової (біологічної). Під впливом зовнішніх умов (наприклад, іонізуючого випромінювання, деяких хімічних речовин) ця інформація може змінюватися у вигляді мутацій. За допомогою розмноження вона переробляється і передається потомству. Врешті, інформація може бути захована у геологічних пластах у вигляді викопної флори, фауни, горючих копалин тощо.

Інформаційний підхід пов'язаний із самоорганізацією та іншими суттєвими характеристиками систем. Зокрема, загальна теорія систем розрізняє прямі та зворотні зв'язки. *Прямий зв'язок* характеризується впливом причини на результат процесу, його прикладом є дія Сонця на процеси фотосинтезу рослин. *Зворотний зв'язок* – це вплив результату функціонування будь-якої системи на характер її подальшого функціонування. За характером впливу розрізняють позитивний та негативний зворотний зв'язок.

*Позитивний зворотний зв'язок* впливає на систему шляхом збільшення вихідного результату її функціонування. Результат підсилює процес і система еволюціонує, тобто все більше віддаляється від вихідного стану. Наприклад, утворення льодовиків збільшує відбиття променів Сонця від їх поверхні, сприяє охолодженню та збільшенню площі зледеніння. Особливо характерний позитивний зворотний зв'язок для техногенних систем – утворення міст збільшує площі їхніх інфраструктур, які дедалі збільшують площі міст.

*Негативний зворотний зв'язок* зменшує вихідний результат функціонування системи. Результат процесу послаблює цей процес і стабілізує систему, тобто відновлює її вихідний стан. В результаті дії негативного зворотного зв'язку в системі можливе саморегулювання, що відбувається за принципом Ле Шательє – Брауна: при зовнішній дії, що виводить

систему зі стану стійкої рівноваги, ця рівновага зміщується в напрямку послаблення ефекту зовнішньої дії. Цей принцип у межах біосфери людина порушує і досі.

Отже, об'єкти біогеохімії існують в інформаційному полі теж. Тому будемо пам'ятати, що інформація живої речовини і неживої природи знаходиться у вигляді біологічного і ландшафтного різноманіття, яке необхідно зберігати.

**Історичний підхід у біогеохімії.** Він передбачає вивчення змін біогеохімічної міграції у часі. При цьому важливе значення має картографічний метод дослідження (вивчення просторових, географічних закономірностей накопичення та розсіювання хімічних елементів).

У минулі геологічні епохи хімічний склад оболонок планети суттєво відрізнявся від теперішнього, що впливало на міграцію хімічних елементів. Наприклад, для докембрію була характерна дія вулканізму на склад атмосфери і гідросфери. Є підстави виокремлювати історичну біогеохімію процесів (наприклад, особливості міграції хімічних елементів у минулі епохи) чи біогеохімію окремих систем (океану, кори вивітрянання та ін.). Антропогенний вплив на довкілля руйнує природні системи і «замінює» біогенну еволюцію. Еволюція вимушена бути екстенсивною, її темп диктує трансформована природа, а не хід природних явищ. Фактично цей процес відбувається у вигляді масового розмноження окремих організмів, які змінюють усталені біогеохімічні цикли екосистем.

**Синергетичний підхід в біогеохімії.** *Синергетика* – наука, що вивчає закони і механізми самоорганізації складних відкритих систем (обмінюються енергією, інформацією та речовиною із зовнішнім середовищем).

Пізнавальний потенціал синергетики полягає у формуванні особливого сценарію мислення, нової логіки розуміння динаміки екологічних / біогеохімічних процесів. Цей підхід спирається на такі основні принципи:

1) *принцип становлення* – головною формою буття є феномен нестійкості, тобто неспокій, рух, незавершені рівноважно-цілісні форми, перехідні, проміжні часові утворення, флуктуації (випадкові відхилення). Станов-

лення проявляється через дві протилежності: хаос і впорядкованість. Нерівноважність в системі є джерелом появи нової організації (порядку). Хаос – це основа складності, випадковості, створення – руйнування, конструкції – деконструкції; впорядкованість – основа простоти, необхідності, закону, краси, гармонії. У Всесвіті ентропія зростає з плином часу, але всередині хаосу існують острівці порядку і один із найважливіших серед них – феномен життя;

2) *принцип впізнавання* – осмислення буття як процесу становлення. При цьому параметри впорядкованості відіграють подвійну роль. З одного боку, вони повідомляють системі шляхи розвитку, а з іншого – дають змогу дослідникам вивчати її макроскопічний стан. Різноманітність станів складових системи виступає в якості створюючого начала; в особливих станах нестійкого середовища (*точках біфуркації*) мікрозміни можуть впливати на макропроцеси переходу системи в новий стан; майбутній стан системи (атрактор) організує, формує, змінює сучасний її стан (див. підрозділ 2.4);

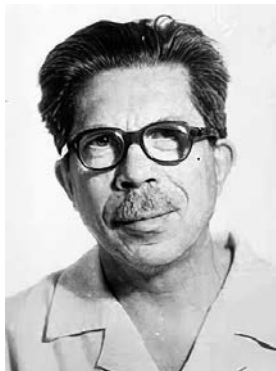
3) *принцип доповнюваності* – означає незалежність і принципову частковість, неповноту досинергетичного і синергетичного (без досинергетичного) опису реальності. Усе існуюче у цьому контексті одночасно постає і як усталене, і як таке, що усталюється.

Логіка мислення на засадах синергетики спирається на вихідне припущення про істотну нелінійність досліджуваних об'єктів – екосистем, ландшафтів. Моделювання на основі синергетичної парадигми дає змогу створити моделі самоорганізації екосистем у вигляді біосфери, але не покликане відображати їх дрібні деталі, а лише основні ознаки системи як феноменального явища класу глобальної екосистеми. Синергетика як методологія розглядає незворотність як умову розвитку систем, а «нерівновагу» систем – як імператив розвитку, і це її корінна відмінність від кібернетики, від теорії дослідження операцій. Отже, при вивченні геохімічних процесів в біосфері за участі живої речовини необхідно аналізувати механізми саморегуляції, оцінювати системні, інформаційні та еволюційні показники.

## 1.4. Основні екологічні закони, правила, теорії в біогеохімічному дискурсі

Наукова парадигма біогеохімії пов'язана із вивченням міграції, розподілу, розсіювання та накопичення хімічних елементів за участі живих організмів і продуктів їх розкладу як в окремих біогеоценозах і біогеохімічних провінціях, так і в біосфері загалом. У кожному акті біогеохімічного колообігу жива речовина поглинає сонячну енергію й виділяє її у формі, що здатна здійснювати геохімічну роботу як на поверхні, так й всередині Землі. Усе, що стосується передавання чи трансформації енергії, підкоряється відповідним законам термодинаміки.

Біогеохімічна проблематика активно оперує поняттями «жива речовина» і «біосфера» (за В. Вернадським), тому безпосередньо або опосередковано спирається на теорії, категорії і закони сучасної екології, які емерджентно узагальнюють постулати біології, хімії, фізики, геології, географії та інших наук.



Микола Федорович  
Реймерс  
(1931–1993).

Російський еколог Микола Федорович Реймерс (1931–1993) в одній із своїх праць («Екологія: теорія, закони, правила, принципи і гіпотези», 1994) зробив науковий огляд теоретичних здобутків екології, створив ієрархічні блоки з майже 250 законів, правил, принципів і теорем, які характеризують біотичні утворення або описують біогеохімічні дії живої речовини в екосистемах різного рівня організації.

Ця книга, на думку автора, є поглядом живого на навколишнє середовище та цього середовища на живе. М. Реймерс згрупував закони і закономірності у такі блоки: загальносистемні закони; закони внутрішнього розвитку систем; закони термодинаміки; закономірності енергетики, потоків речовин, продуктивності та надійності угруповань і біоценозів; закономірності ієрархії, розвитку та адаптації біосистем; фізико-хімічні та молекулярно-біологічні основи існування живого; закономірності розвитку; популяційні закони; біогеографічні закономірності

поширення угруповань; закономірності еволюції біосфери; закони соціальної еволюції; принципи охорони середовища, соціальної психології та поведінки людини в біосфері.

Пізнання геохімічних, екологічних законів, закономірностей, правил, принципів і теорій дає змогу краще осмислити біогеохімію як науку.

*Закон обмеженості природних ресурсів:* усі природні ресурси в умовах Землі вичерпні. Планета є природно обмеженим тілом, і на ній не можуть існувати нескінченні складові частини. Закон обґрунтовує необхідність існування великого (геологічного) і малого (біологічно го) колообігів хімічних елементів.

*Теорія парагенезису хімічних елементів:* поняття «парагенезис елементів», запроваджене В. Вернадським, означає сумісну концентрацію елементів в об'єктах. Парагенна асоціація елементів обумовлена єдиним процесом, пов'язаним, наприклад, із послідовним осадженням елементів за умов поступового охолодження розплаву чи розчину. Згодом парагенезис елементів вивчали В. Гольдшмідт, О. Ферсман, О. Сауков, О. Перельман, В. Щербина та ін. Суто просторовій асоціації елементів і мінералів, не пов'язаних генетично, В. Лебедев дав назву «парастерезис». Всебічно вивчені парагенні асоціації елементів у мінералах. Парагенезис головних елементів, зазвичай, пояснюють законами кристалохімії (наприклад, Fe і S в піриті; Fe, Mg, Si, O в олівіні та ін.).

*Основний закон геохімії В. Гольдшмідта:* вміст хімічних елементів в земній корі залежить від будови їхнього атомного ядра, а їх міграція – від будови електронних оболонок, що визначає хімічні властивості елементів. Для біогеохімії важливі обидва ці аспекти. Наприклад, поширеність елементів з парними порядковими номерами більша за сусідів з непарними номерами у періодичній системі хімічних елементів Д. Менделєєва. Легкі елементи Li, Be, B перебувають у дефіциті, оскільки «згорають» у реакціях з протонами. Ядра елементів, що завершують періодичну систему, мають надлишок нейтронів і тому нестійкі – піддаються радіоактивному розпаду (U, Th, Ra та деякі актиноїди). Найпоширенішими елементами є: в земній корі – O, у Всесвіті – H.

На основі цього закону В. Вернадський встановив таку закономірність – зменшення вмісту хімічних елементів в живих організмах пов'язано із

підвищенням атомної маси елементів у напрямі зверху вниз у періодичній системі хімічних елементів Д. Менделєєва. Сучасне розуміння будови атома дає змогу стверджувати, що зменшення кількісного вмісту хімічних елементів в організмі закономірно пов'язано із збільшенням заряду ядра атомів елементів у групі у тому самому напрямі. Крім того, із збільшенням заряду ядра атома збільшується токсичність елементів групи періодичної системи Д. Менделєєва.

На міграцію хімічних елементів в біосфері впливають такі чинники: атомна маса елементів; розміри атомних та йонних радіусів, електронна будова атома; розчинність у воді; здатність до кристалізації та утворення комплексних сполук; біологічні особливості різних видів організмів, їх вік та біохімічні закономірності зв'язку (синергізм, антагонізм та ін.) між хімічними елементами в організмах; тип ландшафту, особливість порід, клімат, рельєф.

Сучасні фізико-хімічні методи аналізу підтвердили *теорію В. Вернадського про розсіяний стан хімічних елементів*. Для I, Hf, Sc, Rb, In, Cs, Ra та деяких інших рідкісних елементів розсіяний стан є основним, оскільки ці елементи не утворюють власних мінералів; для більшості елементів – переважаючим, і тільки для O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K і Mg головною формою природного існування є мінерали.

Отже, усі хімічні елементи присутні скрізь у біосфері, але їхнє кількісне визначення залежить від чутливості методу аналізу. Це положення про загальне розсіювання хімічних елементів називають *законом Кларка – Вернадського*.

*Біогеохімічний закон В. Вернадського (закон біогенної міграції атомів)* ґрунтується на положенні, що жива речовина є найважливішим геохімічним фактором розвитку земної кори. Іншими словами, міграція хімічних елементів на земній поверхні та в біосфері загалом здійснюється за або безпосередньої участі живої речовини (біогенна міграція), або у середовищі, геохімічні особливості якого (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> та ін.) зумовлені дією живої речовини упродовж геологічної історії Землі. Фактично живі організми шляхом дихання, продуктів життєдіяльності, розмноження, розкладу після смерті сформували сучасний вигляд нашої планети.

На основі пізнання дії закону біогенної міграції атомів В. І. Вернадський сформулював три біогеохімічні принципи.

*Перший біогеохімічний принцип В. Вернадського:* біогенна міграція атомів хімічних елементів в біосфері завжди спрямована до максимального свого прояву. Цей принцип нині порушений людиною.

*Другий біогеохімічний принцип В. Вернадського:* еволюція видів у геологічному часі приводить до створення в біосфері стійких форм життя; вона відбувається у напрямі, який посилює біогенну міграцію атомів. Цей принцип спрацьовує аномально інтенсивно з причин зменшення середніх розмірів особин біоти Землі під час процесів екологічного дублювання (великі тварини замінюються дрібними, дерева – кущами або травою). Екологічна ніша в біогеоценозі не може бути порожньою, тому екологічне дублювання відбувається обов'язково. Зокрема, копитних у степу замінюють гризуни та комахи-фітофаги, екосистема високого рангу починає саморуйнуватися.

*Третій біогеохімічний принцип В. Вернадського:* жива речовина перебуває у безперервному хімічному обміні з космічним середовищем; вона створюється та підтримується на планеті космічною енергією Сонця. Протягом останніх десятиліть біосферний сонячно-земний зв'язок (разом із порушенням перших двох біогеохімічних принципів) змінюється. Тому є підстави стверджувати, що космічні впливи спроможні перетворитися з систем, які підтримують біосферу, на агентів її руйнування.

Пізнати геохімічні процеси у природних сферах без урахування дії біогенних факторів дуже складно. Людина впливає на стан біосфери, змінює її фізико-хімічний склад, умови збалансованої мільйонами років біогенної міграції атомів. Це спричинює негативні зміни, які набувають саморозвитку і стають глобальними, некерованими (у вигляді спустелювання, деградації ґрунтів, евтрофікації водойм, зменшення біорізноманіття за рахунок вимирання 2–3 видів/на годину та ін.). Отже, людині необхідно зберегти живий покрив Землі у відносно незмінному стані.

Ступінь замкнутості глобальних біогеохімічних колообігів достатньо висока, але вона для різних елементів неоднакова і не є абсолютною. Отже, існує *правило незамкнутості біотичних колообігів*. Доказами цього правила є утворення біогенних порід, реальне антропогенне вилучення

деяких елементів з ґрунту (зокрема, Карбону у вигляді вугілля, нафти, сланців). І нарешті, в умовах повної замкнутості біотичних колообігів еволюція не відбувалася б. Найвищий ступінь замкнутості біогеоценотичного «малого» циклу спостерігається в тропічних екосистемах – найбільш давніх і консервативних.

*Правило Оддо – Гаркінса*: елементи з парними порядковими номерами і парними значеннями атомної маси більш поширені, ніж розташовані поряд у таблиці Д. Менделєєва елементи з непарними значеннями атомної маси. Перевагу у поширенні мають елементи, відносна атомна маса яких (Ar) цілком ділиться на 4 (в дужках вказані Ar та кларк елемента): O (16; 47,7), Mg (24; 2,1), Si (28; 27,7), Ca (40; 3,6), S (32; 0,05), Cr (52; 0,002), Fe (56; 5,1).

*Закон фізико-хімічної єдності живої речовини (сформульований В. Вернадським)*: уся жива речовина Землі має єдину фізико-хімічну природу, що не заперечує кількісної біогеохімічної специфіки видів, статевих та вікових відмінностей у тканинах організмів. Закон виключає значні зміни у властивостях живої речовини. Життя якісно єдине, і тому підкоряється єдиним «правилам гри», у т. ч. закону внутрішньої динамічної рівноваги та біогеохімічним принципам В. Вернадського. З цього випливає, що шкідливе для однієї частини живої речовини шкодить й іншій її частині, тільки різною мірою. Через наявність у будь-якій популяції стійких до фізико-хімічного впливу видів швидкість відбору за витривалістю популяцій до шкідливого агента прямо пропорційна швидкості розмноження цих організмів та чергування поколінь. Наприклад, внаслідок цього тривале використання пестицидів екологічно недопустиме, бо шкідники, які розмножуються значно швидше, пристосовуються та виживають, а обсяги хімічних забруднень дедалі збільшуються.

*Закон константи кількості живої речовини (сформульований В. Вернадським)*: кількість живої речовини біосфери (для певного геологічного періоду) є константною величиною. Цей закон практично є кількісним наслідком закону внутрішньої динамічної рівноваги в масштабі біосфери. Жива речовина, згідно із законом біогенної міграції атомів, є енергетичним посередником між Сонцем і Землею. На планету Земля за 1 хв. на площу, орієнтовану перпендикулярно потоку, надходить стала кількість сонячної



енергії (1,369 кВт/м<sup>2</sup>, або 1,959 кал/см<sup>2</sup> · хв) – т. зв. «сонячна стала», тому кількість живої речовини повинна бути постійною, мають змінюватися її енергетичні характеристики.

*Теорема збереження впорядкованості відкритих систем І. Пригожина:* ентропія у відкритих системах не зростає, а спадає доти, доки не досягне мінімальної постійної величини, завжди більшої за нуль. При цьому речовина в системі розподіляється нерівномірно і організується так, що в одних місцях ентропія зростає, а в інших – різко знижується. За рахунок використання потоку енергії система, як єдине ціле не втрачає впорядкованості. Діяльність живих організмів негентропійна, доки зберігається їх властивість системності: обмін речовин, онтогенез, середовищеутворювальна роль у біосфері та інші процеси у відкритих системах.

Це відбувається внаслідок дії *принципу Ле Шательє – Брауна*: якщо на систему у стані стійкої рівноваги здійснювати будь-який зовнішній вплив, то рівновага зміщується у той бік, що послаблює ефект зовнішньої дії. У біосфері механізм спрацювання принципу Ле Шательє – Брауна ґрунтується на функціонуванні живої речовини, яка за В. Вернадським є головним регулятором біогеохімічних процесів на планеті. Дія цього принципу в межах біосфери нині глибоко порушена людиною. Якщо на початку ХІХ ст. ще відбувалося збільшення біологічної продуктивності та біомаси внаслідок зростання концентрації вуглекислого газу в атмосфері, то вже у другій половині ХХ ст. такого явища не спостерігалось. Навпаки, викиди СО<sub>2</sub> зростають, а біомаса біоти знижується. Оскільки біосфера завжди буде мати лише один стійкий стан, то єдиним способом підпорядкування дії принципу Ле Шательє – Брауна стане скорочення площ антропогенно змінених земель. Абсолютно ізольовані системи без зв'язку із навколишнім середовищем тривалий час існувати не можуть, оскільки спрацьовує другий закон термодинаміки (*закон зростання ентропії*).

Речовина, енергія та інформація для функціонування й розвитку системи можуть надходити лише з навколишнього середовища, тому тільки за рахунок цього середовища може існувати і прогресувати будь-яка система. Цей факт відображає *закон розвитку природної системи за рахунок навколишнього середовища (за М. Реймерсом)*: будь-яка система може

розвиватися лише за умови використання матеріально-енергетичних та інформаційних можливостей середовища, що її оточує; абсолютно ізольований саморозвиток неможливий. Цей закон діє як у сфері природних, так і соціальних систем (окрім механічних, створених людиною штучно).

*Закон внутрішньої динамічної рівноваги (за Е. Баурером – М. Реймерсом):* речовина, енергія, інформація та динамічні якості окремих природних систем, їх ієрархії настільки пов'язані між собою, що будь-які зміни одного з цих показників спричиняють супутні функціонально-структурні кількісні та якісні зміни інших. Це зберігає загальну суму речовинно-енергетичних, інформаційних і динамічних якостей систем, де ці зміни



**Мал. 9.** Приклад дії закону динамічної рівноваги у Єллоустонському національному парку (*Yellowstone National Park*). У 1995 році випустили 14 вовків, яких не було декілька десятиліть і там царювали олені. Олені безконтрольним розмноженням нанесли флорі значну шкоду. Випустили вовків. За 6 років кількість дерев збільшилась у 5 разів. З'явилися бобри; для них дерева необхідні для побудови гребель. В заплавах з'явилася риба, ондатри, качки. Вовки зменшили популяцію шакалів, що збільшило кількість зайців і мишей; вони в свою чергу – ясурів, тхорів і лисиць. В парк прийшли ведмеди, які змоги відбирати здобич від вовків і додати залишки. В парку збільшилась кількість ягід. Дивно, але вовки стабілізували русла річок, бо зменшилась ерозія берегів. Адже ріст дерев і трави на берегах річок привів до їх укріплення.

відбуваються, або в їх ієрархії. Із закону внутрішньої динамічної рівноваги випливає кілька практичних наслідків:

1) будь-яка зміна середовища (речовини, енергії, інформації, динамічних якостей екосистем) неминуче призводить до розвитку природних ланцюгових реакцій у бік нейтралізації цих змін чи формування нових природних систем, що може набути незворотного характеру за принципом Ле Шательє – Брауна. Наприклад, вирубаня лісу в басейні річки, яка впадає в озеро, призводить до зниження рівня ґрунтових вод, усихання малих річок, зниження рівня води в озері, що призводить до загибелі риби, евтрофікації водойм (внаслідок розвитку синьозелених водоростей) тощо (мал. 9);

2) взаємодія речовинно-енергетичних екологічних компонентів (енергія, гази, рідини, організми-продуценти, консументи, редуценти), інформації та динамічних якостей природних систем є кількісно нелінійною, тобто слабка дія чи зміна одного з показників може викликати сильні відхилення в інших (і в усій системі загалом). Зокрема, незначне відхилення у складі газів атмосфери, її забруднення оксидами Сульфуру чи Нітрогену призводять до утворення кислотних опадів, які, у свою чергу, викликають величезні зміни в екосистемах суходолу та водного середовища. Саме це спричинило спустошення лісів Європи та Північної Америки, порушило цикли розвитку морських організмів, личинкові стадії онтогенезу яких проходять на міліні та ін. Аналогічно, незначне збільшення концентрації CO<sub>2</sub> призводить до виникнення парникового ефекту;

3) зміни, що відбуваються у великих екосистемах, відносно незворотні – проходячи по ієрархії знизу вверху, від місця впливу до біосфери загалом, вони змінюють глобальні процеси і тим самим переводять їх на новий еволюційний рівень (згідно із законом незворотності еволюції Л. Долло). М. Реймерс емоційно відзначає: «...чим більше пустель ми перетворимо на квітучі сади, тим більше квітучих садів ми перетворимо на пустелі».

*Закон піраміди енергії (або правило 10% Р. Ліндемана):* з одного трофічного рівня екологічної піраміди переходить на вищий у середньому не більше 10% енергії. Сходінки піраміди: продуценти – консументи – редуценти). Зворотний потік (з більш високих на більш низькі рівні) набагато слабший – не більше 0,25%, тому термін «колообіг енергії» є умовним.

Екологічна піраміда відображає співвідношення чисельності організмів, маси і енергії в екосистемах на різних трофічних рівнях



Мал. 10. Екологічна піраміда. Правило 10% Ліндемана.

За цим законом можна робити розрахунки земельних площ, лісових угідь з метою забезпечення населення продовольством та іншими ресурсами.

*Закон (правило) 1%* : зміна енергії природної системи у середньому на 1% (від 0,3 до 1%) виводить систему із стану гомеостазу (динамічної рівноваги).

*Правило біологічного підсилення*: при переході на більш високий рівень екологічної піраміди накопичення певних речовин, у т. ч. токсичних та радіоактивних, зростає приблизно у такій самій пропорції.

*Закон сукцесійного уповільнення (за М. Реймерсом)*: при наближенні екосистеми до стану клімаксу (зрілої екосистеми у стані стійкої рівноваги) в ній, як і в усіх урівноважених системах, відбувається уповільнення темпів усіх процесів розвитку. При цьому відновлювальний тип сукцесій замінюється на їх віковий хід, тобто саморозвиток здійснюється у межах клімаксу чи вузлового співтовариства. Біорізноманітність формує сукцесію,

її напрям, забезпечує наповненість реального простору життям. Якби різноманітність була несуттєвою і мала тільки «естетичне» значення, то види, що формують комплекс, були б неспроможні сформувавши сукцесійний ряд, і поступово, разом із руйнуванням клімаксових екосистем, відбулося б повне спустелювання планети. Значення різноманіття функціональне не тільки в статиці, а й у динаміці

*Закон ґрунтостомлення (зниження родючості):* поступове зниження природної родючості ґрунтів відбувається через тривале їх використання й порушення природних процесів ґрунтоутворення, а також внаслідок тривалого вирощування монокультур, накопичення токсичних речовин, виділених рослинами, залишків пестицидів та мінеральних добрив.

*Термодинамічне правило Вант-Гоффа – Арреніуса:* зростання температури на 10 °С призводить до 2–3-кратного прискорення хімічних процесів. Звідси впливає небезпека підвищення температури в біосфері внаслідок господарської діяльності людини.

*Закон збіднення живої речовини в її згущеннях (Г. Хільмі):* індивідуальна система, котра працює у середовищі з рівнем організації нижчим, ніж рівень самої системи, приречена: постійно втрачаючи структуру, система через деякий час розчиняється в навколишньому середовищі. Звідси впливає важливий висновок для природоохоронної діяльності: штучне збереження екосистем малого розміру (на обмеженій території, наприклад, заповідника, заказника) призводить до їх поступової деструкції і не забезпечує збереження видів та спільнот.

*Закон конкурентного витіснення Г. Гаузе* – конкуренція між видами на одній території тим сильніша, чим види ближчі за потребами у споживанні кормових ресурсів та просторі проживання.

*Узагальнені принципи функціонування екосистем Б. Небела (1993 р.):*

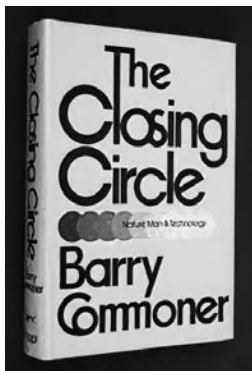
1) одержання ресурсів і позбавлення усіх відходів відбувається в межах колообігу всіх хімічних елементів;

2) екосистеми існують за рахунок сонячної енергії, яка не забруднює середовище, практично вічна і кількість якої відносно стала й надлишкова;

3) що більша біомаса популяції, то нижчий має бути трофічний рівень, який вона займає.

*Закони-афоризми Баррі Коммонера (В. Commoner, 1971):*

1. *Усе пов'язане з усім* – це закон про екосистеми і біосферу, звертає увагу на загальний зв'язок процесів і явищ у природі. Він покликаний застерегти людину від необдуманого впливу на окремі частини екосистем, що може призвести до непередбачених наслідків (наприклад, осушення боліт призводить до обміління річок).



Баррі Коммонер (1917 – 2012) – американський еколог, політик.

2. *Усе повинне кудись подітися* – це неформальне перефразування фундаментального фізичного закону збереження матерії. Немає безвідходних технологій. У природі і нема такого «геть», куди речі можна викинути; йдеться про існування колообігу елементів.

3. *Природа знає краще* – закон базується на розумінні розвитку життя на Землі, на природному відборі в процесі еволюції. Людство через технології хоче покращити природу, але така зміна у природній системі може бути руйнівна для неї. Людина – розумна, а природа – мудра.

4. *Ніщо не дається задарма* – це закон природокористування: платити треба енергією за утилізацію і очищення відходів, добривами і пестицидами – за підвищенням врожайності, ліками і санаторіями – за порушення здоров'я. Надмірна експлуатація природи неминуче передбачає перетворення ресурсів із корисних на непридатні.

Педагогічна цінність вищеназваних законів, правил і принципів полягає в тому, що вони системні, їх не можна змінити чи скасувати і можуть ефективно використовуватись фахівцями різних галузей знань для наукового і освітнього супроводу збалансованого розвитку системи «біосфера – суспільство».

## ЗАПИТАННЯ. ЗАВДАННЯ

---

1. Екологія як наука: визначення, предмет, структура (основні напрями) і завдання.
2. Екологічні фактори: їх класифікація, взаємодія.
3. Поняття навколишнє природне середовище.
4. Демекологія (екологія популяцій). Динаміка популяцій.
5. Синекологія як екологія угруповань. Біоценоз і біотоп.
6. Взаємовідносини між живими організмами в біоценозі.
7. Біогеоценоз як екосистема; його трофічна структура. Закон 10% Р. Ліндемана.
8. Біосфера як глобальна екосистема; суттєві ознаки, межі, склад (за В. Вернадським).
9. Біомні екосистеми (біоми): визначення, класифікація. Основні критерії виокремлення біомів.
10. Охарактеризуйте об'єкт, предмет і завдання біогеохімії.
11. Доробок яких учених ХІХ–ХХ ст. сприяв розвитку біогеохімії як науки?
12. У чому полягає сутність системного підходу в біогеохімії?
13. У чому полягає сутність інформаційного підходу в біогеохімії?
14. З'ясуйте сутність історичного (еволюційного) підходу до вивчення геохімічних процесів за участю живих організмів.
15. Чим вирізняється концепція В. Вернадського про геологічну роль організмів від попередніх уявлень натуралістів і вчених?
16. У чому полягає сутність біогеохімічних досліджень?
17. Охарактеризуйте роль і місце біогеохімічних знань у становленні екології.
18. Охарактеризуйте сутність основного закону геохімії В. Гольдшміда.
19. У чому полягає сутність біогеохімічного закону В. Вернадського (закону біогенної міграції атомів)?
20. Сформулюйте три біогеохімічні принципи В. Вернадського.
21. Яке значення принципу Ле Шательє – Брауна для еколого-геохімічних досліджень.
22. Охарактеризуйте сутність законів-афоризмів Баррі Коммонера.



## **2. БІОСФЕРА: ПОХОДЖЕННЯ, РОЗВИТОК, ОРГАНІЗАЦІЯ, СТАБІЛЬНІСТЬ. ГЕОХІМІЧНА РОБОТА ЖИВОЇ РЕЧОВИНИ**

### **2.1. Походження біосфери та місце людини в ній**

На три «вічні» питання – про походження Всесвіту, життя та людини намагаються дати відповідь різноманітні гіпотези і теорії, релігійні та філософські рефлексії. Науковці з різних сфер знання теж досліджують це питання. Сучасні наукові погляди на походження Всесвіту, життя та людини узгоджуються із трьома *критеріями науковості знань* – раціональності, верифікації і фальсифікації:

1) критерій раціональності полягає в тому, що основним засобом обґрунтування знань є розум. Наукові знання мають відповідати сучасному емпіричному (дослідному) і теоретичному рівням. Емпіричне пізнання зорієнтоване на збирання фактів, первинне узагальнення, опис дослідних даних, систематизацію і класифікацію. Теоретичне пізнання відображає предмети, властивості і відносини в аспекті універсальних внутрішніх зв'язків, істотних закономірностей, що досягнуті раціональним опрацюванням даних на основі таких форм мислення як поняття, судження, умовивід, закон, категорія та ін.;

2) критерій верифікації передбачає встановлення істинності наукового твердження шляхом емпіричної перевірки. Крім безпосередньої експериментальної перевірки тверджень існує опосередкована верифікація – встановлення логічних відношень між твердженнями;

3) критерій фальсифікації дає змогу спростувати науковість знань. Наукова істина конкретна у певних просторових і часових межах, за якими вона стає відносною. Відбір гіпотез відбувається тільки за рахунок наукової критики. Релігійні доктрини спростувати неможливо.

Практика життя людства дає підстави у ХХІ ст. вважати, що релігійний досвід віри і наукові знання розуму однаково рівноцінні, вони не протистоять одне одному. Наука й релігія принципово відрізняються предметною спрямованістю своєї діяльності. Краще чітко розмежувати сфери науки



й релігії: до компетенції релігії належить духовне, а до компетенції науки – матеріальне (речовина, поле, вакуум).

Створення єдиної *моделі природничо-наукової картини світу (ПНКС)*. ґрунтується на розумінні того, що природа не має поділу на суб'єкт і об'єкт, на дисципліни (фізику, астрономію, хімію, географію, геологію, біологію), тому з позицій теромодинаміки і синергетики некоректно розділяти ПНКС на фізичну, хімічну і біологічну картини. Такий підхід до побудови моделі необхідний для того, щоб ми могли знайти наукову відповідь на запитання: «Що було, коли нічого не було?», «Як і з чого все утворилося?», «Чи є людина вершиною біологічної еволюції?», «Чи може людина знищити життя на Землі?», «Які існують шляхи розв'язання екологічної кризи?» та ін. Для розуміння цілісної ПНКС важливим є знання про існування чотирьох фундаментальних взаємодій, які системно пояснюють прояви всіх взаємозв'язків в природних екосистемах.

*Гравітаційна взаємодія* визначає всесвітнє тяжіння, яке забезпечує феномен життя на планеті шляхом обертання Землі навколо власної осі і навколо Сонця, обертання Місяця навколо Землі. Гравітація є фізичним проявом властивості речовини – маси. Будь-які частинки (повітря, вода, живі організми тощо) утримуються біля поверхні планети завдяки гравітації.

*Електромагнітна взаємодія* (існування двох типів зарядів: позитивного і негативного) – важлива властивість матерії. Однакові заряди відштовхуються, різні – притягуються. Усі хімічні і біологічні процеси на планеті є прямими чи опосередкованими проявами електромагнітних взаємодій. Електричний заряд будує речовину, відповідає за формування атомів і молекул та за їхні властивості.

*Сильна взаємодія* – це внутрішньоядерні сили, які відповідають за зв'язок протонів і нейтронів в ядрі атома. Особливість цих сил – вони наділені значною енергією, яка утримує разом однойменно заряджені частинки – протони ядра атома. Найхарактерніший приклад енергії, що вивільняється сильною взаємодією – Сонце. У надрах Сонця і зірок безупинно протікають термоядерні реакції, що їх викликає сильна взаємодія. Людина навчилася використовувати сильну взаємодію: створена воднева бомба, відкриті та удосконалюються технології керованої термоядерної реакції.

*Слабка взаємодія* відповідає за перетворення елементарних частинок у мікросвіті із виділенням нейтрино. Такі реакції виявляються світінням Сонця і є його основним джерелом енергії. Енергія Сонця слугує рушійною силою біогенного колообігу атомів, яка трансформується живою речовиною автотрофних організмів в енергію хімічних зв'язків. Потік енергії створює трофічну структуру, видову різноманітність і біотичний колообіг хімічних елементів. Проявом слабкої взаємодії є бета-розпад і пов'язана з ним радіоактивність. Процеси слабкої взаємодії важливі для еволюції зірок.

Екологія і біогеохімія шукають на когнітивному рівні відповіді на конкретні запитання: як виникло те чи інше природне явище, яка його структура, механізми функціонування, генезис тощо.

## Походження і розвиток біосфери

Для побудови фундаменту моделі наукової картини світу притримуємося наукової точки зору, а саме: 1) матеріальний Всесвіт існував завжди і буде існувати завжди; 2) науці відомі три форми існування матерії – речовина, поле, вакуум; 3) народження матерії, часу і простору нашої планети відбулося в результаті Великого вибуху з точки безкінечно малого радіуса, надвеликої густини і температури; 4) після Великого вибуху розвиток планети відбувався у вигляді п'яти послідовних еволюцій (табл. 2.1): еволюції елементарних частинок; еволюції хімічних елементів; еволюції мінералів; біологічної еволюції живих організмів; соціальної еволюції (пов'язаною із появою і діяльністю людини).

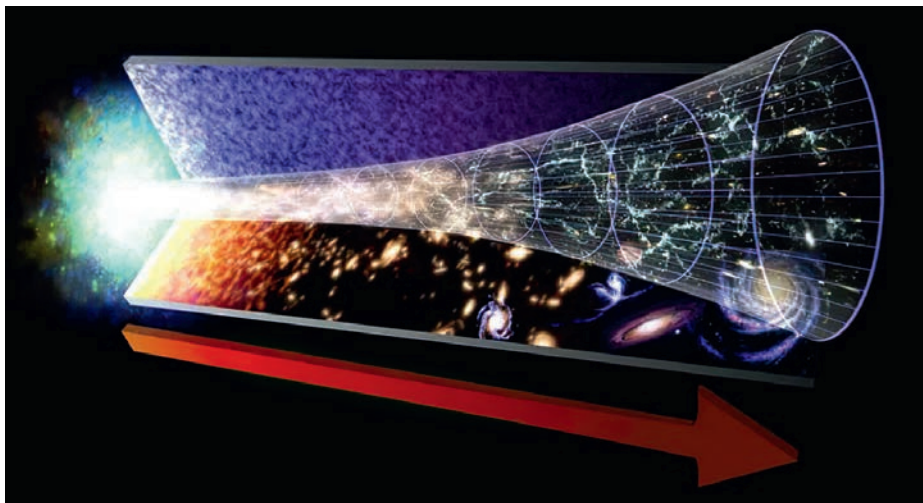
Таблиця 2.1

### Геохронологія еволюції Землі і біосфери

Ера нового життя <b>КАЙНАЗОЙ</b> 67 млн років – до сьогодні	Глобальна екологічна криза. Техносфера. Розвиток науки, культури. Розвиток ремесел, будівництво, селищ, міст. Постійний розвиток нейронних об'єднань головного мозку для запам'ятовування і переробки інформації. Розселення людини по всій планеті. Збирання, полювання, рибальство, землеробство, скотарство. <i>210-200 тис. років</i> – революційна поява людини розумної сучасної – кроманьйонця. <b>Соціальна еволюція людини розумної (<i>Homo sapiens L.</i>)</b> <i>700-40 тис. років тому</i> – на планеті існував неандерталець (поряд із кроманьйонцем); неандерталець – тупикова гілка роду <i>Homo</i> .
--	---

	<p>1,5 млн років тому – популяційний вибух роду Номо у вигляді архантропів – найдавніших людей: пітекантропа, синантропа, гейдельберзької людини та ін.</p> <p>Панування покритонасінних рослин, птахів, ссавців</p>
Ера середнього життя <b>МЕЗОЗОЙ</b> 230 – 67 млн	<p>100 млн років тому – остаточне формування біосфери як єдиної системи обміну речовини, енергії та інформації</p> <p>Перші квіткові рослини</p> <p>200 млн років – популяційний вибух наземних теплокровних тварин на суходолі</p>
Ера давнього життя <b>ПАЛЕОЗОЙ</b> 570 – 230 млн	<p>Поширення рептилій.</p> <p>300 млн років тому</p> <p>Перші наземні судинні рослини; наземні амфібії</p> <p>400 млн років тому – вміст кисню відповідає його рівню в сучасній атмосфері</p> <p>500 млн років тому – вихід рослин на суходіл</p> <p>Поява перших хордових.</p>
Ера раннього життя <b>ПРОТЕРОЗОЙ</b> 2,6 млрд – 570 млн років	<p>Починає формуватися озоновий шар у стратосфері</p> <p>Розквіт мікроорганізмів, водоростей, безхребетних і безчерепних. Початок ґрунтоутворюючого процесу на суходолі.</p> <p>1 млрд років тому – створюється окислювальна атмосфера (із низьким вмістом кисню у межах 3-4 %). Поява аеробних бактерій.</p> <p>Виникнення еукаріотичних (ядерних) організмів</p>
Ера найпершого життя <b>АРХЕЙ</b> 3,8 – 2,6 млрд років	<p>2 млрд років <i>поспіль</i> фотосинтезуючі прокариоти поступово збільшують кількість кисню в атмосфері Землі; утворюються відклади органічного походження (вапняки, графіт та ін.)</p> <p>Домінують одноклітинні прокариоти у відновлювальній атмосфері.</p> <p>3 млрд – поява перших фотосинтезуючих прокариот. Початок формування біорізноманіття біосфери.</p> <p>Жива речовина стає творцем і носієм біогеохімічної енергії на планеті.</p> <p>Поява перших анаеробних гетеротрофних мікроорганізмів.</p> <p><b>Біологічна еволюція</b> бере свій початок 3,8-3,6 млрд років тому.</p>
<b>П О Ч А Т О К</b>	<p>4 млрд років <i>тому</i> – створення умов для появи життя на Землі.</p> <p><b>Еволюція мінералів</b></p> <p>Утворення планети Земля близько 4,6 млрд років <i>тому</i>.</p> <p><b>Еволюція хімічних елементів:</b> термоядерні реакції синтезу усіх елементів з Гідрогену і Гелію.</p> <p>Утворення Сонця близько 5 млрд років <i>тому</i>.</p> <p>Утворення Сонячної системи з протопланетної речовини-туманності, яка оберталася і стискалася</p> <p><b>Еволюція елементарних частинок</b></p> <p>13,8 млрд <i>тому</i> «<b>Великий вибух</b>»</p>

**Еволюція елементарних частинок** почалася Великим вибухом приблизно 13,8 млрд років тому – прискореним розширенням (упродовж  $10^{-43}$  с) надгустої ( $10^{80}$  г/см<sup>3</sup>) і надгарячої ( $10^{27}$  К) точки Всесвіту розміром  $10^{-33}$  см. Результатом вибуху було утворення елементарних частинок, яких відомо майже 300 (кварків, фотонів, нейтрино, електронів, позитронів, протонів, нейтронів, кварків та ін.). Підкреслимо, що протон – це стабільна позитивно заряджена елементарна частинка атомного ядра будь-якого хімічного елемента.



**Мал. 11.** Теорія Великого вибуху (*Big Bang Theory*): увесь видимий Всесвіт утворився єдиним актом 13,8 млрд років тому і поширюється дотепер, що супроводжується охолодженням речовини і випромінюваннями. Про таке поширення свідчить зміщення спектральних ліній віддалених галактик у червону частину спектру («червоне зміщення»).

Отже, увесь видимий Всесвіт утворився єдиним актом і поширюється дотепер, що супроводжується охолодженням речовини і випромінюваннями. Про таке поширення свідчить зміщення спектральних ліній віддалених галактик у червону частину спектру («червоне зміщення»).

**Еволюція хімічних елементів** почалася після зниження температури з'єднання протонів з нейтронами з утворенням ядер важких ізотопів H, He. Термоядерні реакції утворення хімічних елементів з елементарних частин (протонів) відбуваються за надвисоких температур і тиску, які зумовлюють

зіткнення однойменно (позитивно) заряджених частинок, що відштовхуються. Таке «водневе згоряння» постійно відбувається на Сонці і забезпечує енергією біосферу для термодинамічної підтримки гомеостазу життя.

Сонце утворилося приблизно 5 млрд років тому; Земля – 4,6 млрд років. Дослідження хімічного складу Сонця методами спектрального аналізу точно встановило наявність 60 елементів: майже 75% маси займає  $H_2$ , приблизно 24%  $He$ , решта 1–2% припадає на інші елементи. Маса Сонця у 3350 разів перевищує масу Землі.

Процес перетворення Гелію на більш важкі ядра відбувався в надрах Землі за умов надвисоких температур (у межах  $10^8$  °C) та густини  $10^3$  г/см<sup>3</sup>:



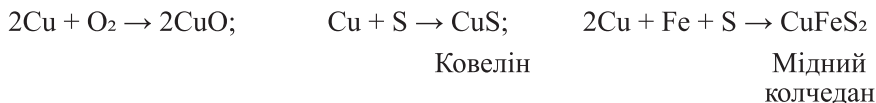
Отже, вихідним матеріалом для побудови усіх елементів періодичної системи хімічних елементів (мал. 12) був Гідроген.

Періодична система хімічних елементів Д.І. Менделєєва

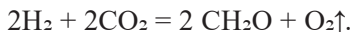
Період	Ряд	Г Р У П И																	
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII										
1	1	<b>H</b> Гідроген Водень 1,0079															<b>He</b> Гелій 4,0026		
2	2	<b>Li</b> Літій 6,941	<b>Be</b> Берилій 9,012	<b>B</b> Бор 10,81	<b>C</b> Корбон Вуглець 12,011	<b>N</b> Нітроген Азот 14,0067	<b>O</b> Оксиген Кисень 15,999	<b>F</b> Флуор Фтор 18,998	<b>Ne</b> Неон 20,179										
3	3	<b>Na</b> Натрій 22,990	<b>Mg</b> Магній 24,305	<b>Al</b> Алюміній 26,981	<b>Si</b> Силіцій Кремій 28,086	<b>P</b> Фосфор 30,973	<b>S</b> Сульфур Сірка 32,06	<b>Cl</b> Хлор 35,453	<b>Ar</b> Аргон 39,948										
4	4	<b>K</b> Калій 39,098	<b>Ca</b> Кальцій 40,08	<b>Sc</b> Скандій	<b>Ti</b> Титан 47,88	<b>V</b> Ванадій 50,941	<b>Cr</b> Хром 51,996	<b>Mn</b> Манган Маганець 54,938	<b>Fe</b> Залізо 55,847	<b>Co</b> Кобальт 58,933	<b>Ni</b> Нікель 58,71								
5	5	<b>Zn</b> Цинк 65,39	<b>Ga</b> Галій 69,72	<b>Ge</b> Германій 72,59	<b>As</b> Арсен Мідь ок. 74,921	<b>Se</b> Селен 78,96	<b>Br</b> Бром 79,904	<b>Kr</b> Криптон 83,80											
6	6	<b>Rb</b> Рубідій 85,468	<b>Sr</b> Стронцій 87,62	<b>Y</b> Ітрій	<b>Zr</b> Церквій 91,22	<b>Nb</b> Нобій 92,906	<b>Mo</b> Молибден 95,94	<b>Tc</b> Технецій									<b>Ru</b> Рутеній 101,07	<b>Rh</b> Родій 102,905	<b>Pd</b> Паладій 106,4
7	7	<b>Ag</b> Аргентум Срібло 107,868	<b>Cd</b> Кадмій 112,41	<b>In</b> Індій 114,82	<b>Sn</b> Станум Олово, чорн. 118,71	<b>Sb</b> Стибій 121,75	<b>Te</b> Телур 127,60	<b>I</b> Йод 126,905	<b>Xe</b> Ксенон 131,30										
8	8	<b>Cs</b> Цезій 132,91	<b>Ba</b> Барій 137,33	<b>*La</b> Лантан	<b>Hf</b> Гафній 178,49	<b>Ta</b> Тантал 180,948	<b>W</b> Вольфрам 183,85	<b>Re</b> Реній 186,207									<b>Os</b> Осмій 190,2	<b>Ir</b> Ірідій 192,22	<b>Pt</b> Платина 195,09
9	9	<b>Au</b> Аурум Золото 196,967	<b>Hg</b> Меркурій Ртуть 200,59	<b>Tl</b> Талій 204,37	<b>Pb</b> Плюмбум Свинець, олово 207,2	<b>Bi</b> Бісмут Висмут 208,980	<b>Po</b> Полоній 209	<b>At</b> Астат 210	<b>Rn</b> Радон 222										
10	10	<b>Fr</b> Францій	<b>Ra</b> Радій	<b>**Ac</b> Актиній	<b>U</b> Ураній	<b>Uq</b> Унілквадій	<b>Uo</b> Унілпентій	<b>Unh</b> Унілгексій	<b>Uns</b> Унілсептій								<b>Uno</b> Унілпентій	<b>Une</b> Унілпентій	<b>Uun</b> Унілпентій
		Висі оксиди	$RO_2$	$RO$	$R_2O_3$	$RO_2$	$R_2O_5$	$RO_3$	$R_2O_7$								$RO_4$		
		Легкі водні сполуки			$RH_4$	$RH_3$	$H_2R$	$HR$											
		<b>*Лантаноїди</b> 140,12	<b>Ce</b> Церій 140,28	<b>Pr</b> Прометій 140,907	<b>Nd</b> Неодим 144,24	<b>Pm</b> Прометій 144,9126	<b>Sm</b> Самарій 150,36	<b>Eu</b> Європій 151,964	<b>Gd</b> Гадоліній 157,25	<b>Tb</b> Тербій 158,925	<b>Dy</b> Диспрій 162,50	<b>Ho</b> Гольмій 164,93	<b>Er</b> Ербій 167,26	<b>Tm</b> Тулій 168,934	<b>Yb</b> Йттербій 173,04	<b>Lu</b> Лютецій 174,967			
		<b>*Актиноїди</b> 232,038	<b>Th</b> Торій 232,038	<b>Pa</b> Протактиній 231,036	<b>U</b> Уран 238,029	<b>Np</b> Нептуній 237	<b>Pu</b> Плутоній 244	<b>Am</b> Амеріція 243	<b>Cm</b> Курій 247	<b>Bk</b> Берклій 247	<b>Cf</b> Каліфорній 251	<b>Es</b> Ейнштейній 252	<b>Fm</b> Фермій 257	<b>Md</b> Менделєєв 258	<b>No</b> Нобелій 259	<b>Lr</b> Лоуренцій 260			

Мал. 12. Періодична система хімічних елементів.

Далі закономірно продовжувалася *еволюція мінералів* – утворення і перетворення оксидів, солей та найрізноманітніших речовин (у тому числі органічних) ще неживої планети, що є предметом вивчення геохімії та геології.



Походження кисню на планеті до появи фотосинтезу – окрема тема досліджень, гіпотез і обговорень. Зокрема, згідно з принципом Ле Шательє – Брауна гаряча планета могла синтезувати кисень задовго до появи фотосинтезу за схемою:



Кисень в дослідах утворюється з вуглекислого газу під дією ультрафіолету (*UV*) з довжиною хвилі 200 нм за схемою:



Така реакція може відбуватися у верхніх шарах атмосфери Землі, що викликає оптимістичні думки щодо існування природних механізмів пом'якшення наслідків зміни клімату ( $\text{CO}_2$  є парниковим газом).

Походження кисню на планеті могло бути пов'язане з процесами утворення гранітів у давній земній корі (на межі архею та протерозою – 2,9-2,5 млрд років тому), що супроводжувалося утворенням води, вуглекислого та чадного газів, виходом кисню в атмосферу або частковим розчиненням його у воді. В результаті – в атмосфері переважають окислювальні процеси, земна кора за своїм складом стає більш кислою, починається стрімке зростання гранітів.. Подальші геологічні процеси поступово ще додавали кисень в атмосферу і 400 млн років тому, його кисню наблизився до сучасного рівня. Отже, є підстави припустити, що кисневі атмосфери можуть виникати на планетах, подібних до Землі, де неодноразово проходило утворення гранітів (Летников А., 2002).

**Біологічна еволюція** почалася з появи екосистем анаеробних гетеротрофів-хемосинтетиків у сприятливих для цього умовах на Землі в археї як стверджує поширена еволюційна гіпотеза. Рештки перших живих організмів (віком 3,8 млрд років) дійшли до нас у вигляді так званих строматолітів – вапнякових решток синьо-зелених водоростей і актино-

міцетів, а також у вигляді осадових порід, у котрих шари  $Fe^{2+}$  чергуються з шарами окисненого  $Fe^{3+}$ .

Вільного кисню в атмосфері архею не було (або його вміст був мізерний). Така екосистема із самого початку еволюції була спроможна створити первинні біогеохімічні цикли, на кшталт «неорганічні сполуки → хемотроф першого порядку → гетеротроф → редуцент». Отже, часовий інтервал архею, а це 3,6–2,6 млрд років тому, можна вважати початком формування біосфери як системи (майже через один млрд років після виникнення планети Земля).

Ідея *вічності життя* наукова, оскільки в ній наявне функціональне ядро біології – живе походить від живого, як стверджував Франческо Реді (1626–1678), що закріплено положенням клітинної теорії – клітина походить від клітини, що доводив Рудольф Вірхов (1821–1902). У своїй праці «Про походження видів» Дарвін припустив, що усі органічні істоти, які коли-небудь жили на Землі, походять від деякої єдиної первісної форми. Такий підхід на молекулярному рівні підтверджується матричним принципом «ДНК – мітоз», який працює універсально і його важко спростувати.

Гіпотеза про виникнення живого з неживого (абіогенезу) (за О. Опаріним – Д. Холдейном) потребує критичного перегляду, оскільки існують такі аргументи проти неї:

1) гіпотеза абіогенезу не пояснює механізм появи інформаційної матриці – генетичного коду ДНК (або РНК) з позицій самоорганізації матерії. Це потрібно сприймати тільки на віру. Ген майбутнього покоління будується виключно на матриці гена попереднього покоління;

2) гіпотеза О. Опаріна – Д. Холдейна залишає відкритим питання про перехід коацерватних крапель до справжніх живих клітин. Якщо припустити, що «пробіонт» виник з неживого коацервату, то незрозуміло, як він вижив надалі, чи міг діяти природний добір при виникненні живого з неживого у «поживному бульйоні», де не було життя у вигляді сформованої екосистеми з її трофічним ланцюгом і боротьбою за існування? Прокаріоти з причин швидкого розмноження за короткий геологічний період вичерпали б біогени з цього середовища;

3) жива матерія за Луї Пастером (1822–1895) обов'язково складається тільки з хіральних чистих структур (оптичних ізомерів тільки одного класу:



«+» або «-»). Усі білки в природі побудовані виключно з лівообертаючих (-) L-амінокислот (відхиляють площину поляризації світла вліво); ДНК складається тільки з (+) D-рибози, що відхиляє світло вправо. Речовини небіогенного походження хіральні симетричні – «лівих» і «правих» молекул в них порівну. Хіральна чистота є необхідною умовою для реплікації ДНК, обумовлює специфіку живого, свідчить про практичну неможливість отримання живого з неживого та існування якісної межі між живим і неживим.

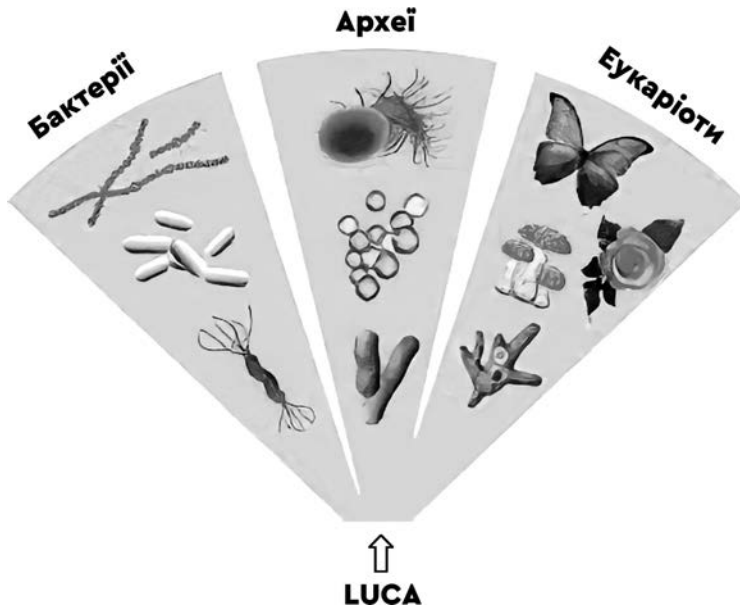
В. Вернадський у праці «Біосфера» стверджував, що «...живий організм ніколи і ніде не походив з космої матерії і в історії Землі не було взагалі геологічних епох, позбавлених життя». Нікому не вдалося відтворити живе з неживого в експерименті. Вчений говорить, що геологічно у всіх вивчених шарах Землі спостерігаються сліди життя. Архейські гірські породи (піщаники, вапняки, графіти) свідчать, що в цей період відбувалися процеси вивітрювання, ерозії завдяки енергійній дії живих організмів. Якби життя не було, писав вчений, ці процеси йшли б іншим шляхом. У геологічні ери все живе на Землі бере початок від живого, але геологічні ери не охоплюють усієї історії Землі. Був ще космічний період, і тоді планета була іншою. В. Вернадський наголошував, що життя з'явилося в космічні періоди літопису Землі, а не в геологічні.

Варто зазначити, що синтетична теорія еволюції (СТЕ) вважається незакінченою, оскільки: 1) бездоказово поширює механізми і закономірності мікроеволюції на макроеволюційні процеси; 2) не торкається еволюції мікроорганізмів, котрі є найпоширенішими формами життя на планеті (дарвінівське уявлення базувалось виключно на дослідження тварин і рослин; одноклітинні еукаріоти і прокаріоти не враховані); 3) горизонтальний перенос генів серед прокаріот та одноклітинних еукаріот – важлива складова еволюції; 4) СТЕ навіть не намагається звернутися до питання походження життя (С. Кунін, 2013). Прокаріот почали розглядати з еволюційної точки зору після виходу у 1987 році революційної роботи Карла Вьозе (C. Woese, 1987).

Карл Вьозе (1928–2012) є фундатором філогенетики і першовідкривачем домена *Археї* (*Archaea*). Вчений встановив, що: в послідовності нуклеотидів рРНК усіх форм життя виявляється очевидна консервативність; ця універ-



сальна консервативна молекула еволюціонує з постійною швидкістю, тобто підкоряється моделі молекулярного годинника. Саме шляхом порівняльного аналізу рРНК різних груп бактерій був відкритий домен Археї (ця група мала якісні відмінності від інших бактерій та еукаріот). Подальші дослідження консервативних білків (рибосомальних білків, факторів трансляції, субодиниць ДНК-залежної РНК-полімерази, мембранних АТФ-аз) дозволило зробити важливе відкриття кінця ХХ ст., – *тридоменне дерево життя* – Бактерії, Археї, Еукаріоти (С. Woese, 1990). Сьогодні вченими консенсусно приймається, що в основі «Дерева життя» знаходиться *останній універсальний спільний предок* (англ. *LUCA – Last Common Universal Ancestor*) – гіпотетичний загальний предок всіх живих організмів, що нині існують на Землі. Жив цей про біонт приблизно 3,8–4,0 млрд років тому (мал. 13). І хоча LUCA не представлений у скам'янілостях, вчені можуть робити висновки щодо його особливостей на основі аналізу універсальності генетичного коду сучасних організмів.



**Мал. 13.** Сучасна наукова гіпотеза походження життя. В основі «Дерева життя» знаходиться т.з. «останній універсальний спільний предок» (*last universal common ancestor, LUCA*). Жив цей про біонт приблизно 3,8-4,0 млрд років том.

Отже, коректно говорити не про виникнення життя на Землі, а про створення умов на планеті для появи на ньому матриці життя, що відбулося майже 4 млрд років тому. Жива речовина спочатку у вигляді анаеробних гетеротрофних прокариотів-хемосинтетиків упродовж одного мільярду років синтезувала органічну речовину за рахунок енергії хімічних реакцій (кисень при хемосинтезі не виділяється). Прикладом таких організмів-хемосинтетиків є нітрофікуючі бактерії (*Nitrosomonas*, *Nitrosospira*), які й нині поширені в ґрунтах та водоймах. Вони добувають енергію шляхом окиснення амоніаку та нітратної кислоти, тому відіграють важливу роль у колообігу Нітрогену в екосистемах.

Приблизно 3 млрд років тому з'явилися перші фотосинтезуючі мікроорганізми, що дало змогу живій речовині ще активніше виконувати місію творця і носія біогеохімічної енергії Сонця. Поява автотрофів-продуцентів засвідчило ослаблення еволюційної ролі геохімічної енергії та посилення значення живої речовини і сонячної складової у глобальному енергобалансі біосфери. Жива речовина фотоавтотрофних організмів здійснює поглинання сонячної енергії та її перетворення в енергію хімічних зв'язків. Упродовж майже двох мільярдів років архею жива речовина шляхом фотосинтезу поступово збільшувала в атмосфері концентрацію кисню (у протерозої вона становила вже 3–4%). Атмосфера стала окиснювальною.

Автотрофна еволюція поглибилась із виникненням багатоклітинних організмів, які забезпечували більшу стабільність екосистем. Почався розквіт аеробних мікроорганізмів, водоростей, безхребетних і безчерепних; нагромаджувалися донні відклади в морях і океанах; з'явився озоновий екран, який захищає усе живе від згубного УФ-випромінювання і дає змогу здійснити вихід живих організмів на суходіл (приблизно 500 млн років тому).

Світовий океан – найдавніша природна система, в якій постійно здійснюється процес обміну та трансформації енергії, речовини та інформації на планеті. Унікальність океану є синергетичним проявом об'єднання різних фізичних, хімічних та біологічних процесів в єдину екосистему. Упродовж еволюції Землі природа Світового океану неодноразово змінювалась під дією різних процесів: сонячного випромінювання, геологічних та геохімічних факторів і, що особливо важливо, під впливом геохімічної

роботи живої речовини. Цей чинник дотепер виявляється у розмноженні і розвитку живих організмів, засвоєнні сонячної енергії та накопиченні вільної енергії у самих тілах організмів, біологічній продуктивності та утворенні осадів по всій площі дна Світового океану, формуванні різних органогенних мулів.

В океанах широко поширені біоценози азотфіксуючих мікроорганізмів (діазотрофів), які впливають на колообіг N, C, і тим самим регулюють продуктивність біосфери (Bonnet, S. et al., 2023).

Без уявлення про еволюцію біосфери з геологічного погляду не можна уявити вплив живих організмів на літосферу, формування геологічних відкладів. В. Вернадський писав, що граніти – це минулі біосфери, оскільки дослідження розповсюдження Карбону у первинно-осадових породах довели, насамперед, його біогенний характер. Наявність біогенного Карбону зареєстрована у породах усіх епох та усіх щитів світу. Отже, еволюційний процес живої речовини безперервно охоплює біосферу упродовж усієї геохронології Землі і відображається в її неживих тілах. Причому, чим більше організми впливають на середовище біосфери, тим інтенсивніше відбувається їхня еволюція. На основі цього явища можна стверджувати, що змінюється, еволюціонує біосфера загалом, а не тільки її частини; еволюція видів переходить в еволюцію біосфери.

400 млн років тому у палеозої вміст кисню вже відповідав його рівню в сучасній атмосфері. Спостерігався розквіт наземних судинних рослин, амфібій. Живі організми разом із косною речовиною поступово формують біокосну речовину – ґрунт. Біогенна міграція атомів почала домінувати, а надлишковий Карбон атмосфери інтенсивно депонувався у вигляді нині існуючих горючих копалин. Біогенне походження мають майже усі гази біосфери ( $O_2$ ,  $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NO_2$ ), як і викапні види палива (вугілля, нафта, торф, сланці). Енергетика біосфери почала наближатися до сучасних параметрів.

Остаточне формування сучасних параметрів біосфери як єдиної системи обміну речовини, енергії та інформації відбулося 100 млн років тому. Почалося панування покритонасінних рослин, птахів і ссавців. Надалі нарощування кількості таксонів організмів майже не відбувалося, що є наслідком обмеженого числа екологічних ніш і відповідає *принципу конку-*

рентного виключення Г. Гаузе (1934): два види із близькими екологічними потребами тривалий час неспроможні займати однакову екологічну нішу, входить до однієї екосистеми.

**Соціальна еволюція** пов'язана з антропогенезом на планеті. Діяльність людини поступово приводить до гомогенізації біосфери. Це означає, що людина все більше перебудовує природні екосистеми, перетворює їх на штучні агросистеми, одноманітні за біогеохімічним характеристикам культурні ландшафти. Ступінь замкнутості біогеохімічних циклів при цьому знижується. Це є однією з причин накопичення в біосфері (особливо в атмосфері) різних домішок, які природнім шляхом раніше утилізувалися біотою.

Можна окреслити такі загальні тенденції еволюції біосфери: поступове збільшення її продуктивності і біомаси; накопичення акумульованої сонячної енергії у поверхневих ґрунтових і рослинних оболонках планети; збільшення інформаційної ємності біосфери за рахунок зростання біорізноманіття, збільшення кількості геохімічних бар'єрів та диференційованості фізико-географічної структури біосфери; посилення біогеохімічної функції живої речовини та поява у неї нових функцій; збільшення ролі живої речовини і продуктів її життєдіяльності в геологічних, геохімічних та фізико-географічних процесах, тобто посилення перетворювального впливу життя на атмосферу, гідросферу і літосферу; розширення сфери дії біогеохімічного колообігу та ускладнення його структури. До цього переліку необхідно додати антропогенний вплив і можливу нисхідну гілку еволюції біосфери. Адже системи, що еволюціонують, не є вічними, тобто мають «початок» і «кінець».

Антропогенний вплив на біосферу приводить до зворотних процесів, – знижується її біомаса, продуктивність та інформаційна ємність; змінюється характер акумуляції сонячної енергії в поверхневих оболонках планети, зменшується біологічне і ландшафтне різноманіття та ін. Тому закономірності еволюції біосфери слід розглядати як у прогресивному, так і регресивному аспектах. Науковці навіть обговорюють думку, що всю історію розвитку біосфери Землі можна поділити на два періоди: перший – до появи людини розумної; другий – коли вид *Homo sapiens* активно заявив про своє незалежне від природи існування. За аналогією із християнською релігією пропонують створити відповідні позначення

часу: «before human being (b.h)» (до появи людини) та «after human being (a.h)» (після появи людини).

Оскільки стан сучасної біосфери залежить від діяльності людини як потужної геологічної сили, доцільно розглянути наукові погляди на походження людини та її роль у біосфері.

## Походження людини та її роль в біосфері

Людина є біопсихосоціальним феноменом – біологічною, соціальною і психологічною (духовною) істотою одночасно. Психологічна складова виконує роль регулятора-посередника між біологічними та соціальними потребами і діями. Людина має тіло ссавця, тому традиційна матеріалістично-еволюційна наука на основі досліджень викопних решток вважає, що людина походить з тваринного світу, а саме – від доісторичних приматів, нащадками яких є також сучасні мавпи. Досі археологи не знайшли відсутньої ланки – останків істоти, яка зробила перший крок від мавпи до австралопітеків.

Першими, хто дав початок людській цивілізації, були австралопітеки. Їм на зміну прийшли архантропи – представники роду *Homo*: *Homo habilis* (людина вміла), *Homo erectus* (людина прямоходяча, до якої належать пітекантроп і синантроп, гейдельберзька людина), потім палеоантроп – неандерталець (*H. Neanderthalensis*). Проблема межі між австралопітеками і давніми людьми залишається дискусійною. За сучасними уявленнями, ніхто з цих істот не є прямим предком кроманьйонця (тобто сучасної людини *Homo sapiens*). Зокрема, неандертальці – це самостійний вид, тупикова гілка еволюційного дерева людини, хоча вони існували на планеті поряд з кроманьйонцями ще 200–40 тис. років тому. Кроманьйонці були не фізично сильнішими, а розумнішими, винахідливішими, з розвиненим абстрактним мисленням, тому винищили неандертальців.

Між палеоантропом (неандертальцем) і неоантропом (людиною сучасного типу) спостерігається виражений революційний стрибок не тільки біологічного типу (високий зріст, прямий високий лоб, відсутність надочних валиків, наявність виступаючого вперед підборіддя, більш тривалий період дитинства та ін.), а й матеріальної та духовної первісної культури,

про що свідчать фундаментальні дослідження англійського етнографа та історика культури Едварда Тайлора (1832–1917). Як наголошував генетик Микола Петрович Дубінін (1901–1993), біологічна еволюція людини аж ніяк не є наслідком її суспільно-трудова діяльності, оскільки результати цієї діяльності не могли «записуватися» в генах. Можна стверджувати лише про можливість навчання та інших форм соціального успадкування.

Нові дослідження знахідок кістяків австралопітеків та їх викопних слідів у «колисці людства» – Африці – свідчать про те, що ці мавпоподібні істоти ще 4,5–3,5 млн років тому почали ходити прямо, тобто за мільйони років до того, як *Homo habilis* почала виготовляти перші знаряддя праці. Фактично це суперечить загальноприйнятому в традиційних підручниках з біології еволюційно-матеріалістичному погляду, що перехід на задні кінцівки звільнив передні для знарядь праці.

Існує гіпотеза, що кардинальна перебудова організму найдавніших гомінід відбувалася завдяки швидким змінам клімату в зоні, де вони мешкали. Різка похолодання буцімто привело до заміни лісів саваною, що змусило гомінід злізти з дерев і стати на ноги. Однак сучасні дослідження свідчать, що великих і різких змін клімату та рослинності в часи, коли людина могла виділитися з тваринного світу, не було. Похолодання та зледеніння сталися значно пізніше, коли людина вже була *Homo sapiens* у сучасному вигляді. У місцях найдавніших знахідок гомінід (Східна Африка) за останні кілька десятків мільйонів років будь-яких істотних змін клімату не було, ділянки лісів і саван не мінялися місцями. Кліматична гіпотеза також не може пояснити, чому дерева полишили лише гомініди, а їх «брати»-шимпанзе досі сидять на гілках.

Зрештою, самі по собі зміни клімату не можуть вплинути на спадковість, призвести до мутацій та кардинальної перебудови організму. Спадковість змінюють мутагенні чинники – іонізуюча радіація, сильнодіючі хімічні речовини. Саме в Східній Африці тривалий час існують радіоактивні природні чинники – радіоактивні виверження вулканів, великі родовища уранових руд. Вони вийшли на поверхню внаслідок активних горотвірних процесів (розломи земної кори, підняття, землетруси) у зоні Східноафриканського рифту, де і знайдено кістяки гомінід. Горили і шимпанзе жили і живуть західніше, за межами рифтової зони.

Учені-антропологи для розшифрування генеалогічного дерева людини використовують інформацію, що закодована у макромолекулах нуклеїнових кислот. *Молекулярна археологія* – наука про молекулярну еволюцію, генетичну історію біорізноманіття на планеті. Відомо, що крім ДНК ядерних хромосом у клітинах є позахромосомна спадковість – ДНК мітохондрій, яка успадковується лише по материнській лінії, тобто від матері до дочки. Ця генетична інформація досить консервативна і змінюється внаслідок випадкових мутацій. Порівняння мітохондріальної ДНК викопних решток предків людини різних регіонів свідчать, що найстарша ДНК – африканська (150–200 тис. років), згодом азійська – майже 100 тис. років і наймолодша – європейська (40–50 тис. років). Саме аналіз мітохондріальної ДНК засвідчив – жоден з архантропів і палеоантропів не є прямим предком кроманьйонця. Отже, цілком ймовірна теорія моногенізму, яка стверджує, що перша людина з'явилася і мешкала саме в Африці; міграція (розселення) людей відбувалося з Африки в Азію, а вже потім – в Європу; расові відмінності людей, зокрема колір шкіри, виникли відносно недавно. Хоча існує *теорія полігенізму* про незалежну появу людини в різних місцях Землі.

Еволюція людини незвичайна і не вкладається в біологічні межі, окреслені теорією Ч. Дарвіна. На відміну від інших організмів, людина не пристосовується до природи, а відокремлюється від неї. Знаряддя праці, різні види зброї, вогонь, одяг, синтез нових речовин, що не існують в природі, добування корисних копалин тощо – це ті прийоми, за допомоги яких вона відокремлюється від навколишнього природного середовища, створює власне штучне. Тому людині-кроманьйонцю не було потреби змінювати свій організм, і фізична еволюція практично не відбувалася. Крім того, людина вбиває людину не з біологічних причин (за моральні цінності, віру, мову), тобто заперечує еволюційний закон біологічного виживання виду – внутрішньовидове знищення у природі недоцільне, це, фактично, самознищення. З усіх живих істот Землі тільки людина залишає після себе хімічне і фізичне «сміття», що забруднює довкілля (у природі все поглинається і трансформується в трофічних ланцюгах), знищує власне середовище існування, власну екологічну нішу.

Людина поставила себе над природою, її діяльність ігнорує швидкість природних процесів. Людська популяція поводить як монокультура, що

витрачає без відновлення необхідні для власного існування ресурси та отримує відходами виробництва навколишнє середовище. Тим самим людина нібито «вилучила» себе з екології, порушивши допустимі, прийнятні норми власної поведінки в біосфері як глобальній єдиній системі.

Людина традиційно є складовою системи живої речовини, світу природи, водночас володіє винятковою соціальною сутністю і здатністю змінювати біогеоценози планети. Отже існує суперечність – якщо людина є частиною системи живої речовини, то чому частина знищує систему? Адже жодна тварина не знищує власне середовище існування.

Відносинам людського суспільства і природи присвячено праці В. Вернадського «Біосфера», «Наукова думка як планетне явище», «Автотрофність людства», «Декілька слів про ноосферу» та ін. Він дійшов висновку про принципову нову роль антропогенного чинника на планеті. Логіка історичного розвитку цивілізації виявилася такою, що в суспільній свідомості міцно закріпилася парадигма людської винятковості, для якої характерними є антиекологізм і соціальний оптимізм, оскільки саме соціально-економічні й культурні, а не природні термодинамічні закони навколишнього середовища визначають діяльність людини.

Сучасний український філософ О. Базалук доповнив концепцію В. Вернадського щодо структури матеріального світу: від космої і живої речовини відмежовується третій стан матерії – розумна речовина. Учений розвинув теоретичні дослідження А. Бергсона, підтримав концепцію цефалізації Д. Дана, згідно з якою розвиток тварин відбувається в напрямі ускладнення нервової системи від нижчих організмів до вищих, а взаємозв'язок між людиною і природою здійснюється на рівні нервових клітин. Отже, місцем основних еволюційних змін розумної речовини є нейрофізіологія головного мозку. Еволюція людини – це перехід від домінування біологічного компонента до пріоритетності психічного. Тому про антропогенез недостатньо судити на підставі палеонтологічних знахідок, які відтворюють лише онтогенетичні зміни анатомії тіла. Автор вбачає в людині не наслідок еволюції мавпи, а якісно новий стан матерії. Еволюція психіки є першопричиною змін як у суспільних відносинах, так і у перетвореннях природи у планетарному масштабі.

Фізіологи й антрополози наголошують на дивній особливості мозку людини: потенційні його можливості значно перевищують фізіологічні потреби



організму. Розвиток мозку перших гомінід відбувався набагато швидше, ніж того потребували зміни умов середовища. Сучасного рівня мозок людини досяг приблизно 200 тис. років тому, задовго до виникнення цивілізації (майже 10 тис. років тому). Нейрофізіологи вважають, що мозок сучасної людини використовує лише 2% своїх потенційних можливостей, причому такий рівень притаманний непересічним, геніальним особистостям. Але еволюція не створює нічого зайвого, такого, що не зумовлено природними умовами і потребами самого організму. Важко уявити, яких висот сягнув би *Homo sapiens*, якби його мозок використовував свої можливості хоча б наполовину. Ймовірно, що еволюція заздалегідь передбачила майбутні потреби людини і наділила його таким «комп'ютером», головні вузли якого ще заблоковано. За аналогією з принципом Реді – Вернадського, що жива матерія може бути створена лише живою матерією, логічно припустити, що й Розум міг створити лише інший Розум.

Екологічні проблеми – це проблеми людини, а не біосфери. Природний перебіг біогеохімічних циклів біосфери постійно змінювався внаслідок діяльності якісно нового стану матерії – людського суспільства – і нині доходить до певної межі. За цією межею – точкою біфуркації – біосфера перейде у інший стан, в якому екологічна ніша людини буде порушена і почне заповнюватися іншими адаптованими до неї організмами. Тому суспільство має бути зацікавлене в такому ставленні до довкілля, аби сприяти збереженню біосфери як умови виживання і розвитку самого суспільства. Сучасне людство єдине і має знайти шляхи переходу в «сферу розуму» – ноосферу, яка є ідеальною моделлю майбутнього.

## 2.2. Будова, склад та межі біосфери

Вперше термін «біосфера» з'явився у 1875 р. у праці австрійського геолога Едуарда Зюсса (1831–1914) «Виникнення Альп» і з тих пір до публікацій В. Вернадського майже не використовувався. Е. Зюсс, з яким В. Вернадський був знайомий особисто, писав: «Одне здається чужорідним на цьому великому, що складається зі сфер, небесному тілі, а саме – органічне життя... На поверхні материків можна виділити самостійну біосферу. Вона простягається тепер як над сухою, так і над вологою поверхнею, але

зрозуміло, що раніше вона була обмежена тільки гідросферою». Пізніше, у 1909 р., у праці «Лик Землі» Е. Зюсс називав біосферою «сукупність організмів, яка обмежена в просторі й у часі та мешкає на поверхні Землі», де вчений-геолог не сформулював поняття «біосфера», визначивши, однак, геологічне місце життя.

Натураліст Жан-Батист Ламарк (1744–1829) запропонував термін «біологія», хоча впритул підійшов до поняття біосфери і усвідомлення планетарної ролі життя. У Ж.-Б. Ламарка обґрунтована ідея впливу на земну кору живих організмів.

Значний внесок у розроблення сучасного розуміння біосфери зробив знаменитий німецький натураліст-енциклопедист Олександр Гумбольдт (1769–1859). Він уперше у фундаментальній праці «Космос» розглянув Землю як єдину систему, у якій в нерозривному зв'язку перебувають неорганічний світ і живі організми. В. Вернадський високо оцінив ці погляди О. Гумбольдта, вважаючи, що він наблизився до розуміння геохімічної концепції нашого часу, згідно з якою жива речовина розглядається як нерозривна і закономірна частина поверхні планети, невіддільна від її хімічного середовища.

Основоположником вчення про біосферу є В. Вернадський. Вчений обґрунтував високу геологічну та хімічну активність живої речовини біосфери, наголошуючи, що розвиток життя на планеті забезпечується специфічними фізичними властивостями біосфери. Він першим назвав ґрунт «біокосним тілом», оскільки чітко уявляв, що у жодному природному утворенні немає такого тісного взаємопроникнення й взаємодії живих організмів та неживої речовини, як у ґрунті. Є підстави вважати, що саме поглиблене вивчення ґрунтів як частини біосфери, яка максимально насичена життям, стало одним з перших кроків у розробленні В. Вернадським концепції живої речовини. Поняття «жива речовина» як сукупність організмів, що існують у біосфері, було вперше запропоноване вченим у статті, присвяченій ролі організмів у ґрунтоутворенні (1919).

На підставі узагальнення здобутків багатьох наук (біології, геохімії, географії, екології) та філософських концепцій можна сформулювати такі *суттєві ознаки біосфери*:

1) це єдина планетарна система, у межах якої активно існує жива речовина;

2) вона злита з іншими геосферами Землі і охоплює: нижню частину атмосфери (від рівня моря до висоти 10–25 км), усю гідросферу та верхню частину літосфери (до глибини 5 км на суходолі та 0,5–2,0 км під дном океану). Товщина біосфери на полюсах Землі сягає 10 км, на екваторі – 28 км. Межі біосфери в атмосфері лімітовані наявністю жорсткого короткохвильового ультрафіолетового випромінювання, від якого життя захищається озоновим шаром.

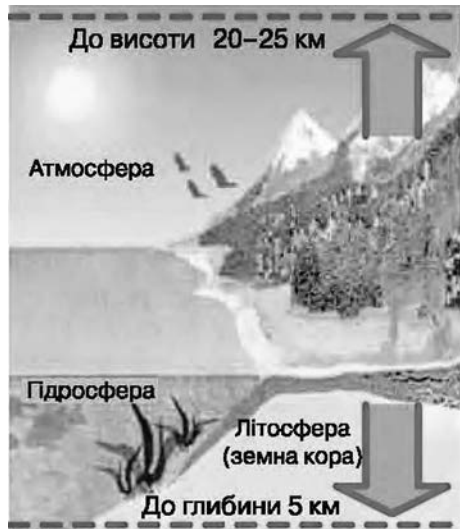
У літосфері критичну межу визначає термічний фактор Землі (гірських порід і підземних вод), оскільки вище певних температурних режимів життя існувати не може;

3) біосфера – результат взаємодії біотичних та абіотичних компонентів, акумуляції та перерозподілу величезної кількості енергії, речовини та інформації у просторі і часі. Склад, будова та енергетика біосфери зумовлені минулою і сучасною життєдіяльністю усіх живих організмів;

4) це термодинамічно відкрита гомеостатична система, здатна до самоорганізації і саморегулювання;

5) біосфера – глобальна екосистема; вона ієрархічно складається з екосистем нижчих рівнів (біомів, біогеоценозів), які постійно взаємодіють між собою, створюють і підтримують разом біогеохімічний колообіг атомів хімічних елементів та речовин у межах біосфери. Такий колообіг є головним механізмом, що визначає єдність і цілісність біосфери.

Стан сучасної біосфери залежить від діяльності людини як потужної геологічної сили (за В. Вернадським). Оскільки біосфера є матеріальною основою існування цивілізації, то розумна діяльність людини – це канал можливої еволюції біосфери в ноосферу.



Мал. 14. Межі біосфери.

Вказані погляди і міркування вчених про біосферу та її сутність демонструють різні аспекти вивчення цієї екосистеми і складність її визначення.

Біосфера сформована з різних речовин. За В. Вернадським, виокремлюють шість основних речовин біосфери:

1) жива речовина – представлена організмами різних видів, їх біомасою та специфічним хімічним складом;

2) біогенна речовина – продукт життєдіяльності організмів (кам'яне вугілля, торф, горючі сланці, нафта);

3) нежива (косна) речовина, в утворенні якої живі організми не приймали участі (гірські породи, мінерали);

4) біокосна речовина – сформована за рахунок взаємодії живої та косної речовин (грунт, кора вивітрювання, поверхневі води, атмосфера, вапняки, мули водойм). Для усіх представників біокосної речовини характерна єдина геохімічна сутність – процеси розкладання органічних речовин мікроорганізмами із утворенням хімічно активних сполук ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , органічні кислоти). Ця речовина є джерелом потужної потенційної енергії;

5) радіоактивна речовина, що утворюється внаслідок розпаду радіоактивних елементів;

б) космічна речовина (метеорити).

Вивчення структури і функцій біосфери продовжується, що важливо для побудови моделі наукової картини світу.

## **2.3. Жива речовина. Геохімічна робота живої речовини**

*Жива речовина* (за В. Вернадським) є сукупністю усіх живих організмів, їх біомаси та хімічного складу. Організми, своєю чергою, групуються в таксони (мал. 15).

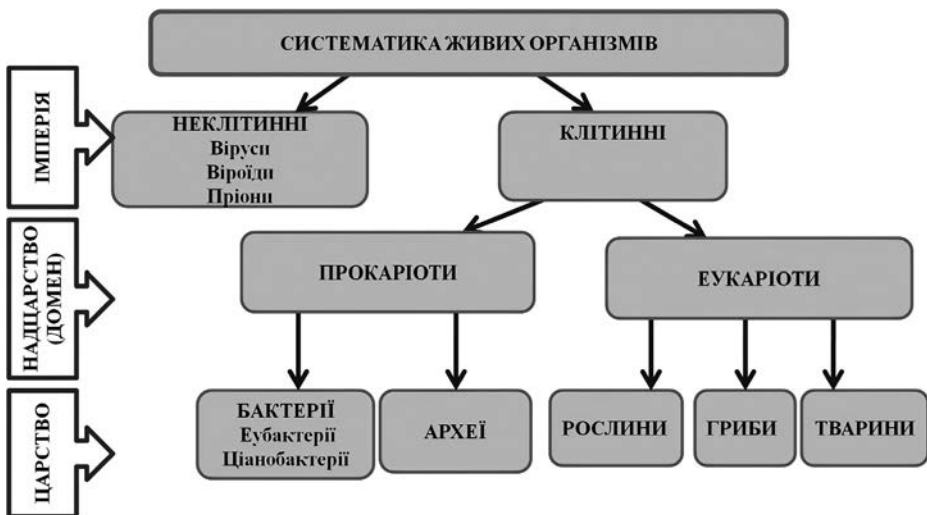
Сучасній науці відомі такі цифри:

1) загальна маса живої речовини становить за різними оцінками від 2,4 до  $3,6 \cdot 10^{12}$  т, тобто 0, 00001% земної кори ( $2,8 \cdot 10^{19}$  т);

2) загальна кількість існуючих видів на Землі – приблизно 1,7 млн. Багато видів досі не вивчені, їх за різними оцінками може бути до 30 млн.

Серед них переважають одноклітинні тварини, нижчі рослини і гриби, бактерії. Зокрема, в 1 г ґрунту може бути до 10 млрд мікроорганізмів;

3) хімічний склад живої речовини представлено біогенними елементами, серед яких переважають С, N, H, O, P, S, K, Na, Ca, Mg, Cl, Fe, Si.



Мал. 15. Жива речовина є сукупністю усіх живих організмів: систематика.

*Геохімічна робота живої речовини* забезпечується енергією Сонця і виявляється у:

- мобілізації з геосфери біофільних і супутніх хімічних елементів із подальшим їх концентруванням в біосфері;
- колообігу хімічних елементів і мінеральних речовин в біосфері;
- синтезі (шляхом фото- і хемосинтезу), накопиченню й трансформації органічної речовини; створенні нових тіл.

Особливістю історії живої речовини В. Вернадський вважав її утворення з газів і перетворення після смерті знову у газу ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  – водяна пара та ін.).

Живій речовині притаманна висока резистентність до несприятливих умов. Зокрема, деякі бактерії можуть існувати в атомних реакторах за високих доз проникаючої радіації, витримувати високі температури

(понад 100 °С), дуже кисле (рН = 1) чи мінералізоване солями (> 290 г/л) середовище, тиск вище 1000 атм.

Основна маса живої речовини зосереджена на межі літосфери і гідросфери та у верхній частині гідросфери, що свідчить про «згущення життя» і «розрідження життя». Зокрема, із наближенням до екватора від полюсів спостерігається збільшення кількості видів (у вологих тропіках росте половина усіх відомих на планеті видів рослин (маже 8 тис.), 67% усіх видів тварин, тоді як у тундрі менш ніж 500 видів рослин, у хвойних і листяних лісах – до 2000 видів рослин). Океан бідніший на живу речовину – біомаса Світового океану в 1000 разів менша від біомаси суші. Загальна первинна продуктивність фітопланктону Світового океану становить 50 млрд т на рік, тобто приблизно третина всієї первинної продукції біосфери. Найбільша щільність життя в океані, як і на суходолі, – в екваторіальному поясі, особливо в коралових рифах.

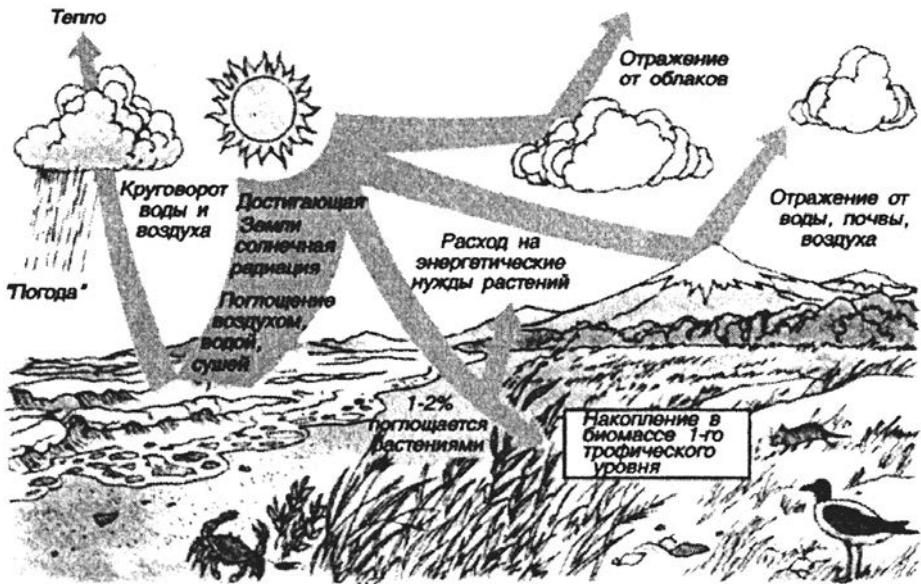
Жива речовина поширюється земною поверхнею внаслідок розмноження організмів, створює певний тиск у навколишньому середовищі, долає перепони, що перешкоджають її рухові і намагається заповнити весь можливий простір. В. Вернадський називав це явище «розтіканням» живої матерії, її «прагненням до всюдності». У свою чергу, розмноження є лімітуючим фактором, що перешкоджає необмеженому поширенню організмів.

Жива речовина пов'язана з середовищем біогенним колообігом речовин і атомів хімічних елементів. Біогенна міграція характеризується накопиченням хімічних елементів у живих організмах, а також їх вивільненням у результаті розкладу мертвих організмів. Накопичення речовин і хімічних елементів відбувається у такий спосіб: рослини здійснюють цей процес за допомогою фотосинтезу і мінерального живлення; бактерії-хемосинтетики – хемосинтезу і мінерального живлення; гриби, тварини – за рахунок гетеротрофного живлення; віруси є паразитами на генетичному рівні, тобто гетеротрофами. З поглинутих атомів жива речовина утворює складні, багаті на енергію органічні сполуки. За визначенням кристалографа і геохіміка М. Белова (1891–1982), атоми в живій речовині заряджаються енергією і стають геохімічними акумуляторами.

Жива речовина бере участь у порушенні ізотопного складу деяких легких хімічних елементів (зокрема, С, О, S, N) – організми поглинають

переважно легші ізотопи. Це допомагає вченим робити висновки щодо генезису сполук елементів у земній корі. Зокрема, вивчення співвідношення ізотопів  $^{34}\text{S} : ^{32}\text{S}$  в сульфідах дало змогу вченим встановити осадове, а не магматичне джерело S гідротермальних та інших сульфідних родовищ. При фотосинтезі рослини віддають перевагу легкому ізотопу  $^{12}\text{C}$ , ніж важким  $^{13}\text{C}$  і  $^{14}\text{C}$ , що допомогло встановити походження хондритів, алмазів, вапняків, вугілля, нафти сланців та інших сполук Карбону.

Рушійною силою біогенного колообігу атомів слугує енергія Сонця, яка трансформується живою речовиною автотрофних організмів в енергію хімічних зв'язків (мал. 16).



**Мал. 16.** Рушійною силою біогенного колообігу атомів слугує енергія Сонця. Близько 30% енергії Сонця повертається назад у космос; 69% поглинається атмосферою, ґрунтом, гідросферою, витрачається на випаровування і опади; решта енергії (тільки 1%) накопичується у вигляді біомасі рослин.

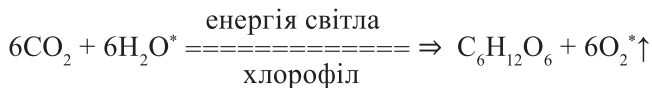
Планета одержує від Сонця приблизно  $10,5 \cdot 10^6$  кДж/м<sup>2</sup> на рік. Приблизно 30% цієї енергії повертається назад у космос; майже 69% поглинається атмосферою, ґрунтом, гідросферою, витрачається на випаровування та опади; решта енергії (майже 1%) витрачається на фотосинтез, і є пер-



винним джерелом життя на Землі. Ця трансформована сонячна енергія дає змогу живій речовині здійснювати геохімічну роботу на планеті у вигляді переміщення, дихання, розмноження, живлення, виділення, росту, розвитку, смерті і розкладання. Сукупна біогеохімічна активність живої речовини призвела до зміни складу атмосфери Землі – вона з відновного типу перетворилася на атмосферу окислювальну із сучасним вмістом кисню. Енергія Сонця трофічними ланцюгами здатна проникати глибоко в середину планети.

**Фотосинтез** – планетарний за масштабами процес з перетворення фотосинтетично активної радіації (ФАР, 400–700 нм) сонячного світла на енергію хімічних зв'язків органічних сполук.

Загальне рівняння фотосинтезу можна зобразити у такому вигляді:



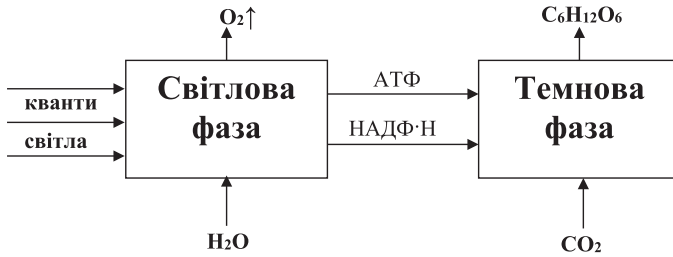
Процес фотосинтезу у поєднанні із асиміляцією мінеральних елементів ґрунту створює біомасу продуцентів – рослин, які слугують речовинно-енергетичним ресурсом для консументів усіх інших рівнів трофічного ланцюга.

З позицій біогеохімії при фотосинтезі виникає сильний окисник – вільний кисень і сильний відновник – органічні сполуки (вихідні речовини  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  на земній поверхні без участі рослин не є а ні окисниками, а ні відновниками). Атоми С, Н, О в процесі фотосинтезу заряджаються енергією квантів світла, стають біогеохімічними акумуляторами енергії в біосфері у вигляді глюкози, АТФ, ліпідів, амінокислот та інших органічних сполук.

На мал. 17 показано узагальнену схему процесу фотосинтезу, що відбувається в хлоропластах клітин і складається з двох фаз – світлової і темної. Світлова здійснюється в мембранах тилакоїдів (спеціальні мембранні структури) хлоропластів), темнова – в стромі цих органоїдів.

У тилакоїдах гран фотони світла збуджують молекули хлорофілу  $\text{P}_{680}$ . Їх електрони переходять на вищий енергетичний рівень (нагромаджують потенційну енергію) і переносяться електронно-транспортним ланцюгом (пластохіноном, системою цитохромів та ін.).





Мал. 17. Узагальнена схема фотосинтезу.

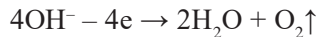
При цьому виконується фотохімічна робота: фотоліз води і синтез АТФ (фотосинтетичне фосфорилування):



Перебіг процесу фотолізу води:



Протони Гідрогену нагромаджуються всередині тилакоїда; йони гідроксиду втрачають електрони і об'єднуються з утворенням води й кисню:



У світлову фазу утворюється т. зв. відновлювальна сила – акцептор водню – нікотинамідаденіндинуклеотидфосфат відновлений (НАДФ • Н).



Отже, для світлової фази фотосинтезу характерне перетворення світлової енергії на збудження електронів хлорофілу, фотоліз води, синтез АТФ, відновлення НАДФ і виділення кисню. Далі настає темнова фаза фотосинтезу, для перебігу якої світло не потрібне. За участю  $\text{CO}_2$ , АТФ та НАДФ • Н відбувається приєднання водню до  $\text{CO}_2$  з утворенням органічних речовин.

Під час фотосинтезу енергія Сонця (у межах 1%) трансформується в енергію хімічних зв'язків ( $-\text{C}-\text{C}-$ ,  $-\text{O}-\text{P}-$ ,  $-\text{C}=\text{C}-$ ,  $-\text{C}-\text{H}$ ,  $-\text{C}-\text{O}-$ ,  $\text{O}=\text{C}-\text{H}$ ,  $-\text{N}-\text{C}-$  та ін.), яка витрачається усіма живими організмами планети на здійснення геохімічної роботи шляхом дихання, виділення, розмноження, розкладання.

Маса рослинного покриву Землі становить понад 1800 млрд т сухої речовини, що енергетично еквівалентно  $30 \cdot 10^{21}$  Дж. Ця цифра відповідає

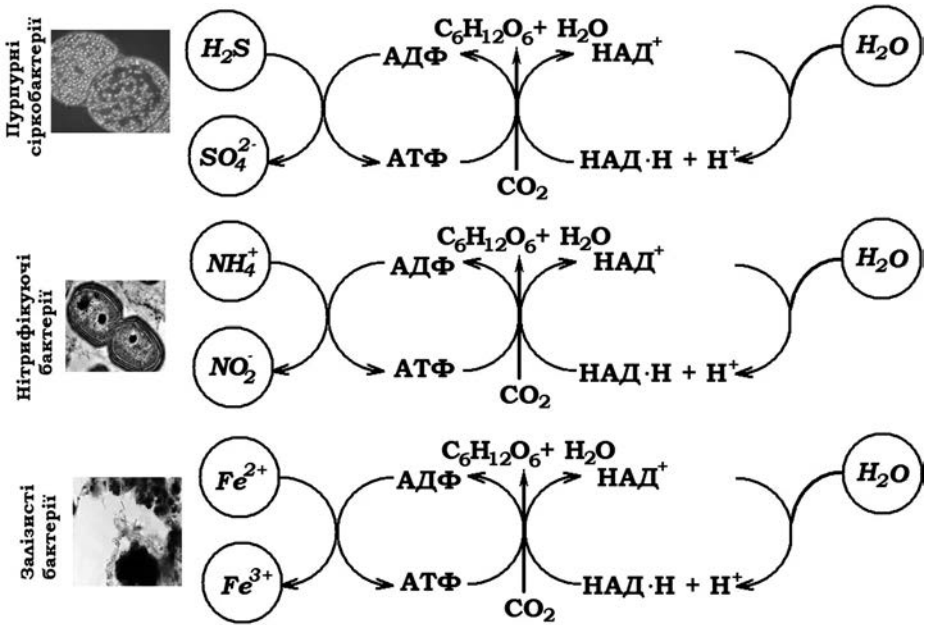
відомим запасам енергії корисних копалин. Щороку рослини суходолу за участі фотосинтезу утворюють 160–175 млрд т біомаси, а рослини морів і океанів – 60–70 млрд т (у перерахунку на суху речовину), що разом підтримує баланс  $O_2$  і  $CO_2$  в атмосфері планети.

Фотосинтез унікальний тим, що збільшує вільну енергію біосфери за рахунок зовнішнього джерела – Сонця, чим забезпечує існування як рослин, так і всіх гетеротрофних організмів, у т. ч. й людини.

Російському досліднику фізіології рослин Кліментію Аркадійовичу Тимірязєву (1843–1920) належить вислів «космічна роль зелених рослин» на означення їх здатності засвоювати сонячну енергію. В одній з публічних лекцій (1875 р.) академік зауважив: «...промінь світла... впав на зелену стеблинку пшеничного паростка... витратився на внутрішню роботу... перетворився на розчинний цукор... відклався, нарешті, у зерні у вигляді крохмалю чи клейковини. У тій чи іншій формі він увійшов до складу хліба, який слугує нам їжею. Він перетворився на наші м'язи, на наші нерви. Цей промінь сонця зігріває нас. Він приводить нас у рух. Можливо він у цю хвилину грає у нашому мозку».

Отже, вуглеводи, ліпіди, білки, АТФ та інші органічні сполуки є законсервованою енергією сонячного світла і пластичним матеріалом, які разом забезпечують геохімічну роботу живої речовини в біосфері.

**Хемосинтез** – автотрофний тип живлення багатьох видів бактерій, який ґрунтується на засвоєнні вуглекислого газу за рахунок енергії біохімічних реакцій окиснення неорганічних сполук без участі світла. Цей процес відкрив у 1887 р. мікробіолог Сергій Миколайович Виноградський (1856–1953). Хемосинтез здійснюють бактерії, які не містять хлорофілу. Їх екологічна ніша позбавлена світла (під землею, у глибоководних зонах водоймах та ін.). Енергія, що виділяється під час окиснення різноманітних неорганічних сполук (донорами електронів є  $NH_3$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $Fe_2O_3$  та ін.), акумулюється спочатку у клітинах у вигляді макроергічних зв'язків АТФ, і використовується у подальшому на синтез вуглеводів, органічних кислот та інших органічних сполук. Під час хемосинтезу кисень не виділяється (мал. 18). Джерелом Карбону у процесах хемосинтезу є вуглекислий газ (як і при фотосинтезі).



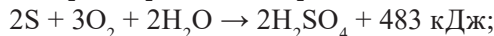
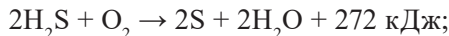
Мал. 18. Схеми хемосинтезу (АТФ – аденозинтрифосфат, НАД·Н $^+$  – кофермент нікотинмідаденідинуклеотид відновлений).

Прикладами хемосинтетиків слугують:

1) бактерії нітратифікатори родів (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Nitrosococcus*) – послідовно окиснюють амоніак, що утворюється у процесах гниття решток тварин і рослин, до нітритної та нітратної кислот, які, у свою чергу, при взаємодії із ґрунтовими мінералами утворюють нітрити і нітрати:



2) сіркобактерії (*Desulfuromonas*, *Desulfobacter*, *Beggiatoa*) – окиснюють сірководень до молекулярної сірки, яку накопичують в цитоплазмі. У подальшому сірку можуть окиснювати до сульфатної кислоти:



3) залізобактерії – збірна група бактерій (*Geobacter*, *Gallionella* та ін.) – одержують енергію за рахунок окиснення сполук Fe (II) до Fe (III):



Беруть участь в утворенні покладів залізних руд;

4) водневі бактерії (*Hydrogenophilus*) здатні окиснювати молекулярний водень:



Хемосинтезуючим бактеріям належить надзвичайно важлива роль у біогеохімічних циклах N, S, Fe, H та інших елементів у біосфері. Вони є природними споживачами отруйних речовин, зокрема,  $\text{NH}_3$  та  $\text{H}_2\text{S}$ ; сіркобактерії використовують для очистки стічних вод. Нітрифікуючі бактерії збагачують ґрунт доступними для рослин формами Нітрогену у вигляді нітратів.

Порівняння енергетичних ефектів реакцій хемосинтезу та фотосинтезу пояснює, чому хемосинтетики не піднялися вище бактеріального рівня організації. Причина полягає в тому, що енергетичні ефекти хемосинтетичних реакцій у кілька разів менші, ніж реакції фотосинтезу.

Широкі можливості організмів використовувати різні джерела енергії підтвердило відкриття представницьких угруповань організмів в океанічних глибинах. Ці представники живої речовини здійснюють геохімічну роботу за рахунок не сонячної енергії, а енергії вулканічних процесів глибин Землі. Це суттєво розширює розуміння умов, в яких можливе життя.

#### ***Жива речовина в біосфері виконує такі функції:***

1) *енергетичну*. Ця функція живої речовини є провідною. Вона пов'язана з накопиченням енергії в процесах фотосинтезу та хемосинтезу, передачею її по трофічних ланцюгах, розсіюванням. Значна кількість накопиченої у хімічних зв'язках енергії вивільнюється при обміні речовин і розкладанні органічних речовин. Отже, використання вільної енергії забезпечує живим істотам різноманітні форми руху, біогеохімічної роботи, адаптації до умов середовища. Наприклад, утворені після розкладання органіки сполуки ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , гумусові кислоти та ін.) потрапляють у воду і роблять її хімічно активною. Така вода у земній корі зумовлює різноманітні реакції по розкладанню гірських порід;

2) *концентраційну*. Вона пов'язана із властивістю організмів вибірково поглинати і накопичувати у своєму тілі розсіяні хімічні елементи, спричинюючи біогенне диференціювання елементів у навколишньому середовищі. В. Вернадський запропонував називати організми, що нагромаджують

певний хімічний елемент у кількості більше 10% своєї маси, організмами-концентраторами. Відмираючи, вони утворюють сполучення таких речовин. Наслідком цієї функції організмів є утворення покладів горючих копалин, вапняків, діатоміту, фосфоритів, селітри, рудних родовищ та ін.;

3) *деструктивну*. Функція полягає в тому, що за рахунок життєдіяльності величезної кількості гетеротрофів, переважно грибів, тварин і мікроорганізмів, відбувається робота із розкладання органічних решток та їх мінералізація. Органічні сполуки розкладаються до вуглекислого газу, амоніаку, води, а в анаеробних умовах – ще й до  $H_2$ ,  $CH_4$  та ін. Продукти мінералізації (у вигляді йонів) та газоподібні сполуки ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$  та ін.) знову використовуються автотрофами і гетеротрофами. У такий спосіб здійснюється колообіг речовин та хімічних елементів у природі. У ґрунті частина органічних речовин, які вивільняються під впливом життєдіяльності ґрунтових мікроорганізмів, грибів, рослин і тварин, знову конденсуються із утворенням складного комплексу сполук (гумінові кислоти + фульвокислоти + гуміни) – ґрунтового гумусу. Він є основою родючості ґрунту. Природні води, які збагачуються  $CO_2$  та продуктами мінералізації органічних речовин стають хімічно високоактивними, вони руйнують (вивітрюють) горні породи, виконують в земній корі іншу хімічну роботу;

4) *середовищеутворювальну*. Полягає у тому, що сукупність живих організмів створює внутрішнє середовище для збалансованого співіснування усіх її компонентів (продуцентів, консументів, редуцентів), тобто оптимальний еволюційно сформований речовинно-енергетично-інформаційний обмін. З цією функцією пов'язана зміна фізико-хімічних характеристик середовища. Результатом здійснення цієї функції є все природне середовище, яке створене живими організмами і підтримується ними у стабільному стані. Жива речовина змінює речовинний склад усіх зовнішніх геосфер – від формування сучасної атмосфери до утворення гранітно-метаморфічного шару земної кори. Отже, до середовищеутворювальної функції можна зарахувати здатність живої речовини підтримувати певний газовий склад повітря атмосфери ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ) – її *газову функцію*;

5) *транспортну*. Ця функція пов'язана з перенесенням речовини та енергії у результаті активного руху організмів (міграції тварин, птахів, пилку, спор);

б) *окисно-відновну*. Функція пов'язана з прискоренням процесів окиснення та відновлення під впливом живої речовини. Зокрема, за рахунок життєдіяльності мікроорганізмів у біосфері здійснюються окиснення й відновлення елементів зі змінною валентністю (N, S, Fe, Mn та ін.). Залежно від окисно-відновної функції мікроорганізми можуть бути окисниками або відновниками. Геологічні наслідки діяльності таких організмів виявляються в утворенні осадових родовищ сірки, формуванні в анаеробних умовах покладів сульфідів, металів, а в аеробних – виникненні залізних і залізомарганцевих руд. З біогеохімічних позицій окиснювально-відновна зональність різних типів ґрунтів відображає геохімічні особливості процесів розкладання органічних речовин в таких біокосних системах;

7) *інформаційну*. Вона проявляється у тому, що біорізноманіття живих істот накопичує різноманіття інформації, закріплює її у спадкових структурах і передає наступним поколінням. При цьому збільшується впорядкованість, складність, організованість біосфери, зростає негентропія. Прикладом інформаційної функції живої речовини може слугувати також процес ґрунтоутворення, коли однорідна гірська порода перетворюється на неоднорідний біокосний ґрунтовий профіль з багатьма горизонтами, в яких накопичується не тільки енергія, але й інформація.

Отже, геохімічна робота живої речовини біосфери є важливою складовою феномену життя на планеті.

## **2.4. Біогеохімічні процеси в біосфері у контексті термодинаміки і синергетики. Стабільність біосфери**

Біосфера належить до системи планетарного рівня організування речовини, енергії та інформації і закономірно вписується у сферично-симетричну структуру Землі. Біосфері властиві неперервні ймовірнісні та детерміновані процеси. Вона акумулює і трансформує величезні ресурси речовини і енергії, зумовлюючи специфіку та закономірності розвитку природних умов кожного історико-геологічного етапу еволюції Землі. Біосферу з позицій термодинаміки можна розглядати як єдину відкриту природну систему, що поглинає енергію та спрямовує її на внутрішню роботу.

Під енергією системи розуміють її здатність здійснювати роботу. Потік енергії в біосфері забезпечують три природних джерела:

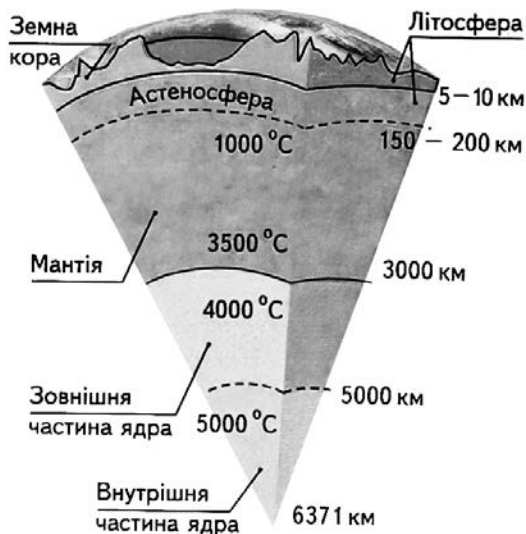
1) енергія Сонця, що надходить у вигляді електромагнітних хвиль. Фізичні характеристики Сонця представлені на мал. 19. Щохвилини планета одержує  $1369 \text{ Вт/м}^2$ , або  $1,959 \text{ кал /см}^2 \cdot \text{хв}$  сонячної енергії (т. зв. сонячна стала). Це потік сонячної енергії, який надходить на верхню межу атмосфери за одиницю часу на одиницю площі, перпендикулярної до сонячних променів. Всього за рік до Землі доходить  $10,5 \cdot 10^6 \text{ кДж/м}^2$  променевої енергії, з якої майже 30% повертається назад у космос, 46% перетворюється на тепло (поглинається атмосферою, ґрунтом, гідросферою); 23% витрачається на випаровування і опади; 0,2% – на вітер і хвилі. Отже,  $30 + 46 + 23 + 0,2 = 99,2\%$  сонячної енергії витрачається, але не дарма, – ця енергія підтримує температуру, керує кліматом, колообігом води та ін. Залишається 0,8% (частіше вказують цифру 1%) енергії, яка і є



Мал. 19. Фізичні характеристики Сонця.

первинним джерелом життя на Землі за рахунок фотосинтезу. Функціонування біогеохімічних циклів на Землі забезпечується переважно енергією Сонця. У кожному акті біогеохімічного колообігу жива речовина поглинає сонячну енергію і виділяє її у формі, яка здатна здійснювати геохімічну роботу як на поверхні, так і всередині Землі;

2) *енергія земних надр*, що підтримується ядерним розпадом урану ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ), торію ( $^{232}\text{Th}$ ), калію ( $^{40}\text{K}$ ). Вчені вважають, що температура в центрі Землі 4500–5000 °С, а тиск досягає 3,5 млн атм (мал. 20).



Мал. 20. Внутрішня будова Землі.

Внутрішнє ядро Землі складається переважно із Fe та невеликих домішок Ni, зовнішнє – силікатне. Вище ядра розміщена мантия, до складу якої входять сполуки  $\text{SiO}_2$  разом із оксидами інших металів. Силікатні розплави мають властивості йонно-електронних рідин. Вони містять полімерні ланцюжки силікатних та алюмосилікатних аніонів упорядкованої будови. Геохімічна специфіка магм визначається також леткими компонентами вулканічних газів – парами  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{F}_2$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$  та ін., які сприяють деполімеризації ланцюгів силікатних аніонів. Зокрема, галогеніди у вигляді



ді HF, HCl, HBr, Ні надходять на поверхню Землі разом із вулканічними еманациями. Надалі сполуки Йоду під впливом окислювально-відновних реакцій (та сонячної радіації) окиснюються, тобто переходять у  $I_2$ , який транспортується через атмосферу і здійснює свій біогеохімічний колообіг на поверхні Землі. HF вулканічних газів одразу фіксується материковими породами, особливо молекулою  $P_2O_5$ , із подальшим утворенням міцної сполуки фторапатиту. Солі HCl і HBr переходять у водні розчини та мігрують разом.

Наявні також у викидах вулканів S, Se, Te. Якщо у гідротермальних рудних відкладеннях і сульфідах важких металів вони перебувають разом, то на поверхні Землі – розділяються:

а) S легко окиснюється до  $SO_4^{2-}$  і потрапляє у океан; при випаровуванні океанської води утворюються осади Кальцію сульфату – гіпси та ін.;

б) Se важко піддається окисненню, тому у вигляді нерозчинних у воді солей (Fe та ін.) селеністої кислоти ( $H_2SeO_3$ ) утворює скупчення;

в) Телур (Te) розсіюється при окисненні.

Отже, енергія внутрішнього тепла Землі впливає на біогеохімічні процеси в біосфері, хоча за потужністю становить 0,5% від сонячної. Прикладом використання живими організмами цього виду енергії є існування представницьких угруповань із значною біомасою в океанічних глибинах. Ці представники живої речовини здійснюють геохімічну роботу за рахунок не сонячної енергії, а вулканічних процесів (тобто глибинної енергії Землі). Це суттєво розширює розуміння умов, у яких можливе існування життя;

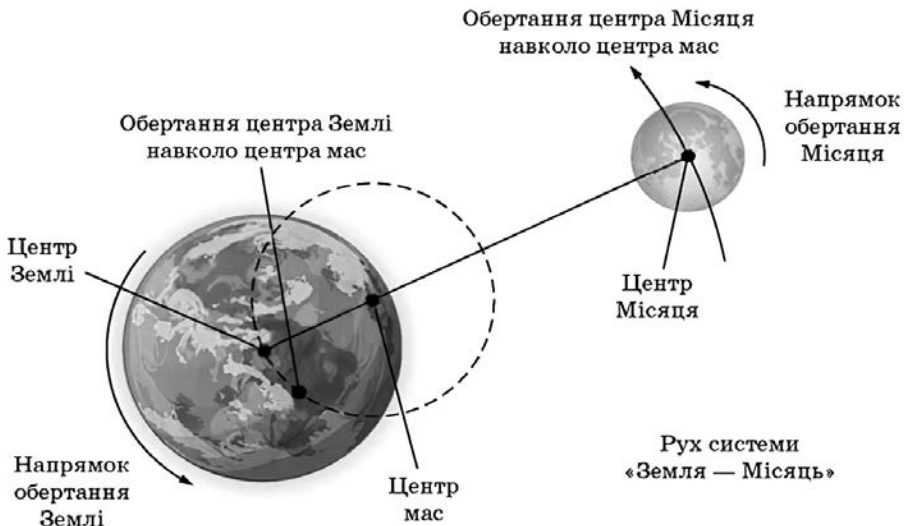
3) *кінетична енергія обертання Землі та її супутника Місяця* як космічних тіл (мал. 21). Висвітлення цього питання потребує окремого ґрунтового опису. Ключові біогеохімічні аспекти є такими:

а) велика маса і сильне магнітне поле Землі утримує навколо себе захисний шар атмосфери і велику кількість води, що забезпечує парниковий ефект і захищає біоту від згубної дії космічної радіації;

б) циркадні ритми біосфери (зима / літо, день / ніч) значно впливають на життєдіяльність живої речовини, яка обумовлена цим видом енергії;

в) кінетична енергія обертання упродовж 4 млрд років визначила різноманітні еволюційні геохімічні процеси (міграцію, рудоутворення та ін.);

г) енергія припливів / відпливів постійно забезпечує існування багатьох океанічних прибережних екосистем. Жива речовина трансформує



Мал.21. Обертання Землі та її супутника Місяця як космічних тіл.

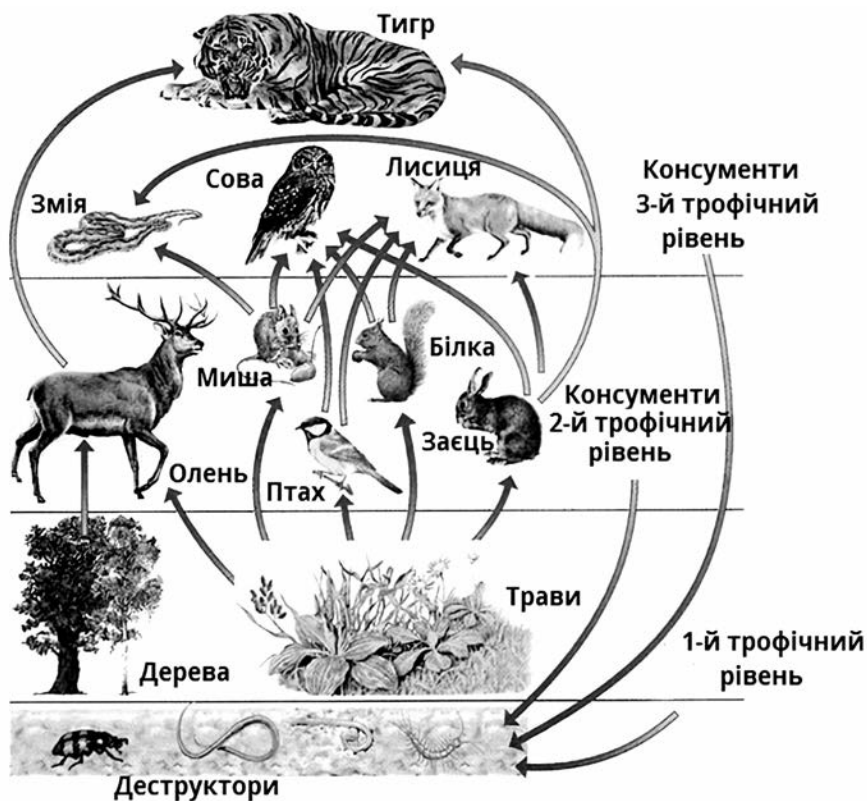
енергію усіх трьох джерел на хімічну, механічну, теплову, електромагнітну енергію біосферних процесів; залучає її до неперервного біогеохімічного колообігу речовин в біосфері.

Усе, що стосується передавання чи трансформації енергії, підкоряється відповідним законам термодинаміки.

*Перший закон термодинаміки* стверджує – енергія не може з'явитися чи щезати, вона може тільки переходити з однієї форми в іншу. Наприклад, світлова – в енергію хімічних зв'язків, тепло, рухи тощо (і навпаки). Другий закон термодинаміки має різні формулювання, але вказує на напрям перебігу процесів і констатує: у замкненій системі ентропія може тільки зростати. Закон стверджує – процеси перетворення енергії в екосистемах відбуваються самочинно тільки за умови, що енергія переходить від концентрованої форми у розсіяну, тобто вона деградує. Тепло гарячого предмета самочинно розсіюється у більш холодному середовищі. Міра кількості енергії, яка стає недоступною для використання і є ентропією; тобто це міра впорядкованості, яка виникає при деградації енергії. Чим вища впорядкованість системи, тим менша її ентропія. Існує влучне визначення ентропії як міри хаосу.

Згідно з другим законом термодинаміки за градієнтом концентрації відбуваються природні процеси дифузії і осмосу (особливо активно в атмосфері, водах, живих організмах). Зокрема, осмотичний тиск, тургор і нормальна життєдіяльність клітин усіх живих організмів підтримується різницею концентрацій біогенних електролітів ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  та ін.) по різні боки нативної біологічної мембрани. Активний транспорт речовин (проти градієнту концентрації) в живих організмах також може відбуватися, але вже із витратою енергії (АТФ ті інших речовин з макроергічними зв'язками), участі переносників, медіаторів тощо.

Уявлення про шляхи проходження енергії за участі живої речовини дають харчові (трофічні) ланцюги, – певні комплекси трофічних рівнів (мал. 22).



Мал. 22. Харчові (трофічні) ланцюги в екосистемі.

Перший рівень ланцюга займають автотрофи – організми-продуценти (фото- чи хемосинтетики). Потім ідуть організми, які споживають продукти фотосинтезу чи хемосинтезу, – консументи першого порядку (первинні консументи), третій рівень займають вторинні консументи і т. д. Кількість ланок у трофічному ланцюгу не перевищує 4–5, оскільки кожна наступна ланка отримує усе менший запас енергії – вона передається згідно закону 10% піраміди енергій Р. Ліндемана

Шлях використання накопиченої за рахунок фото- і хемосинтезу енергії відбувається у такий спосіб: на різних етапах дихання (анаеробного і аеробного) органічні речовини поступово розщеплюються, а енергія хімічних зв'язків здійснює роботу у вигляді енергетичної, концентраційної, середовищеутворювальної, транспортної, деструктивної, окисновідновної, інформаційної функцій живої речовини і переходить у тепло.

Отже, проходження енергії через живу речовину є термодинамічним потоком, а не колообігом, оскільки енергія у вигляді тепла розсіюється у навколишньому природному середовищі і не може використовуватися знову для фотосинтезу (чи хемосинтезу). Енергетичний потік через живу речовину – це процес постійної втрати накопиченої організмами енергії (збільшення ентропії).

У термодинамічних розрахунках необхідно зважати й на те, що частина енергії, яка накопичується рослинами в процесах фотосинтезу, використовується клітинами також для власних потреб (на дихання, розмноження тощо), інша ж частина зберігається і доступна для консументів. Різницю між швидкістю фотосинтезу і швидкістю дихання фотосинтезуючих організмів називають чистою первинною продукцією. У контексті таких міркувань доцільно зауважити, що сучасні екологічні проблеми – це проблеми людини, а не біосфери, оскільки в ній постійно спрацьовують два механізми термодинамічного характеру:

1) чим довший харчовий ланцюг, тим менша продукція його останньої ланки відносно продукції початкової;

2) лише 1% чистої продукції фотосинтезу використовується в усіх ланках природних трофічних ланцюгів біосфери.

Перевищення цієї межі шляхом надходження вказаної частки в антропогенний канал (в їжу, паливо, волокна тощо) стає чинником пору-

шення рівноваги біосфери. За гомеостатичним принципом Ле Шательє біосфера може усунути людину. Отже, людству потрібно будувати ноосферу та шукати шляхи переходу до авторофності – самозабезпечення їжею. Один з таких шляхів нині – це вирощування адаптованих до несприятливих умов середовища рослин, одержання з них калорійних, з високим вмістом протеїну продуктів. Людина приречена спускати ся вниз харчовим ланцюгом, зокрема до сої, а не втратити 90% енергії їжі на годівлю тварин. Багато науковців вважають, що найважливіші завдання генних інженерів у XXI ст. – це здійснення генетичної трансформації злакових щодо їх спроможності фіксувати атмосферний азот і підвищення ефективності фотосинтезу основних сільськогосподарських рослин.

Загалом біосфера є термодинамічно невірноваженою відкритою системою, хоча на окремих ділянках можливе досягнення рівноваги (наприклад, у соляних озерах, де між донною сіллю і розсоллом спостерігається динамічна фізико-хімічна рівновага). Чітка невірноваженість характерна для багатьох частин біосфери, але особливо виявляється у живій речовині, природних водах і ґрунтах. Зокрема, у водних природних системах (річках) присутні як сильні окисники (вільний кисень), так і сильні відновники (органічні речовини). Відповідно до законів термодинаміки у річковій воді постійно відбувається окиснення органічних речовин – система намагається досягти рівноваги. Однак цього ніколи не відбувається, оскільки у воду надходять нові маси кисню з повітря та фотосинтетичної діяльності водних рослин, а органічні речовини – з ґрунтів, мулів, боліт та інших джерел синтезу та редукції живого.

Термодинаміка відкритих систем вивчає невірноважені процеси; у їх опису провідну роль відіграє поняття зростання ентропії систем за рахунок внутрішніх процесів. Відкриті системи, в яких спостерігається приріст ентропії (розсіювання енергії), називають дисипативними.

Дисипативні системи для підтримки свого функціонування потребують більше енергії, ніж прості структури, на зміну яким вони приходять. При цьому є можливість спонтанного виникнення порядку та організованості з безладдя і хаосу в результаті самоорганізації. Побудова живої матерії істотно відрізняється від побудови неживого не тільки надзвичайно складною

структурою, а й спроможністю відбирати з навколишнього середовища корисну енергію в кількості, потрібній для самозбереження і саморозвитку. Жива речовина характеризується величезною вільною енергією.

Замкнені системи становлять лише малу частку у фізичному Всесвіті. Більшість систем, зокрема екологічні, є відкритими – вони обмінюються речовиною, енергією та інформацією з навколишнім середовищем і постійно флюктують. Окрема флюктуація (або їх комбінація) може стати (в результаті зворотного зв'язку) настільки сильною, що організація, яка існувала, не витримує і руйнується. У цей переломний момент, – у точці *біфуркації* – принципово неможливо передбачити, в якому напрямку відбуватиметься подальший розвиток системи: до хаотичного чи до нового, вищого рівня організації. Прикладом точки біфуркації можна вважати маятник у перекинутому стані, коли він готовий впасти вправо чи вліво залежно від малих впливів ззовні, які раніше не мали б значення.

Сутність функціонування та розвиток біосфери описують дві протилежні теорії – класична термодинаміка й еволюційне вчення. Другий закон термодинаміки передбачає самочинне зниження різноманіття в закритій системі. Теорія еволюції передбачає збільшення біорізноманіття шляхом видоутворення. Синергетичний підхід до розуміння законів розвитку біосфери зміг розв'язати суперечність між двома фундаментальними теоріями.

Теорія відкритих систем – *синергетика* – сформувалася наприкінці ХХ ст. за участі І. Пригожина, І. Стенгерс, Г. Хакена та інших дослідників як міждисциплінарний науковий напрям, що досліджує механізми еволюції, становлення реальності, «управління хаосом», обґрунтовує сумісність відкритих систем до самоорганізації.

Саме здатність створювати і підтримувати високий ступінь внутрішньої упорядкованості (звільнятися від ентропії), відкритість біологічних систем дає змогу їм еволюціонувати від простого до складного, від клітини – зиготи до складного організму, що фактично є порушенням другого закону термодинаміки, але пояснюються з позицій синергетики. Зокрема, функціонування біогеохімічних циклів (колообігів) води та біогенних елементів уможливорює унікальна властивість живого до самоорганізування та саморегулювання за допомогою постійного надходження сонячної енергії.

Механізми функціонування природних екосистем підкоряються синергетичним постулатам:

- 1) системам не можна нав'язувати шлях розвитку;
- 2) для них існує декілька альтернативних шляхів розвитку;
- 3) різноманітність виступає як початок створення чогось нового;
- 4) в особливих станах нестійкого середовища (точках біфуркації) антропогенні дії можуть впливати на природні процеси;
- 5) майбутній стан системи організовує, формує, змінює сучасний її стан.

Усе це є аргументами на користь збереження біологічного і ландшафтного різноманіття як гаранта стабільності біосфери.

Через усю наукову творчість В. Вернадського проходить думка про організаційну єдність біосфери і навіть космосу. Зокрема, у праці «Нариси геохімії» він пише, що у межах певного історичного часу біосфера перебуває у квазістаціонарному стані гомеостазу, що дає змогу зберігати систему як ціле, постійно відновлювати внутрішню динамічну рівновагу. Наявність гомеостатичного механізму регуляції є невід'ємною ознакою будь-якої системи, що розвивається. Однак існують межі, в яких система може справлятися з руйнівними для неї змінами і підтримувати стан гомеостазу.

Екосистеми мають визначений природою обсяг міцності і стійкості до зовнішнього (техногенного) впливу. Вони спроможні переробити певний обсяг забруднювачів чи відновити популяцію, але тільки за умови, що не пройдена точка біфуркації – не порушена екологічна рівновага. Прикладом такого локального порушення динамічної рівноваги слугують катастрофічні паводки і повені в Закарпатті. До 90-х років ХХ ст. потреби у деревині Україна задовольняла на 25% за рахунок власних лісів Полісся і Карпат, а 75% завозила з Росії. Після проголошення незалежності почалися нераціональні вирубки лісів у Карпатах. Завдяки тому, що ліси вбирають та акумулюють вологу під час дощів, річки не переповнюються водою під час паводків. Коли ліси покривають схили гір, вони створюють тінь, навесні сніг тане повільно, зливові опади затримуються на схилах і потоками не стікають у гірські ріки без великої заплави (такі річки не спроможні вмістити великий обсяг води). Це призвело до різкого підняття рівня води і майже щорічного затоплення територій, які раніше сторіччями не потрапляли в зону затоплення і були обрані людьми для будівництва житла.



Отже, є підстави вважати, що існує певна *буферна ємність біосфери*, в межах якої біосфера може змінюватись і водночас залишатися самою собою. Знайти ці межі та дати їм кількісну оцінку – життєвоважливе завдання для людства, одна з центральних наукових проблем міждисциплінарного характеру. У зв'язку з цим у вчених виникають питання: якою є буферна ємність біосфери? Яка природа біогенних констант біосфери, тобто у яких межах можна змінювати ці константи без шкоди для людини? Як співвідносяться між собою параметри біосфери та соціосфери, і чи можливо на основі цього робити глобально-екологічний прогноз та управління? Однак єдиної теорії, яка б давала відповіді на всі ці питання, поки що не існує.

Особливість пояснення еволюції екосистем біосфери полягає в тому, що екосистема – це комплекс живих організмів і водночас абіотичне середовище їхнього існування з усіма взаємозв'язками і взаємодією між ними. Екосистеми не розмножуються як живі організми; між екосистемами немає боротьба за існування, хоча існує горизонтальне перенесення генів вірусами і прокаріотами. Чи спроможна біосфера визначати переваги біомів, ландшафтів чи біогеоценозів шляхом природного добору за Ч. Дарвіним? Фактори біологічної еволюції – спадкова мінливість, боротьба за існування і природний добір – працюють на рівні популяцій і формують генофонд біорізноманіття екосистеми на основі різних форм біотичних взаємовідносин (конкуренції, хижацтва, симбіозу, алелопатії та ін.).

Процеси в біосфері і навколишнього щодо неї середовищі, породжуються й підтримуються, з одного боку, космічними факторами (сонячне світло, промені від позасонячних астрофізичних джерел), а з другого – земними факторами (гравітація, енергія обертання Землі та її супутника Місяця, магнітне поле планети, теплове випромінювання надр тощо). Зміна екосистем відбувається внаслідок довготривалої перебудови структурно-функціональної організації екосистем під впливом різних чинників, а саме: змін кліматичних або ґрунтово-гідрологічних умов, тектоніки Землі, землетрусів, гороутворення, міграції материків, напряму філогенезу фіто-, зоо-, міко- та мікроценозів; накопичення в екосистемах запасів вільної енергії для забезпечення дії механізмів захисних чи еволюційних перебудов (зокрема, парникового ефекту та озонового шару



атмосфери). Доцільно враховувати й антропогенний фактор щодо змін екосистем.

При описі загальної картини еволюції біосфери науковці звертаються синергетичного явища – детермінований хаос: кожна подія процесі еволюції має конкретні фізичні причини, але малі збурення здатні викликати значні еволюційні зміни. Синергетичний підхід дає змогу розглядати біосферу як самоорганізуючу відкриту динамічну систему, яка у своєму становленні позбавлена цілеспрямованості. Механізми саморозвитку неминуче призводять до криз системи, тобто до межових точок – біфуркацій, перехід через які змінює характер розвитку (І. Пригожин, І. Стенгерс). Передбачити, в якому напрямку розвиватиметься система, пройшовши точку біфуркації, неможливо. Є підстави вважати, що саме в такій точці перебуває сьогодні біосфера, відтак існують декілька сценаріїв її подальшого розвитку. Один з них – шлях до розвиненої ноосфери на засадах сталого розвитку, коли розум людства, суспільство коеволюційно взаємодіятимуть з біосферою; інший – екологічна катастрофа, що так само є цілком природним явищем.

## ЗАПИТАННЯ. ЗАВДАННЯ

---

1. Наведіть сучасні критерії науковості екологічних знань.
2. У вигляді яких послідовних п'яти еволюцій сучасна наука розглядає загальний розвиток планети після Великого вибуху?
3. Як сучасні науковці трактують основні особливості еволюції хімічних елементів на Землі?
4. Наведіть аргументи можливості (чи неможливості) виникнення живого з неживого.
5. Обґрунтуйте ваш погляд на походження людини.
6. Вкажіть суттєві ознаки біосфери.
7. Назвіть речовини, що належать до складу біосфери.
8. Дайте визначення поняття «жива речовина». Чим воно відрізняється від поняття «жива істота»?
9. Охарактеризуйте фотосинтез з біогеохімічного погляду.
10. Охарактеризуйте хемосинтез з біогеохімічного погляду.

11. Яка роль процесів розкладання решток живих організмів у формуванні хімічного складу поверхневих і підземних вод?
12. У чому полягає сутність двох законів термодинаміки?
13. Дайте коротку характеристику природних джерел енергії в біосфері.
14. У чому полягає сутність синергетичного підходу до розуміння розвитку біосфери?
15. Обґрунтуйте, чому розкладання органічних речовин – процес ентропійний.
16. Охарактеризуйте сучасне уявлення про походження Землі.
17. У чому полягає особливість геохімічної класифікації елементів В. Вернадського?
18. У чому полягає особливість геохімічної класифікації елементів В. Гольдшміда?
19. Вкажіть особливості геохімічної класифікації елементів О. Перельмана.
20. Наведіть хімічний склад живої речовини і порівняйте його зі складом земної кори та гідросфери.
21. Наведіть геологічні результати здійснення живою речовиною окисно-відновної функції.

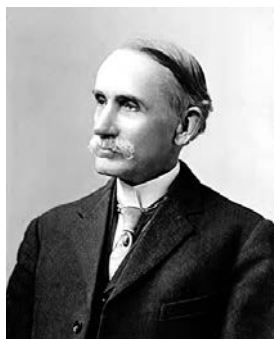
### 3. ХІМІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ В БІОСФЕРІ: ПОШИРЕНІСТЬ, СИСТЕМАТИКА, ЗАКОНОМІРНОСТІ НАКОПИЧЕННЯ

#### 3.1. Кларки хімічних елементів. Органогени живої речовини

Нині відомо 118 хімічних елементів, з яких 89 виявлені в земній корі, решта отримані штучно (як результат ядерних реакцій). Кожному хімічному елементу відповідає сукупність атомів з однаковими зарядами ядер. Ізотопи – атоми одного елемента з різними масами; природних ізотопів відомо приблизно 2 тисячі. Поширеність хімічних елементів у земній корі і живій речовині біосфери неоднакова.

У 1908 р. американський учений Франк-Уїгльсворт Кларк (1847–1931) опублікував наукову працю «Дані геохімії». Автор на основі 40-річних досліджень хімічного аналізу гірських порід, мінералів і вод з'ясував середній вміст багатьох елементів у верхніх шарах Землі. Їх усереднені показники, за пропозицією О. Ферсмана, одержали у 1923 р. назву «кларк».

Отже, *кларк* (К) – це середній вміст (%) хімічного елемента в земній корі, гідросфері, ґрунті, живій речовині та космічних об'єктах. Геохіміки використовують також інші одиниці виміру кларка – вагові (г/т, г/г) та атомні (% від числа атомів), оскільки за низьких величин кларків багатьох елементів використовувати відсоткове значення незручно. Дані про вміст (кларки) хімічних елементів у земній корі, морській воді, рослинних і тваринних організмах наведено в табл. 3.1. Вони базуються на сучасних радіометричних, нейтронно-активаційних, атомно-абсорбційних та інших методах аналізу і свідчать, що кларки елементів у живих організмах і земній корі зазвичай не збігаються. Наприклад, Ti і Sr трапляються у великих кількостях у земній корі, хоча в організмах містяться у вигляді сліду. Отже, хімічний склад живих організмів не є безпосереднім відображенням хімічного складу земної кори.



Франк-Уїгльсворт Кларк  
(1847 – 1931) рр.

Таблиця 3.1

**Середній вміст (кларки) хімічних елементів в земній корі,  
грунтах, морській воді, рослинах, тваринах, %**

Елемент	Земна кора	Грунти	Морська вода	Рослини	Тварини
Оксиген *	47,2	49,0	85,7	65-70	65,0
Сіліцій	27,7	31	$3 \cdot 10^{-5}$	0,15	$1 \cdot 10^{-3}$
Алюміній	8,5	7,12	$1 \cdot 10^{-6}$	0,02	$1 \cdot 10^{-5}$
Ферум	5,1	3,8	$1 \cdot 10^{-6}$	0,02	0,01
Карбон *	0,023	2,0	0,0026	15-18	20-21
Кальцій	3,6	1,37	0,04	2,0	1,5
Калій	2,6	1,36	0,038	0,4	0,27
Натрій	2,5	0,63	1,05	0,03	0,1
Магній	2,35	0,6	0,135	0,07	0,03
Нітроген *	0,04	0,1	$5 \cdot 10^{-5}$	0,3	3,1
Гідроген *	0,15	$1 \cdot 10^{-8}$	10,8	8-10	9-10
Фосфор	0,08	0,08	$7 \cdot 10^{-6}$	0,6	0,95
Сульфур	0,05	0,05	0,0885	0,03	0,16
Манган	0,10	0,085	$4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Стронцій	0,04	0,03	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Барій	0,05	0,04	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Церій	0,02	0,02	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Хром	0,02	0,019	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Флуор	0,062	0,02	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Ванадій	0,03	0,01	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Хлор	0,03	0,017	1,9	0,01	0,08
Цинк	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Нікол	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Купрум	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Кобальт	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$
Літій	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Плюмбум	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Бор	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Іод	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$
Молибден	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$
Арсен	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$
Бром	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Кадмій	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Торій	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Уран	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Селен	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Меркурій	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$
Аргентум	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-5}$
Аурум	$5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Радій	$2 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$
Титан	0,61	0,46	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$

\* – органогени

Майже половина маси земної кори припадає на Оксиген, понад чверть – на Силіцій. Загалом п'ятнадцять елементів – Оксиген, Силіцій, Алюміній, Ферум, Кальцій, Натрій, Калій, Магній, Гідроген, Титан, Хлор, Фосфор, Карбон, Сульфур, Нітроген – складають 99,68% маси земної кори. Постійну основу живих організмів складають біогенні елементи – С, N, H, O, P, S, K, Na, Ca, Mg, Cl, I, B, V, Mn, Fe, Cu та ін., чотири з яких (O, C, H, N) одержали назву «*органогени*» (останніх у живій речовині до 98%). З цього можна зробити висновок про існування природного добору елементів. Причому є підстави вважати, що геологічні та геохімічні умови не мали значного впливу на відбір хімічних елементів життя (див. підрозділ 3.2).

У табл. 3.2 представлені основні сполуки для хімічних елементів у морській воді. Зокрема, лужні метали (Li, K, Na, Rb, Cs) наявні у вигляді простих гідратованих йонів. Значна частина Mg та негалоїдних елементів утворюють складні сполуки (сульфати, карбонати та ін.). Отже, у клітинах живих організмів містяться майже усі відомі хімічні елементи, але у різних кількостях.

*Розсіяні елементи* – це група хімічних елементів (Rb, Cd, Cs, Sc, Ga, In, Tl, Ge, Hf, V, Se, Te, Re), які зустрічаються в природі переважно у вигляді домішок у різних мінералах.

Елементи, вміст яких не перевищує 0,01–0,0001%, називають *рідкісними*. Їх перелік рідкісних елементів точно не встановлений. Якщо рідкісні елементи не утворюють власних мінералів, їх називають *рідкісними розсіяними* (Br, In, Ra, U, Se та ін.).

Відношення кларка елемента в живій речовині до його кларка в літосфері російський геохімік Олександр Ілліч Перельман (1916–1998) назвав *біофільністю* елемента і охарактеризував кларки концентрації хімічних елементів у живій речовині. Найактивніше концентрується в живій речовині С (біофільність 780), слабкіше – N (160), H (70), O (1,5), Cl (1,1), S (1), P (0,75), B (0,83), Br (0,71) і т. д. Біофільність решти елементів менша одиниці. Найменш біофільні Al (0,0006), Fe (0,002) та ін. Отже, жива речовина переважно складається з рухливих елементів у вигляді газів і розчинних сполук.

**Основні сполуки (або йони) у вигляді яких хімічний елемент  
знаходиться у морській воді**

Елемент	Сполука або йон	Елемент	Сполука або йон
H	H <sub>2</sub> O	V	VO <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub> O <sup>2-</sup>
He	He	Mn	Mn <sup>2+</sup> , MnSO <sub>4</sub>
Li	Li <sup>+</sup>	Fe	Fe(OH) <sub>3</sub>
Be	Be(OH) <sup>+</sup> , Be(OH) <sub>2</sub>	Co	Co <sup>2+</sup> , CoSO <sub>4</sub>
B	B(OH) <sub>2</sub> O <sup>-</sup> , B(OH) <sub>2</sub>	Ni	Ni <sup>2+</sup> , NiSO <sub>4</sub>
C	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , органічні сполуки	Cu	Cu <sup>2+</sup> , CuSO <sub>4</sub>
N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N <sub>2</sub> , органічні сполуки	Zn	Zn <sup>2+</sup> , ZnSO <sub>4</sub>
O	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> (газ), SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , інші аніони	As	HA <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , H <sub>3</sub> As <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub>
F	F <sup>-</sup>	Se	SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Ne	Ne (газ)	Br	Br <sup>-</sup>
Na	Na <sup>+</sup>	Kr	Kr (газ)
Si	Si(OH) <sub>4</sub> , Si(OH) <sub>3</sub> O <sup>-</sup>	Rb	Rb <sup>+</sup>
P	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , H <sub>3</sub> PO <sub>3</sub>	Sr	Sr <sup>2+</sup> , Sr SO <sub>4</sub>
S	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mo	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Cl	Cl <sup>-</sup>	Ag	AgCl <sup>2-</sup> , AgCl <sub>3</sub>
Ar	Ar (газ)	Cd	Cd <sup>2+</sup> , Cd SO <sub>4</sub>
K	K <sup>+</sup>	I	IO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , I <sup>-</sup>
Ca	Ca <sup>+</sup> , CaSO <sub>4</sub>	Cs	Cs <sup>+</sup>
W	WO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ba	Ba <sup>2+</sup> , BaSO <sub>4</sub>
Mg	Mg <sup>2+</sup> , MgSO <sub>4</sub>	Rn	Rn (газ)
Au	AuCl <sub>4</sub>	U	UO <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> <sup>4-</sup>

Оскільки хімічні елементи можуть знаходитися як у вільному стані, так і у вигляді сполук, то хімічний склад живої речовини умовно розглядають на атомному (макро-, мікро- та ультрамікроелементи) і молекулярному (вода, неорганічні та органічні сполуки) рівнях.

**Атомний рівень.** За кількісною ознакою хімічний елементарний склад живої матерії (біогенні елементи) поділяється на три групи: 1) *макроелементи* (концентрація – від десятих до  $10^{-3}$  % маси тіла): O, H, C, N, P, Ca, S, Na, K, Mg, Cl, Si, Fe. Серед них на органогени O, H, C, N припадає до 98% маси тіла; 2) *мікроелементи* (концентрація – від  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  % маси тіла): F, Mn, Cu, I, B, Zn, Co, Mo, V та ін.; 3) *ультрамикроелементи* (концентрація <  $10^{-6}$  % маси тіла): As, Ag, Hg, Au Pb, Se, Ti, Ra та ін.

У деяких організмах такий кількісний вміст може порушуватися, оскільки вони мають природну здатність до накопичення окремих елементів, зокрема водорості – Йоду (I), болотна ряска – Радію (Ra) тощо. Організми вибірково асимілюють із зовнішнього середовища необхідні елементи, які потім акумулюються у певних тканинах і органах (В. Вернадський).

Поділ усіх хімічних елементів на макро-, мікро- та ультрамікроелементи є умовним, оскільки важливість того чи іншого елемента визначається не його кількістю, а функціональною роллю. Деякі хімічні елементи входять до складу ферментів, гормонів, хлорофілу, гемоглобіну, вітаміну  $B_{12}$  та інших біологічно активних речовин – неодмінних і незамінних учасників процесів розмноження, росту і розвитку організмів, обміну речовин та адаптації їх до умов навколишнього середовища. Зокрема, для білкового, вуглеводного та ліпідного обміну речовин необхідні: Mo, Fe, V, Co, W, B, Mn, Zn; в синтезі білків беруть участь: Mg, Mn, Fe, Co, Cu, Ni, Cr; у кровотворенні – Co, Cu, Mn, Ni, Zn; в диханні – Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, Co. Саме тому мікроелементи широко застосовують як мікродобрива для сільськогосподарських культур, підкорму у тваринництві.

Більшість мікро- та ультрамікроелементів є важкими металами, що мають високу біологічну активність. Отже, процентний вміст хімічного елемента в організмі не завжди відображає його біологічне значення.

Хімічні елементи надходять з водою, повітрям чи їжею, засвоюються організмом і розподіляються в його тканинах; виконують роль активних учасників і регуляторів біохімічних процесів, будівельного матеріалу та взаємодіють один з одним, депонуються і, у підсумку, виводяться з організму.

Для живих організмів найбільш сприятливим біогеохімічним середовищем є не вся земна кора, не всі хімічні явища літосфери, гідросфери й атмосфери, а лише система водних розчинів та доступних газів у цих сферах. Ефективно дістатися до клітин мікроорганізмів, рослин і тварин можуть ті елементи, які утворюють:

1) водорозчинні сполуки у вигляді йонів; вміст катіонів і аніонів у клітині відрізняється від їхньої концентрації у навколишньому середовищі і регулюється клітинними мембранами;

2) молекули газів біогенного походження ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $CH_4$ ,  $NO_2$  та ін.).

Подібність елементарного хімічного складу клітин усіх організмів свідчить про єдність живої природи. Наявність в клітинах ряду елементів залежить від особливостей організму, хімічного складу середовища та їжі, розчинності сполук або йонів в ґрунтовому розчині та ін.

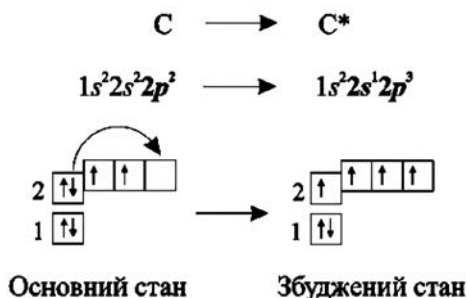
### **3.2. Особливості Карбону як елементу життя**

Феномен життя в біосфері здійснюється за матричним принципом синтезу первинних органічних речовин – ДНК, РНК, амінокислот, білків. Науковим ядром (фундаментом) біологічної науки є принцип «ДНК – мітоз», який не можна спростувати. Основу всіх органічних сполук і речовин живих організмів становить елемент Карбон. Чотири елементи-органогени Оксиген, Гідроген, Нітроген, Карбон складають майже 98% загального хімічного складу живих організмів.

Згідно з теорією хімії міцність ковалентного зв'язку зворотно пропорційна атомним вагам атомів, що його утворюють. Є підстави вважати, що жива речовина вибрала саме ці чотири найлегші елементи завдяки утворенню ними міцних ковалентних зв'язків. Отже, з погляду хімії, жива речовина біосфери є киснево-водневою системою, багатою на Карбон. Вченим невідома інша, некарбонова форма життя на Землі, хоча в космосі та земній корі (неживій природі) вміст його незначний (у Всесвіті панують лише Гідроген і Гелій). Чому саме Карбон виявився придатним для створення структурної основи біологічних молекул життя? Пояснення криється в унікальності Карбону. Особлива електронна будова його



атома –  $1s^2 2s^2 2p^2$  – на зовнішньому електронному шарі міститься чотири електрони ( $2s^2 2p^2$ ). Це дає змогу при збудженні зовнішнього шару до стану  $2s^1 2p^3$  використовувати вакантну  $2p_z$ -орбіталь для утворення чотирьох стабільних ковалентних зв'язків між атомами Карбону (одинарних, подвійних, потрійних, спряжених подвійних в ароматичних сполуках).



Хімічний зв'язок може здійснюватися за рахунок утворення  $sp^3$ -,  $sp^2$ - і  $sp$ - гібридних орбіталей. У результаті можуть виникати стійкі каркаси органічних молекул, ланцюжки довжиною в десятки і навіть тисячі атомів Карбону. Спарені під час ковалентного зв'язку електрони утворюють навколо кожного атома Карбону пра вильну тетраедричну конфігурацію (наприклад, алкани).

У сполуках Карбон виявляє ступені окиснення:  $-4$ ;  $+2$ ;  $+4$ , тобто його атоми здатні однаковою мірою як приспівувати, так і віддавати електрони. Специфікою органічних сполук є зміна їх хімічної активності під дією певних каталізаторів (або інгібіторів) при певному значенні рН.

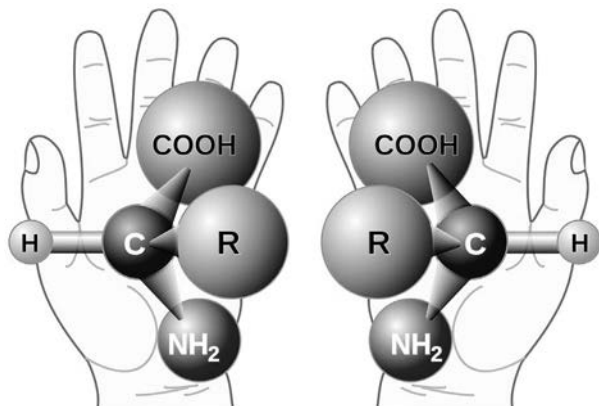
Іншою особливістю Карбону є здатність легко утворювати стійкі ковалентні зв'язки з атомами Оксигену, Гідрогену, Нітрогену, Сульфур, Фосфором, що важливо для функціонування біологічно активних молекул (ферментів, АТФ та ін.). Жоден інший елемент (окрім Карбону) неспроможний створювати величезну кількість стабільних молекул з різноманітними розмірами, конфігураціями, функціональними групами, що визначають біохімічні і генетичні (інформаційні) властивості органічних сполук.

Аналог Карбону по головній підгрупі IV групи – Силіцій (Si) – дуже поширений у земній корі (неживій природі) і також має здатність утворювати ковалентні хімічні зв'язки Si-Si, Si-C, але:

1) такі зв'язки не здатні створити стабільні біологічно-інформативні молекули з довгими ланцюжками;

2) на відміну від C, Si не утворює делокалізовані  $\pi$ -зв'язки, які зв'язують більше двох атомів, що унеможлиблює складні фотохімічні реакції фотосинтезу (Л. Войтенко, 2019).

Ще один феномен живої речовини, пов'язаний з Карбоном, – явище *оптичної ізомерії*. Оптично активні молекули містять асиметричний атом Карбону (позначають C\*), сполучений з чотирма різними атомами або групами атомів (лігандами). Такі асиметричні молекули не мають центра симетрії, площин симетрії, тому їх ще називають *хіральними* (грец.  $\chi\epsilon\iota\rho$  – рука). Хіральні (несиметричні) молекули не можна сумістити з їх дзеркальним відображенням, як не можна сумістити праву і ліву руку (мал. 23).



Мал. 23. Візуалізація поняття хіральності.

За наявності в молекулі органічної речовини  $n$  асиметричних атомів Карбону кількість оптичних ізомерів виражається формулою:  $2^n$ , де  $n$  – число C\* у молекулі. Наприклад, у молекулі молочної кислоти міститься один асиметричний атом C\*, тому повинні існувати два ( $2^1 = 2$ ) просторових ізомери цієї кислоти.

Усі живі організми біосфери здійснюють безпомилковий синтез оптичних ізомерів (амінокислот, моносахаридів, органічних кислот, алкалоїдів тощо), що чітко різняться між собою лише за оптичною активністю –

здатністю повертати (відхилити) площину поляризації світла на певний кут при проходженні поляризованого променя світла через їх розчин. Відхилення площини вліво (проти годинникової стрілки) позначають (-), вправо – (+). Оптичну активність визначають експериментально за допомогою *поляриметра*.

За хімічним складом, температурою кипіння і плавлення, тепло- та електропровідністю такі оптичні ізомери не відрізняються один від одного, але мають різну фізіологічну дію на живі організми. Це явище має загальнобіологічне значення, оскільки пов'язане зі стійким порушенням явища симетрії в живій матерії. Поляризоване світло при проходженні крізь протоплазму живої клітини відхилюється тільки вліво. Живі організми синтезують лише один тип ізомерів: лівообертаючі (-) амінокислоти для побудови нативних білків; правообертаючі (+) пентози – для дезоксирибози ДНК і рибози РНК, АТФ. Штучний синтез цих речовин дозволяє одержати лише рацемати, тобто суміші (-) і (+) ізомерів, які оптично і біологічно неактивні. У неживій природі (в кристалах) зустрічаються як ліво-, так і правообертаючі форми. Хірально чистота пентоз є необхідною умовою для реплікації ДНК, обумовлює специфіку живого, свідчить про практичну неможливість одержання живого з неживого та існування якісної межі між живим і неживим.

*Оптичні властивості нафти, її походження.* Переважна більшість геологів вважає, що нафта має біогенне походження (В. Соколов, 1968; В. Білоножко, 2018). Прихильниками неорганічного походження нафти є В. Порфір'єв (1987), Є. Чекалюк (1971), І. Чебаненко (1999) та ін. У такому разі, як наголошував В. Вернадський, потрібно було б припустити, що вуглеводні утворюються в глибинних частинах планети, за межами земної кори. Проте ці припущення не можна перевірити.

Відкинувши ці припущення, вчений проаналізував умови утворення нафти в межах верхньої оболонки Землі, доступні для безпосереднього вивчення. На думку В. Вернадського, «... дисиметрія дає змогу безповоротно вирішити питання про генезис нафти, про її зв'язок з явищами життя». На підставі огляду фактичного матеріалу щодо оптичних властивостей

нафт вчений дійшов такого висновку: «Оптичні властивості нафт дають новий доказ, що підтверджує неможливість для них неорганічного генезису. Цей доказ, очевидно, беззаперечний і яскраво свідчить про їхнє біогенне походження. Усі штучно одержані вуглеводні, не зв'язані генетично з продуктами життя, оптично недіяльні» (В. Вернадський, 2012, с. 450-451).

В. Вернадський пише: «Жива речовина складається з хімічних молекул, які мають енантіоморфну будовою в дисиметричному її прояві, і вона може бути початком утворення нових енантіоморфних тіл тієї ж дисиметричної будови. Помираючи, у залишках своєї речовини, у сполуках свого тіла живі організми залишають дисиметричні структури, які, інакше кажучи, відсутні в земній корі, а ймовірно, і на всій нашій планеті... в земній корі тільки життя і матеріальні продукти його руйнування можуть володіти дисиметрією, тобто виявляти можливість проявів правизни і лівизни, чи їх нерівністю. Для живої речовини ця її властивість виявляється і в іншому явищі, що різко відрізняє її від закостенілих тіл земної кори, як дисиметрія складу тіл, що будують організм. Це – зміна поколінь у живому організмі, розмноження, безперервне створення дисиметричних тіл... дисиметрія може бути зумовлена тільки такою ж дисиметрією. Життя відсутнє в земних глибинах там, де раніше шукали генезис нафти» (В. Вернадський, 2012, с. 451–452).

Як зазначив В. Вернадський, зовсім незрозуміло, чому прихильники неорганічного походження нафти так довго нехтували оптичною діяльністю нафт, і що в разі створення численних теорій їхнього генезису не брали це до уваги. Тепер чітко з'ясовано: «нафти – тіла, що мають оптично активну будову з різкою відмінністю правого і лівого антиподів. Різко в природі переважають праві нафти. Такого характеру сполуки вуглецю створюються тільки в біосфері і тільки живою речовиною. Всі мінерали вуглецю, які не мають біохімічного походження, оптично інертні» (В. Вернадський, 2012, с. 453). Це явище властиве не тільки нафті, а й усім залишкам організмів планети.

Отже, феномен Карбону в живій речовині біосфери існує і потребує подальшого наукового дослідження та обговорення.

### 3.3. Геохімічна класифікація хімічних елементів

Геохімічна класифікація елементів не може бути замінена класифікацією на основі періодичного закону Д. Менделєєва, хоча останній має для геохімії теоретичне і практичне значення. Споріднені у періодичній системі елементи поведуть себе у земній корі чи живій речовині неоднаково. Наприклад, Na і K, Cl і I, Cr і Mo – елементи-аналоги в хімії, але у земній корі мігрують по-різному. Отже, геохімічна класифікація має специфічні принципи побудови.

**Геохімічна класифікація хімічних елементів** – класифікація елементів на основі спільних закономірностей поведінки в геологічних процесах, тобто за ознакою їх геохімічної подібності.

Загальноприйнятими є класифікації В. Вернадського та норвезького вченого Віктора-Моріца Гольдшміда (1888–1947), хоча існують класифікації інших авторитетних геохіміків (О. Ферсмана, О. Заварицького, О. Перельмана, Ю. Щербакова, Б. Гаврусевича, Г. Вашингтона, Е. Садецькі-Кардоша та ін.).

**Класифікація В. Вернадського** (1922, 1927). Вона містить шість груп елементів (табл. 3.3). В основу поділу на групи покладено принципи, що визначили геохімічну історію елемента у земній корі, а саме: хімічна активність елемента (здатність утворювати хімічні сполуки); його участь (поведінка) в циклічних процесах міграції в біосфері; перевага розсіяного стану; висока радіоактивність.

*Благородні гази* зазвичай рідко утворюють сполуки з іншими атомами, тому в природних геохімічних процесах їх участь вважається незначною. *Благородні метали* є сполуками відносно рідкісними; наявні переважно у формі сплавів; утворюються здебільшого у глибинних процесах (магматичних, гідротермальних) земної кори. Циклічні елементи є найбільшою групою. За масою вони переважають у земній корі, з них складаються гірські породи, природні води, живі організми; вони беруть участь у біогеохімічних колообігах. Для кожного елемента цієї групи характерний певний перелік хімічних сполук, що виникає й розпадається під час перебігу природних процесів. Отже, кожний елемент проходить ланцюг

перетворень і у підсумку повертається до вихідного стану, і так далі. Цикли не є повністю оборотними, частина елементів постійно виходить з колообігу (але така сама частина знову до нього залучається).

Таблиця 3.3

### Геохімічні групи елементів за В. І. Вернадським

Група	Склад групи	Хімічні елементи	%, від загальної маси земної кори
I	Благородні гази	He, Ne, Ar, Kr, Xe	$5 \cdot 10^{-4}$
II	Благородні метали	Ir, Os, Pt, Au, Pd, Ru, Rh	$5 \cdot 10^{-6}$
III	Циклічні елементи (група міграції)	H, Be, B, C, N, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Se, Sr, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Ba, Hf, W, Re, Hg, Tl, Pb, Bi	99,8
IV	Розсіяні елементи	Li, Sc, Ga, Br, Rb, Y, Nb, In, I, Cs, Ta	$5 \cdot 10^{-2}$
V	Сильно радіоактивні елементи	Po, Rn, Ra, Ac, Th, Pa, U	$5 \cdot 10^{-3}$
VI	Рідкісноземельні елементи	La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	$5 \cdot 10^{-2}$

*Розсіяні елементи* поширені в природі; зазвичай не утворюють хімічних сполук. Незначна частка з них може брати участь в утворенні самостійних мінеральних сполук (у глибинних процесах; I та Br – у гіпергенних). *Радіоактивні елементи* специфічні, оскільки в геохімічних процесах відбувається постійне перетворення (розпад) одних елементів у інші, що ускладнює процеси їхньої міграції.

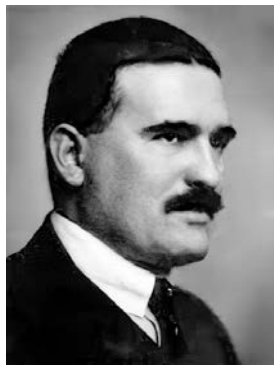
*Рідкісноземельні елементи* тяжіють до розсіяних. Основна їх властивість – спільна (сумісна) міграція. Класифікації В. Вернадського умовна, оскільки:

1) існують хімічні елементи, що займають проміжне положення між групами, тобто вони здатні поводити себе у процесах міграції двоюко;

2) виокремлення особливої групи радіоактивних елементів не враховує різну стійкість ізотопів; у деяких елементів суттєвою є частка як стабільних, так і нестабільних ізотопів. Саме тому геохімічна історія відповідних

часток загального числа атомів елемента буде різнитися для K, Rb, Sm, Re та ін. Нині, у зв'язку з процесами радіоактивного забруднення довкілля, спричиненого вибухами на Чорнобильській АЕС, Фукусіма-1 та іншими техногенними чинниками, необхідно враховувати також і міграцію штучних радіоактивних ізотопів.

**Класифікація В. Гольдшмідта (1924).** Геологічні оболонки Землі виокремлено наукою у вигляді земної кори, мантії і ядра. Мантія і земне ядро недоступні для безпосередніх досліджень, і уявлення про їхню геохімію базуються на опосередкованих, переважно геофізичних, даних (отриманих на основі вивчення поширення сейсмічних хвиль у них). Встановлено, що середня густина Землі складає  $5,52 \text{ г/см}^3$ , а порід земної кори –  $2,8 \text{ г/см}^3$ . Вчені пояснюють високу густину земних глибин двома причинами: зміною складу (зокрема, збільшенням кількості важких металів Fe, Ni); фазовими перетвореннями легких мінералів, про що свідчить відкриття важких поліморфних різновидів  $\text{SiO}_2$  – стишовіту (з густиною  $4,35 \text{ г/см}^3$ ) та коеситу –  $2,93 \text{ г/см}^3$ .



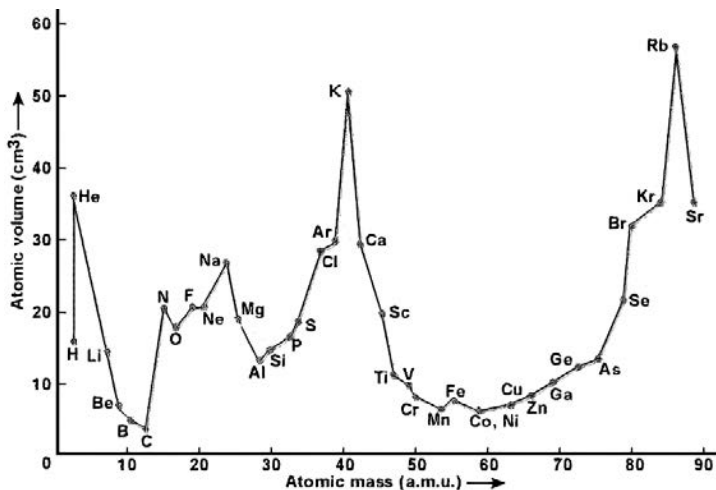
Віктор Моріц Гольдшмідт  
(1888 – 1947) рр.

В. Гольдшмідт зробив наукове припущення, що диференціація елементів на розплавленій планеті була подібна до процесу виплавляння металу з руд у металургійній печі, за якого на дно печі опускається важкий метал з густиною близько  $7 \text{ г/см}^3$ , а на поверхню піднімається легкий силікатний шлак (аналог земної кори). Поміж ними розташовується шар штейну – сульфід феруму ( $\text{FeS}$ ) із домішками сульфідів інших металів (аналог мантії).

Розподіл (стратифікація) елементів по оболонках Землі (від кори до центру планети), за В. Гольдшмідтом, залежить від здатності елементів формувати природні асоціації, яку визначають такі фактори:

1) положення елементів на кривій атомних об'ємів Ю. Мейера. Німецький хімік Юліус Лотар Мейер (1830–1895) розглядав об'єми, що займають вагові кількості хімічного елемента, чисельно рівні їхній атомній масі. Атомний об'єм – це об'єм 1 г атомів елемента, що дорівнює частці

від поділу атомної маси на густину простої речовини у твердому стані. За величиною атомного об'єму розраховують простір, що займає атом конкретного елемента. Графічна залежність атомних об'ємів елементів від їх атомних мас має вигляд хвиль, що піднімаються гострими піками у точках, які відповідають лужним металам Na, K, Rb (мал. 24). Кожний спуск і підйом до піку відповідає періоду таблиці елементів Д. Менделєєва. Об'єм і радіус атома залежать від того, у який спосіб чином він зв'язаний з іншими атомами;



Мал. 24. Графік Мейера (крива атомних об'ємів хімічних елементів).

2) будова електронних оболонок (безпосередньо пов'язана з хімічними властивостями елементів);

3) хімічна «спорідненість» елемента – схильність елемента до утворення певних сполук із іншими елементами (вимірюється значеннями енергії утворення певних типів їхніх сполук, наприклад оксидів чи сульфідів).

Класифікація В. Гольдшмідта передбачає поділ усіх хімічних елементів на чотири групи відповідно до стійкості різних типів їхніх сполук у природі. Вчений розподілив елементи за трьома принциповими фазами: силікатна (киснева), сульфідна і металева. «Еталоном» щодо класифікації елементів є Fe – елемент з високою поширеністю у земній корі. Відповідно В. Гольдшмідт виокремив (мал. 25; табл. 3.4):



1) літофільні елементи (*літофіти*) – збагачують силікати (O, Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, B, P, Al, Cl, I, Br, Y, Tr, Si, Ti, Zr, Hf, Th, U, Nb, Ta, W і ін.), всього 54 елементи;

2) халькофільні елементи (*халькофіли*) – збагачують сульфіди (S, Se, Te, As, Sb, Bi, Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg, In, Tl, Pb та ін.); всього 19 елементів;

3) сидерофільні елементи (*сидерофіли*) – збагачують металічну фазу ядра Землі з утворенням сплавів (Fe, Ni, Co, P, C, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au, Mo).

4) атмофільні елементи (*атмофіли*) – для них в умовах земної поверхні характерний газоподібний стан і накопичення в атмосфері (H, N, C, O та інертні елементи).

## Класифікація В. Гольдшміда

		Елементи:																				
		<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black;"></span> літофільні елементи (літофіти) <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: cyan; border: 1px solid black;"></span> сидерофільні елементи (сидерофіли) <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: orange; border: 1px solid black;"></span> халькофільні елементи (халькофіли) <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: white; border: 1px solid black;"></span> атмофільні елементи (атмофіли)																				
п/г	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	1	2				
1																	H	He				
2	3	4							5	6	7	8	9	10			B	C	N	O	F	Ne
3	11	12							13	14	15	16	17	18			Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54				
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
6	55	56	*	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86				
	Cs	Ba	Lan	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
7	87	88	89	90	91	92																
	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U																
*			57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71					
			Lan	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Dv	Tb	Dv	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				

Мал. 25. Класифікація хімічних елементів В. Гольдшміда.

Крім того, В. Гольдшмід виокремив додаткову групу елементів – *біофільні елементи (біофіли)*, які є основними компонентами організмів (C, H, O, N, P, S, Cl, I, B, Ca, Mg, K, Na, V, Mn, Fe, Cu).

Ряд елементів із проміжними властивостями потрапив у декілька груп: Ga, Ge, Sn, Nb, Ta, W. Повторення елементів у різних групах науковець вважав допустимим, оскільки при виокремленні атмофілів і біофілів застосовували різні принципи класифікації.

**Геохімічна класифікація елементів за В.М. Гольдшмідтом (1924 р.)**

Елементи та їх властивості	Будова іона	Магнітні властивості	Хімічна спорідненість	Інші властивості
<i>Атмофільні:</i> H, He, N, O, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn	Неіонізовані атоми	Діамагнітні	У природі знаходяться у вигляді елементів	Газоподібний стан. Входять до складу атмосфери
<i>Літофільні:</i> Li, Be, B, C, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Se, Ti, V, Cr, Mn, Br, Cl, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, I, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Ra, U, Th	Іони побудовані за моделлю благородних газів: зовнішня оболонка має 8 електронів (2s-та бр-електронів)	Парамагнітні	Спорідненість до O, галогенів	Густина оксидів відносно не висока. Складають 95% кам'янистої оболонки Землі (до 120 км завглибшки)
<i>Халькофільні:</i> S, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po	Іони побудовані за моделлю атома благородних газів: зовнішня оболонка з 18 електронів (2s-, 6p-, 10d-). Виключення складають S, Se, Te, As, Sb	Діамагнітні. Діамагнетизм у межах групи періодичної системи зростає із порядковим номером	Спорідненість до S, Se, Te	Розплавлені сульфідні розчинні у розплаві FeS. Входять до складу халькосфери Землі (до 1200 км завглибшки)
<i>Сидерофільні:</i> Fe, Co, Ni, Mo, Tc, Ru, Rh, Os, Ir, Pt, Re	Іони перехідного типу з числом електронів на зовнішній оболонці між 8 та 18	Феромагнітні та парамагнітні	Спорідненість до C, P, As, Sb	Велика густина. Часто зустрічаються у самородному стані. Входять до складу сидеросфери (ядро Землі)

Класифікація В. Гольдшмідта дає змогу передбачити існування основних типів хімічних сполук елементів у природі і чинників, що приводять до їх концентрації. Зокрема, халькофільні елементи концентруються у вигляді компонентів сульфідних руд, більшість сидерофільних елементів (Au, група Pt) концентруються у самородному стані.

**Класифікація О. Заварицького (1950).** Вона враховує Періодичну систему Д. Менделєєва. Поле таблиці автор поділив на 10 блоків:

- 1) благородні гази (від He до Rn);
- 2) елементи гірських порід (Na, Mg, Al, Si, K, Ca та ін.);
- 3) елементи магматичних еманцій (B, F, P, S, Cl, K, Ca та ін.);
- 4) елементи родини заліза (Fe, Co, Ni, Ti, V, Cr, Mn);
- 5) рідкісні елементи (Sc, Tr, Nb, Ta та ін.);
- 6) радіоактивні елементи (Ra, Th, U та ін.);
- 7) елементи металічні рудні (Cu, Zn, Sn, Hg, Ag та ін.);
- 8) елементи металоїдні та металогенні (As, Sb, Bi, Se та ін.);
- 9) платиноїди (Pt, Os, Ir та ін.);
- 10) важкі галоїди (Br, I).

**Класифікація елементів О. Перельмана (1989).** Вона враховує форми (катионна чи аніонна), інтенсивність й контрастність міграції хімічних елементів у біосфері, їхню здатність концентруватися на геохімічних бар'єрах (кисневому, сульфідному, глейовому, лужному, кислому, випаровувальному, сорбційному, термічному). У певних умовах (сильно кислого чи сильно лужного середовища) може відбуватися більш енергійна міграція елементів. Автор виокремив парагенні асоціації хімічних елементів – групи елементів, які осаджуються на геохімічних бар'єрах. У межах груп елементи розташовуються у порядку зменшення їхнього кларка. При подібних хімічних властивостях чим вищий кларк, тим більша геохімічна роль елемента.

Найважливіше класифікаційне значення мають форми міграції хімічних елементів. Вони поділяються на повітряні і водні мігранти. Повітряні мігрують як у газоподібному стані, так і з водними розчинами (зокрема, O і H у вигляді води і солей; C – CO<sub>2</sub>, Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>; N – у вигляді нітратів, солей амоніаку). Водні форми, зазвичай, не мігрують або слабо мігрують у газоподібному стані. До них належать елементи, що мігрують переважно у вигляді йонів, недисоційованих молекул і колоїдних частинок.

Класифікації О. Перельмана та О. Заварицького мають прикладне значення, оскільки відображають поведінку хімічних елементів у земній корі та їх міграційну здатність. Поняття «літофіти», «сидерофіли», «халькофіли», запропоновані В. Гольдшмідтом, широко використовують у багатьох працях з геохімії, геології та екології.

### 3.4. Закономірності розповсюдження і накопичення хімічних елементів живою речовиною

Хімічний склад живих організмів не є прямим відображенням елементарного хімічного складу середовища, в якому вони існують. Організми не повторюють хімічний склад середовища, а активно відбирають з нього певні сполуки. Нерідко конкретний вид накопичує певний хімічний елемент, що дає змогу у першому наближенні використовувати хімічний склад організмів як характерну ознаку популяцій цього виду.

Геохімічна робота живої речовини в біосфері є потужнішим чинником розділення елементів, ніж високі температури чи тиск (що характерно, зокрема, для глибин Землі). Різка диференціація елементів в біосфері призводить до формування порід і руд: вугілля, залізних, марганцевих, алюмінієвих руд, солей, фосфоритів та ін.

Біогеохімічне різноманіття різних ділянок біосфери пов'язане з видовим різноманіттям рослин, тварин і мікроорганізмів, серед яких є концентратори хімічних елементів. Зокрема, велика група сухопутних і морських тварин із внутрішнім чи зовнішнім вапняним скелетом концентрують Са (молюски, коралові поліпи, форамініфери та ін.). Після їхньої смерті утворюються вапняні осади – товщі морських вапняків. Губки, радіолярії, діатомові водорості та інші концентратори утворюють величезні скупчення кремнезему в озерах і морях (трепел, діатоміти, спонголіти, радіолярити). Відомі тварини, які містять завищені кількості Sr (радіолярії *Acantharia*), V (асцидії), Cu (молюски, раки, павуки) тощо.

За О. Виноградовим, здатність до концентрації елементів зменшується від нижчих форм організмів до вищих. Бактерії є найбільш диференційованими у геохімічному відношенні. Деякі хімічні елементи накопи чуються в їх клітинах у величезних кількостях (S в клітинах сіркобактерій, Fe – в залізобактеріях та ін.). Серед бактерій відомі види, що накопичують також Cu, Mn, Mo, Ba, Li, Ag, Pb, U у значно більших кількостях, ніж рослини і тварини.

Вже у XIX ст. агрохіміки диференціювали деякі культурні рослини на такі, що накопичують K (соляшник, картопля), Са (бобові), Si (злакові). Пізніше було встановлено рослини під умовними назвами: «алюмінієві»

(плауни, чай), «залізні» (мохи), «іодні» (водорості), «солянки» (Na, Cl та ін.), «селітрянки»(NO<sup>-</sup>) та ін. Особливо висока здатність до поглинання рідкісних елементів притаманна мохам і лишайникам.

Вибіркове накопичення металів різними таксонами рослин ілюструє табл. 3.5.

Запропоновано використовувати *коефіцієнт біологічного поглинання* (КБП або  $A_x$ ) – відношення вмісту елемента в золі рослин до його вмісту у ґрунті чи гірській породі; характеризує інтенсивність поглинання елементів рослинами. При величині  $A_x > 1$  елементи накопичуються в рослинах, а при меншій – тільки захоплюються. Для O, C, H не можна розрахувати КБП (вони відсутні в золі).

Перші розрахунки цього показника зробив геохімік і ґрунтознавець Борис Борисович Полинов (1877– 1952). У подальшому Олександр Ілліч Перельман за коефіцієнтом біологічного поглинання розподілив елементи на чотири ряди – ряди біологічного накопичення елементів O. Перельмана :

1) елементи енергійного біологічного накопичення, КБП > 10 (P, S, Cl, I, Zn, Ag, B, Br);

2) елементи сильного накопичення, КБП = 10 і трохи менше (K, Ca, Mg, Na, Mn, Se, Cu, Hg, As, Sr);

3) елементи середнього біологічного захоплення, слабо накопичуються, КБП = 0,1 (Mn, F, Ni, Pb, Co, Mo, Ba, Ra);

4) елементи слабого і дуже слабого захвату, КБП = 0,01 – 0,001 (Fe, Si, V, Li, Y, Sc, Ti, Ta, W, Cr, Al, U, Zr).

Таблиця 3.5

### Вибіркове накопичення металів рослинами (Хентов В.Я., 2005)

№	Таксон рослин	Підвищений вміст металів
1	Синьо-зелені водорості (Cyanophyta)	Fe, Co, Ni, Zn
2	Червоні водорості (Rhodophyta)	Mg, Fe, Co, Ni
3	Зелені водорості (Chlorophyta)	Ti, V, Cr, Cu
4	Бурі водорості (Phaeophyta)	Ti, V, Ni, Zn
5	Мохоподібні (Bryophyta)	Al
6	Папоротеподібні (Pteridophyta)	Al
7	Голонасінні (Gymnospermae)	Mn
8	Покритонасінні (Anthophyta)	Mn, Mo

Поглинання елемента не завжди супроводжується його нагромадженням в організмі. Це залежить від таких чинників: фізіологічної ролі елемента; особливостей геохімічного середовища існування рослин; особливостей виду рослини, фази її розвитку.

Аналіз наукової літератури свідчить, – на міграцію, розсіювання та накопичення хімічних елементів у природі впливають наступні фактори:

1) атомна маса елементів. Саме В. Вернадському належить пріоритет встановленої закономірності – зменшення вмісту хімічних елементів в живих організмах пов'язано із підвищенням атомної маси елементів у напрямі зверху вниз у періодичній системі хімічних елементів Д. Менделєєва. Сучасне розуміння будови атома дозволяє говорити, що зменшення кількісного вмісту хімічних елементів в організмі закономірно пов'язано із збільшенням заряду ядра атомів елементів у групі у тому ж напрямі (табл. 3.6). Із ростом атомного номера елемента закономірно змінюється не тільки хімічні властивості елементів, але й їх розміри – атомні та йонні радіуси;

Таблиця 3.6

**Кількісний вміст хімічних елементів в організмі людини залежно від їх відносної атомної маси та заряду ядра**

Хімічний елемент	Номер групи	Атомна маса	Заряд ядра	Масова частка, %
C	IV A	12,011	+ 6	21
Si		28,086	+14	$1 \cdot 10^{-3}$
Ge		72,59	+32	$1 \cdot 10^{-6}$
Sn		118,69	+50	$1 \cdot 10^{-4}$
Pb		207,19	+82	$1 \cdot 10^{-6}$
N	V A	14,0067	+ 7	3,1
P		30,9738	+15	0,95
As		74,9216	+33	$1 \cdot 10^{-6}$
Sb		121,75	+51	$1 \cdot 10^{-6}$
Bi		208,98	+83	$1 \cdot 10^{-6}$
Zn	II B	65,38	+30	$1 \cdot 10^{-3}$
Cd		112,40	+48	$1 \cdot 10^{-4}$
Hg		200,59	+80	$1 \cdot 10^{-6}$

2) розміри атомних та йонних радіусів суттєво впливають на процеси міграції. Йонні радіуси визначають розчинність сполук, їх твердість, температуру плавлення і кипіння, структуру і енергію кристалічних ґраток

мінералів. Роботами О. Ферсмана встановлено, що дальність міграції зростає зі збільшенням радіуса йона хімічного елемента.

Існує явище *ізоморфізму* – взаємного заміщення йонів або атомів в хімічних сполуках кристалічної будови. Саме близькість значень атомних та йонних радіусів має важливіше значення, ніж аналогія в хімічній поведінці. З даних позицій одержали пояснення факти сумісного знаходження елементів в мінералах (Mg, Fe<sup>2+</sup> і Ni; K, Ba і Pb; Zr і Hf; Ta і Nb; K і Ti; Ca і Na; K і Ba та ін.).

Зокрема, існують два аналогії по підгрупі II (A) – Mg і Be. Проте Be не знаходять як домішок у мінералах Mg земної кори. В них часто можна знайти Ni – хімічний елемент першого тріади VIII (B) групи періодичної системи. Це можна пояснити тим, що йонний радіус Be (0,0034 нм) значно різниться від радіуса Mg (0,075 нм). У свою чергу йонний радіус Ni (0,074 нм) майже співпадає із радіусом Mg. Визначення розмірів атомів та йонів здійснюється за допомоги рентгеноструктурного методу вивчення кристалічних решіток та їхніх параметрів (за характером дифракції рентгенівських променів).

3) електронна будова, валентність атома. Ці показники безпосередньо пов'язані із хімічною здатністю утворювати різні сполуки. Багато елементів в біосфері мають змінну валентність, що ускладнює їхню міграцію – атоми поводять себе як різні елементи. Так, Fe<sup>2+</sup> дуже рухливий, нагадує за інтенсивністю міграції Ca<sup>2+</sup> та інші двовалентні катіони. Fe<sup>3+</sup>, навпаки, малорухливий і нагадує Al<sup>3+</sup> та Cr<sup>3+</sup>. Як різні елементи поводять себе V<sup>3+</sup> та V<sup>3+</sup>: перший подібний до P<sup>3+</sup>, другий – до Fe<sup>3+</sup>. Біологічні процеси мають окисно-відновний характер, у зв'язку із чим у ході тривалої еволюції організми набули властивість використовувати елементи зі змінною валентністю. Зокрема, Fe гемоглобіну відіграє величезну роль в окисно-відновних реакціях крові, а Mg хлорофілу – у процесах фотосинтезу усіх рослин планети;

4) розчинність у воді, здатність до гідролізу. В живих організмах у більших кількостях знаходяться елементи (O, C, H, N, Ca, Mg, K, Na, P, S, Cl), сполуки яких добре розчинні у воді. Ці ж елементи у великих кількостях містяться у земній корі. Виключенням є Si та Al, яких у земній корі багато, а в живій речовині мало. Це пояснюється поганою розчинністю їхніх природних сполук (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> • nH<sub>2</sub>O, алюмосилікатів) у воді.

Розчинність елементів у водних розчинах можна оцінити за величиною потенціалу Картледжа (ПК):  $ПК = W_i / R_i$ , де  $W_i$  – валентність йона,  $R_i$  – його радіус. Це показник міцності йонних сполук та комплексних йонів. Катіони з  $ПК < 3$  (K, Na, Ca, Mg,  $Fe^{2+}$ , Li, Rb, Cs, Sr, Ba, Mn, Cu, La та ін.) легко переходять у природні води. Катіони з йонним потенціалом у межах  $3,0 < ПК < 12$  ( $Fe^{3+}$ , Al,  $Mn^{4+}$ , Ti, Si, Sn, Zr, Be та ін.) утворюють нерозчинні у воді сполуки, які залишаються в зонах вивітрювання у вигляді оксидів, гідроксидів або мігрують у вигляді інших форм. Катіони, для яких  $ПК > 12$  (S, P, C, B, N,  $Mn^{7+}$ ,  $U^{6+}$ ,  $V^{5+}$ ), з'єднуються з киснем, утворюють розчинні у воді і здатні до міграції комплексні йони ( $SO_2^{-4}$ ,  $PO_3^{-4}$ ,  $CO_2^{-3}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $BO_3^{-3}$ ,  $NO_3^-$ ,  $MnO_4^-$ ,  $UO_2^{+2}$ ,  $VO^{+2}$ ).

Отже, загальний вміст хімічних елементів в ґрунтах не дає повного уявлення про те, яка їх кількість може бути засвоєна рослинами. Для того, щоб рослини могли їх засвоювати, хімічні елементи повинні бути: а) у рухливій, тобто в йонній або іншій комбінованій формі, яка може бути вилучена з ґрунту водною екстракцією; б) у формі легко замінних йонів в органічних або неорганічних йоно-обмінних комплексах, які піддаються екстракції нейтральними солями; в) у формі зв'язаних йонів у обмінних комплексах, які екстрагуються слабкими кислотами; в органічних і органічно-мінеральних комплексах у формі, яка може бути вилучена сильними кислотами; у складі осадових оксидів або солей, з яких вони вилучаються сильними реагентами; фіксованими у вторинних (гіпергенних) мінералах. Доступність для рослин хімічного елемента в ґрунті (в кожній з перерахованих форм) залежить від складу і кількості глинистих мінералів та органічної речовини, його лужно-кислотних і окисно-відновних властивостей, а також фізико-хімічних властивостей елемента і його сполук;

5) здатність речовин до кристалізації. Поява парагенних асоціацій елементів в природі часто обумовлена єдиним процесом послідовного осадження елементів за умов поступового охолодження розплаву чи розчину. Парагенезис головних елементів у мінералах, зазвичай, пояснюють законами кристалохімії (наприклад, Fe і S в піриті; Fe, Mg, Si, O в олівіні та ін.);

б) здатність до утворення комплексних сполук. Багато металів накопичуються в організмах завдяки здатності утворювати біологічно активні речовини у вигляді комплексних сполук і металокластерів. Особливо це



стосується перехідних металів з амфотерними властивостями: Mg, Fe, Mn, Mo, Co, Al, Ti, V, Cr, Ni, Cu, Zn.

За допомогою механізму комплексоутворення живі організми концентрують і накопичують певні метали. Зокрема, утворення потужних покладів осадових руд Fe, Co та Ni пояснюють масовим поширенням у гідросфері докембрію синьо-зелених водоростей, які здатні до їхнього накопичення. Після відмирання рослин комплексні сполуки металів упродовж мільйонів років потрапляли у мул, де й відбувалося утворення осадових руд.

На різних стадіях еволюції біосфери комплексні сполуки металів (Fe, Mn, Mo, Co, V, Cr, Ni, Cu, Zn та ін.) приймали та продовжують приймати активну участь у регулюванні окисно-відновних процесів фотосинтезу, дихання та різних біохімічних реакціях обміну речовин. Здатність одного й того ж металу до утворення комплексів із різними донорами уможливорює різноманітність значень окисно-відновних потенціалів, що має біогеохімічне значення. Так, ферментативні процеси фотосинтетичного окиснення і відновлення відбуваються за участі комплексної сполуки Mg (хлорофілу) із дуже низьким значенням окисно-відновного потенціалу. Колообіг Нітрогену в біосфері у вигляді асиміляції молекулярного азоту ( $N_2$ ) атмосфери забезпечують комплексні сполуки Fe і Mo ферменту нітрогенази азотфіксуючих бактерій та синьо-зелених водоростей;

7) біологічні особливості різних видів організмів, їх вік та біохімічні закономірності зв'язку (синергізм, антагонізм та ін.) між хімічними елементами в організмах. В живих організмах хімічні елементи поведуть себе інакше, ніж у звичайних водних розчинах;

8) ландшафтно-геохімічна обстановка, тобто кліматичні, орографічні, гідрохімічні, гідрогеологічні умови. Вони комплексно впливають на поведінку елементів з причин змін кислотно-лужних, окисно-відновних та інших фізико-хімічних умов. Кліматичний фактор включає в себе: переважний напрямок і швидкість вітру, кількість і періодичність атмосферних опадів, температуру повітря. Ландшафтно-геохімічний фактор вміщує у собі: характер рельєфу (вододіл, крутий або пологий схил, річкова долина, балочне пониження та ін.); геолого-структурні умови (літологія і склад порід поверхневої частини розрізу); глибина залягання ґрунтових вод

(особливо на ділянках підтоплення, заболочування); характер рослинного покриву; тип ґрунтів (мінеральна та органічна складова, гранулометричні показники, мікробіологічний склад).

Різні мінерали не однаково схильні до вивітрювання, що впливає на інтенсивність міграції елементів. Це можна прослідкувати на різних типах породотвірних мінералів класу силікатів під назвами *амфіболи* та *альбіти*. Лужні амфіболи вивітрюються легше, ніж альбіт, тому Na амфіболів має вищу міграційну здатність, ніж Na альбіту. У посушливому кліматі кальцит, гіпс, доломіт стійкі у корі вивітрювання, у вологому – нестійкі. Біогеохімічною особливістю вологих тропічних ландшафтів є величезна біомаса та щорічна продуктивність, надзвичайно швидкий біологічний колообіг, тобто високі швидкості росту живої речовини і розкладання решток організмів. Більшість елементів періодичної системи у вологих тропіках залучається до енергійної міграції. Важкі метали мігрують разом із органічними речовинами у вигляді складних органо-мінеральних комплексів. Характерна також міграція елементів шляхом утворення колоїдних розчинів та осадження з них колоїдних осадів.

Біогеохімічною особливістю пустель є слабкий вплив живої речовини на водну міграцію елементів. Біомаса у пустелях у сотні разів менша, ніж у вологих тропіках. Незначний вміст відновників в ґрунтах і водах пустель визначає майже повну мінералізацію органічних решток до  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  і простих солей. Мізерна кількість органічних сполук у водах пустель, нейтральна та слаболужна реакція їхніх розчинів визначають низьку вільну енергію вод для здійснення геохімічної роботи (розкладання органіки, розчинення порід).

Йони та сполуки, які визначають умови міграції в певній системі, називають *провідними*. Наприклад, біогеохімічна особливість океану визначається розчиненням у воді молекулами  $\text{O}_2$ , йонами  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  та незначним числом інших елементів. В тайгових болотах провідними є  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  та деякі ін. Зазвичай, хімічні елементи з низькими кларками не здатні бути провідними з причин малих концентрацій, – вони вимушені мігрувати в тих фізико-хімічних умовах, які створюють провідні елементи. Відмінності у кларках визначають провідну роль S та другорядну Te; провідне значення Na і другорядне Rb, Li, Cs. Рідкісні елементи у місцях

їхньої концентрації (наприклад, в родовищах) стають провідними (Hg, U, Mo та ін.).

У зв'язку з тим, що на шляху руху потоку речовини середовище мінливе, виникають ділянки, де умови міграції інші, що призводить до зменшення рухливості деяких речовин, їх накопичення, тобто до виникнення геохімічних бар'єрів. Отже, широко поширені, але слабо мігруючі елементи, не завжди є провідними. Крім того, один і той самий елемент у різних системах може бути провідним або другорядним. Наприклад, Fe має провідне значення у багатьох гідротермальних системах, але його роль невелика в ґрунтах пустель, водах океану. Нарешті, якщо елемент енергійно мігрує, але не накопичується, він також не вважається провідним. Так, Na і Cl енергійно вилужуються з кислій кори вивітрювання, тому вони не є тут провідними. Тільки у соляних озерах, де Na и Cl мігрують і накопичуються, вони стають провідними.

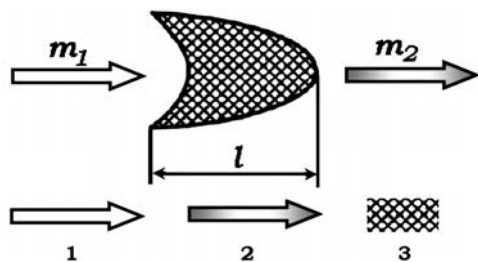
Більш складні й різноманітні парагенезиси елементів-домішок. Так, для олівіну характерні домішки Ni, Co, для халькопіриту – Re, In, Se, Te, Ge, An, Ni, Co, Ag, Cd, Tl, As, Sb, Pt, Pd, для польових шпатів – Rb, Cs, Li, Tl, Be, Ca, Ba, Sr та ін., для ураніту – Pb, Ra, He. Причини утворення подібних асоціацій різні: близькість йонних радіусів, радіоактивний розпад, сорбція та ін.

Добре вивчені парагенні асоціації елементів в горних породах і рудах. Зокрема, для ультраосновних порід характерна асоціація Mg, Cr, Ni, Co, Fe, Mn, Pd, Pt; для пегматитів – K, Rb, Li, Cs, Be, TR, Zr, Nb, Ta, F, B та ін., для багатьох екзогенних уранових руд – Mo, Se, V, Re.

## Геохімічні бар'єри

Поняття «геохімічний бар'єр» уперше використав В. Гольдшмідт (1934); науково обґрунтовано О. Перельманом (1961).

**Геохімічний бар'єр** – ділянка земної кори, в якій на короткій відстані відбувається різка зміна гідрогеологічних умов міграції хімічних елементів, внаслідок чого відбувається їхнє концентрування, осадження у вигляді нерозчинних солей, утворення промислових рудних тіл



**Мал. 26.** Параметри геохімічного бар'єра: 1 – напрям міграції хімічних елементів до бар'єра; 2 – після бар'єра; 3 – область концентрування елементів на бар'єрі (рудні тіла, аномалії тощо);  $m_1$  – геохімічні характеристики середовища до бар'єра;  $m_2$  – після бар'єра;  $l$  – довжина бар'єру.

Ефективність геохімічних бар'єрів визначається його градієнтом і контрастністю.

*Градієнт бар'єра*  $G$  – швидкість наростання зміни параметрів середовища за напрямом міграційного потоку:

$$G = \frac{m_1 - m_2}{l}$$

Де  $m_1$  – будь-які геохімічні характеристики середовища до бар'єра (кислотність, окисно-відновний потенціал тощо);

$m_2$  – після бар'єра;

$l$  – довжина бар'єру.

*Контрастність бар'єру*  $S$  – відношення величин геохімічних параметрів у напрямку потоку до бар'єра та після нього:

$$S = \frac{m_1}{m_2}$$

Інтенсивність накопичення хімічних елементів на бар'єрі збільшується зі зростанням контрастності та градієнта.

Виокремлюють три великі групи бар'єрів: механічні, фізико-хімічні і біогеохімічні. Таким чином, провідне геохімічне значення елемента залежить не тільки від його концентрації в системі, але й від здатності до міграції, концентрування на геохімічних бар'єрах і накопичення.

Причинами виникнення геохімічних бар'єрів можуть слугувати такі явища як окиснення, випаровування, відновлення, кислотність, лужність, адсорбція, седиментація та ін. Відповідно різнять кисневий, термодинамічний,

глейовий, сорбційний, лужний, випарний, седиментаційний, техногенний та інші підтипи бар'єрів.

*Механічні бар'єри* формуються за рахунок наявності природних або антропогенних перешкод на шляху механічної міграції та зміни швидкості у водному або повітряному потоці. На механічному бар'єрі можуть накопичуватися важкі стійкі мінерали, що містять Ti, Sn, W, Au, Hg, Zr та інші, при випаданні з водного потоку або аерозольні частки з атмосферного. На ділянках з різкими перегинами рельєфу формуються орографічні механічні бар'єри, наприклад в місцях зчленування схилових поверхонь і балочних або річкових заплав, схиліві поверхні, звернені до повітряного вітрового потоку.

*Фізико-хімічні бар'єри* являють собою різку зміну фізико-хімічних умов середовища і залежно від цих умов підрозділяються на групи:

– окислювальні і відновні бар'єри формуються при водній міграції хімічних елементів (їх сполук, іонів) у зв'язку зі зміною окислювально-відновних умов (Eh). На таких бар'єрах концентруються елементи, насамперед, зі змінною валентністю;

– кисневий окислювальний бар'єр формується при зміні відновлювальних умов окисними. На даному бар'єрі відбувається накопичення Fe, Mn, Co (з кисневих і глейових вод), а також самородна S, Se (з сірководневих і сульфідних вод). Так, наприклад, у місцях виходу глейових вод, збагачених  $Fe^{2+}$  і  $Mn^{2+}$ , осідають їх гідроокисли, утворюючи залізо-марганцеві конкреції (стягіння), болотні та озерні руди;

– лужний – накопичення Ca, Mg, Cd, Ba, Sr, Zn, Fe та ін елементів у формі гідроксидів, карбонатів, фосфатів та ін.;

– кислий – накопичення таких елементів, як Mo, Si, Ge;

– сорбційний – сорбція на колоїдах (глинистих мінералах) іонів  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ;

– випарний (солончаки, солоні озера) – накопичення Ca, Na, K.

Зокрема, сорбційні бар'єри виникають при контакті вод із глиною, мулом, торфом та ін. сорбентами. Такий бар'єр характерний для зон гіпергенезу (тобто кори вивітрювання). До термодинамічних і сорбційних бар'єрів у атмосфері можна віднести приземні температурні інверсії з якими пов'язано утворення техногенних смогів. Комплексним геохімічним бар'єром є донні відклади водойм, особливо мулові наноси непроточних або слабо проточних басейнів.

За формою бар'єри можуть бути лінійними і площинними. Горизонти ґрунтів виступають в якості геохімічних бар'єрів для речовин, які надходять на поверхню ґрунту. Потужні сучасні техногенні потоки здатні руйнувати історично сформовані геохімічні бар'єри. Техногенний геохімічний бар'єр – це ділянка, де відбувається різке зменшення інтенсивності техногенної міграції, і як наслідок, – концентрація елементів. Прикладами формування техногенного бар'єру слугує закріплення (цементація) ґрунтів після закачування промислових стоків у водоносні горизонти (розпушена маса перетворюється на твердий моноліт) або вторинне засолення ґрунтів у районах зрошення.

Водна міграція більшості хімічних елементів зводиться до проходження ними через серію гомогенних і гетерогенних бар'єрів. При цьому існують закономірності:

1) геохімічний бар'єр виникає не тільки на межі двох фаз (тверда – рідка), але й у гомогенному середовищі при зміні  $pH-Eh$  умов розчинів, або концентрації окремих компонентів хімічного складу;

2) зони і ділянки геохімічних бар'єрів можуть виникати не лише в природних умовах формування хімічного складу водних розчинів, але й в результаті спеціальних інженерно-технологічних заходів. Сезонні зміни геохімічних процесів в ландшафтах приводять до періодичної дії багатьох геохімічних бар'єрів в ґрунтах водоєм (посилюючи або послаблюючи їх).

Міграція елементів в системі атмосфера-рослинність-ґрунти істотно залежить від видового складу, різноманітності і співвідношення видів угруповання в природних біоценозах. *Коефіцієнти біологічного поглинання* (КБП) мікроелементів у різних видів рослин неоднакові. За вмістом мікроелементів в ґрунтах, золі рослин і біопродуктивності рослин В. Ковалевський поділив біологічні об'єкти на «безбар'єрні» і «бар'єрні». У перших – вміст мікроелементів в золі росте пропорційно вмісту їх в ґрунтах. Бар'єрний тип залежності між вмістом елементу в середовищі існування і в золі рослин має три діапазони: інтервал прямої пропорційності; інтервал оптимуму стабілізації; інтервал зворотної пропорційної залежності.

*Біогеохімічні бар'єри* за своєю суттю репрезентують накопичення хімічних елементів живими організмами. Найбільшу увагу приділяють накопиченню сільськогосподарськими культурами речовин у високих (токсичних)

концентраціях. Зокрема, накопичення нітратів, пестицидів, важких металів рослинами зазвичай відбувається при внесенні у ґрунт надмірних доз добрив і засобів хімічного захисту рослин, розміщенню сільськогосподарських угідь поблизу промислових підприємств та автомагістралей.

Найчастіше біогеохімічні бар'єри локалізуються у верхньому шарі гумусового горизонту ґрунтів. Після відмирання рослин у верхньому шарі відбувається накопичення тих елементів, коефіцієнти біологічного накопичення яких перевищують одиницю. На біогеохімічному бар'єрі відбувається концентрування С, Н, О, N, I, К, Р, В, Sr та інших елементів. У гумусовому і торф'яному шарах накопичуються Mn, Ni, Co, Ca, K, P, B, Sr та ін.

Н. Крюченко, Я. Жовинський, П. Папарига (2022) дослідили мікроелементний склад (Pb, V, Cr, Zn, Mn, Cu) гірсько-підзолистих буроземних ґрунтів Чорногірського та Мармароського заповідних масивів Карпатського біосферного заповідника (фоновий, під вологим та сухим мохом *Sphagnum palustre* L.). З'ясовано, що ґрунти під вологим мохом Чорногірського масиву найбільше збіднені на Mn, Cu та Zn; а Мармароського – на Mn, Pb та V. Проаналізовано геохімічну поведінку досліджених мікроелементів у фонових ґрунтах і під вологим мохом. Зроблено висновок, що вологий мох є геохімічним бар'єром з вибірковою іонною обміном, тому на ділянках, покритих вологим мохом, виконувати літохімічні пошукові та моніторингові роботи потрібно з урахуванням цих особливостей.

При надходженні техногенних речовин з атмосфери у вигляді газів або з опадами в якості біогеохімічного бар'єру також виступає рослинний покрив. Зокрема, насадження дерев і чагарників сприяють підвищенню екологічної безпеки для населення промислових і урбанізованих територій, оскільки асимілюють і затримують викиди токсичних речовин промислових підприємств, пил та вихлопні гази від автомобілів. Захисну та фільтруючу функції ефективніше виконують стійкі, високопродуктивні види дерев із великою листовою поверхнею і площею поглинання газів та осідання пилу, зокрема представники таких родів (Г. Ількун, 1971; 1978): *Populus* L. (тополя), *Salix* L. (верба), *Acer* L. (клен), *Robinia* L. (біла акація), *Caragana* L. (жовта акація), *Platanus* L. (платан), *Quercus* L. (дуб), *Ulmus* L. (в'яз), *Fraxinus* L. (ясень), *Picea* L. (ялина), *Armeniaca* L. (абрикос), *Buxus* L. (самшит), *Syringia* L. (бузок), *Tamarix* L. (тамарикс), *Thuja* L. (туя).

За ступенем пошкодження листя комплексним забрудненням повітря (сполуками S, F, N), Ю. Приседський (2014) розділив рослини на групи стійкості: 1 – толерантні (стійкі) види (пошкодження листя не перевищувало 20%) – гледичія колюча, дуб звичайний, жимолость татарська, карагана деревоподібна тощо; 2 – середньопошкоджені види (21–50 %) – береза бородавчата, клен польовий, клен явір тощо; 3 – нестійкі (пошкоджувалося понад 51% листової поверхні) – горобина звичайна, тополя Болле тощо; 4 – види із змінною стійкістю (пошкодження залежать від складу токсикантів) – береза плосколиста, верба біла, гірकोкаштан кінський, горобина проміжна тощо.

## ЗАПИТАННЯ. ЗАВДАННЯ

---

- 1). Дайте визначення поняття «кларк». Назвіть чотири найпоширеніших хімічних елементів в земній корі і живій речовині.
- 2). Чи існує зв'язок кларка елементів із будовою їхніх атомів?
- 3). Чому Карбон є основним елементом органічних молекул і живої речовини?
- 4). Схарактеризуйте геохімічні класифікації елементів В. Вернадського і В. Гольдшмідта.
- 5). Вкажіть вісім найпоширеніших елементів у земній корі :
  - а) O, H, C, N, Mn, Mg P, S;
  - б) O, Si, Al, Fe, Ca, K, Na, Mg;
  - в) O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl.
- 6). На чому ґрунтується розподіл елементів на макро- і мікроелементи?
- 7). Дайте визначення коефіцієнту біологічного поглинання (КБП). Як розподіляються хімічні елементи залежно від значення КБП?
- 8). Поясніть ряди біологічного накопичення елементів за О. Перельманом.
- 9). Чому деякі елементи дістали назви «рідкісні», «розсіяні»?
- 10). Чому деякі йони у процесах міграції дістали назву «провідні»? Наведіть приклади.
- 11). Поясніть термін «біофільність елемента». Наведіть приклади.
- 12). Поясніть термін «геохімічний бар'єр», вкажіть його типи.
- 13). Обґрунтуйте, чому антропогенне надходження біогенних елементів до навколишнього природного середовища порушує екологічну рівновагу?
- 14). Як впливають розміри атомних та йонних радіусів на процеси міграції?



## 4. БІОГЕННА МІГРАЦІЯ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І РЕЧОВИН

### 4.1. Роль біогенної міграції у колообігу хімічних елементів і речовин

Планета Земля має конкретний розмір і фізико-хімічні умови, які утримують сталий обмежений фонд атомів хімічних елементів. Нежива (косна) речовина в геологічний час практично залишається незмінною і закономірно змінює свій атомний склад лише за рахунок радіоактивних процесів. Для існування феномену під назвою «біосфера» переміщення елементів повинно мати відносно циклічний характер у вигляді колообігів (циклів). Закон збереження маси дозволяє здійснювати такі колообіги за рахунок зміни складу, структури чи заряду частинок усіх речовин біосфери (живої, біогенної, косної, біокосної, радіоактивної і космічної) за незмінності природи їхніх атомів.

Будь-яке переміщення хімічних елементів та їхніх сполук у земній корі називається *міграцією хімічних елементів і речовин*. Міграція приводить до концентрування або розсіювання хімічних елементів у просторі і часі. Масштаби потоків вражають грандіозністю. Наприклад, за одну хвилину з поверхні Світового океану випаровується 40 млн т води.

Розрізняють такі форми міграції хімічних елементів та їхніх сполук: механічну, фізико-хімічну (водну, повітряну, йонну та ін.), біо- та техногенну.

*Механічна* форма міграції полягає у перенесенні речовин без перетворення їхнього складу; визначається розмірами мінеральних частинок, їхньою густиною, швидкістю руху агента середовища. Частинки можуть знаходитися у вигляді уламків, пилу, бути у колоїдному стані як суспензії, зависі або в міцелярній формі. Хімічні властивості елементів практично не мають значення, і такі різноманітні елементи, як K, Si, Al, входячи до складу підхопленої вітром піщинки ортоклазу ( $K_2Al_2Si_6O_{16}$ ), мігрують з однаковою швидкістю. Характерними рисами механічних ореолів розсіяння є зростання дисперсності часток і накопичення стійких в умовах зони

гіпергенезу мінеральних форм. В стані завису переноситься понад 90% маси Al, Ti, Ga, Th, Sc, Pb, Si, Fe, Mn, P, Ba, Zr, Rb, Cr, Co, Ni (М. Коржнев, 2005). Цей процес пов'язаний із річковою ерозією, перенесенням пилу і піску вітром, роботою льодовиків, морських течій, вулканів, дією тектонічних процесів.

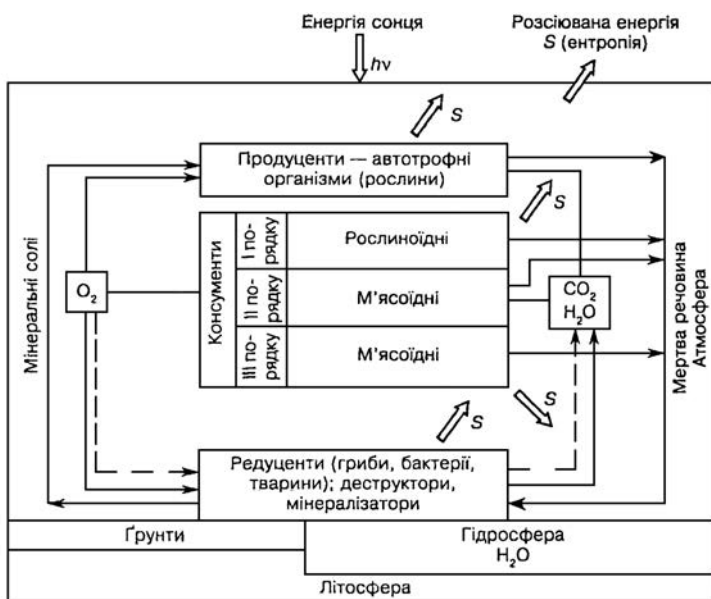
*Фізико-хімічна* форма пов'язана з переміщенням хімічних елементів у природних водах, силікатних розплавах (магмах), атмосфері і підкоряється хімічним законам (дифузії, розчиненню, осадженню, плавленню, кристалізації, сорбції, десорбції тощо). Провідними процесами фізико-хімічної міграції в верхній частині літосфери є: гідроліз, окислення та відновлення, іонний обмін, утворення та руйнування колоїдів, карбонатизація, гідратація і дегідратація, комплексоутворення, кристалізація і просте хімічне розчинення тощо. Для кожної групи мінералів є свій, провідний, тип хімічної реакції: гідроліз, гідратація і дегідратація – для породоутворюючих силікатів; окислення та відновлення – для сульфідів та залізовмісних силікатів; розчинення – для солей тощо. Найкраще вивчена міграція речовин у водних розчинах у вигляді іонів (іонна міграція), яка залежить від розчинності солей, рН, окислювально-відновного потенціалу.

Вивчаючи таку форму міграції, В. Гольдшмідт та О. Ферсман заклали початок *йонної концепції в геохімії* – трактування поведінки елементів у розчинах і розплавах із врахуванням властивостей їхніх іонів (розмірів радіусів, величин зарядів та ін.). В. Гольдшмідт розрахував радіуси іонів більшості елементів у сполуках і на цій основі пояснив явище ізоморфізму – заміщення в кристалічній решітці мінералів одних іонів та атомів на інші із близькими за розмірами. З цих позицій пояснюють факти сумісного знаходження елементів у мінералах (К, Ва і Рb; Mg, Fe<sup>2+</sup> і Ni; Zr і Hf; Та і Nb; К і Ti; Са і Na; К і Ва та ін.).

*Техногенна міграція* – міграція, пов'язана із діяльністю людини; освоєнням сировинних ресурсів; значними за масштабами неприродними переміщеннями речовин; створенням неіснуючих у природі штучних екосистем.

**Біогенна (біологічна) міграція** – міграція (колообіг) хімічних елементів та їхніх сполук, яка здійснюється за участі живої речовини.

Біогенний колообіг речовин складається з циклів окремих елементів. Для біогенної міграції характерною є сукупність таких процесів: надходження і накопичення хімічних елементів в живих організмах, біохімічний синтез нових складних сполук, їхнє вивільнення у атмосферу, ґрунт, гідросферу при розкладанні мертвих організмів. Накопичення відбувається у такий спосіб: у рослин – за допомогою фотосинтезу та мінерального живлення; бактерій-хемосинтетиків – хемосинтезу і мінерального живлення; грибів, тварин, вірусів – за рахунок гетеротрофного живлення (мал. 27).



Мал. 27. Схема колообігу речовин і потоку енергії в біосфері.

Прикладами сукупної дії вищезгаданих видів міграції є випаровування, випадання опадів; вивітрювання материнських порід; розчинення у воді продуктів руйнування поверхні Землі, їхнє переміщення у моря й океани, відкладання на дні й утворення осадових порід; життєдіяльність організмів, їхнє народження, переміщення, смерть і розкладання. За рахунок процесів міграції хімічних елементів та їх сполук ( $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,

$N_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  та ін.) усі геосфери Землі (атмосфера, літосфера і гідросфера) пов'язані єдиним циклом колообігу цих елементів.

Біогенна міграція забезпечується процесами обміну речовин в організмах, ростом, розмноженням, розкладанням. Щорічно на суходолі утворюються і руйнуються десятки мільярдів тонн органічної речовини. Органічна речовина стає сильним відновником, а кисень – сильним окисником. При мінералізації хімічна енергія переходить у механічну і теплову; у вигляді тепла енергія виділяється організмами у навколишнє середовище. У такий спосіб передача енергії відбувається не шляхом колообігу, а у вигляді потоку.

Корені багаторічних рослин, як насос, «перекачують» хімічні елементи (P, S, Ca, K, Be, Co, Ni, Zn, Ti, Ag, Au та ін.) з нижніх горизонтів ґрунту у верхні. При поглинанні катіонів корені виділяють  $H^+$ ; при поглинанні аніонів –  $OH^-$ . Науковці припускають, що в результаті мінерального живлення рослин у ґрунт безперервно надходить  $H^+$  – важливий фактор вивітрювання.

Біологічне вивітрювання – руйнування гірських порід унаслідок життєдіяльності живих істот. Геологічна робота організмів здійснюється у двох формах – механічній та біохімічній. Механічний вплив живих істот на гірські породи полягає у:

1) руйнуванні гірських порід корінням рослин (коренева система у процесі власного розвитку збільшується, проникає в порожнини порід, розсуває їх, розколює на окремі частини);

2) потужній діяльності риучих тварин (гризунів, кротів, ховрахів та ін.);

3) механічному сортуванні та перенесенні дрібного уламкового матеріалу (наприклад, у тропічних лісах для побудови термітників заввишки до 15 м комахи використовують тверді частинки розміром до 1 мм, які дістають з глибини у 10–12 м);

4) перемішуванні осаду ґрунту, знищенні їхньої структури зі зміною хімічного складу живими істотами. Наприклад, особлива група тварин бентосу – мулоїди (хробаки і личинки двокрилих) здатні переробляти і нашаровувати в озерах кілька міліметрів екскрементів за рік. Прикладом масштабних накопичень продуктів деструкції є донні осади Північного

моря, які вкриті осадовим шаром фекалій мідій товщиною 8 м. Дощові черви пропускають через кишковий тракт майже 5 т ґрунту з площі 1 га, витягують з нього поживні речовини та необхідні для життєдіяльності хімічні елементи, виділяють змінні за хімічним складом продукти. У масштабах планети цей вид діяльності дощових черв'яків колосальний: шар ґрунту товщиною в 1 м вони переробляють за 200 років. Це означає, що за геологічну історію Землі через кишковий тракт хробаків пропущено майже 70% осадової оболонки планети.

Якщо механічну роботу виконують переважно біологічні представники макросвіту, то біохімічні перетворення характерні як для макро-, так і мікроорганізмів (бактерій, нижчих грибів, водоростей). Організми – гетеротрофи споживають органічні сполуки шляхом їхнього розкладання на прості неорганічні компоненти, хемотрофи окиснюють мінеральні компоненти. В одному грамі ґрунту знаходиться до 1 млн бактерій, сотні тисяч грибів і водоростей. У масштабах планети біогеохімічний ефект діяльності мікроорганізмів величезний.

За оцінками геохіміка В. Добровольського, загальна маса зольних елементів, яка залучається щорічно у біотичний колообіг на суходолі, складає близько 8 млрд тонн. Це у декілька разів перевищує величину йонного стоку з континентів чи масу продуктів виверження усіх вулканів світу упродовж року.

Важливим показником біогенної міграції хімічних елементів є *коефіцієнт біотичного поглинання* (КБП,  $A_x$ ), який показує у скільки разів вміст (кларк) біогенного елемента (в золі рослин чи тварин) є більшим чи меншим, ніж у літосфері (певній гірській породі чи ґрунті). За допомогою цього показника можна не лише з'ясувати участь хімічних елементів у біотичному колообігу, але й виявляти організми-індикатори та організми-концентратори, оцінювати взаємозв'язок геохімічного середовища певного регіону та фізіологічної ролі конкретного хімічного елемента.

Антропогенна діяльність змінює хід біологічного колообігу речовин за рахунок зниження природної біоти і заміни її на культуру штучних агроценозів; відокремлення потреб у споживанні готової біологічної продукції; внесення добрив і пестицидів; зміни ґрунтових режимів.

## 4.2. Великий (геологічний) і малий (біологічний) колообіги

Науковці виокремлюють великий (геологічний) і малий (біологічний) колообіги.

**Великий (геологічний) колообіг** – колообіг абіотичного характеру, рушійною силою якого є тектонічні процеси та сонячна енергія.

Тривалість його існування – понад 4 млрд років. Потужність великого (геологічного) колообігу речовин в атмосфері, гідросфері та літосфері оцінюється в  $2 \cdot 10^{16}$  т/рік. Великий геологічний колообіг продовжується на сучасному етапі, але після появи життя на Землі і формування біосфери основною геохімічною силою стала жива речовина, за участі якої виник новий – біологічний (біогенний) тип міграції речовин і хімічних елементів, або малий (біологічний) колообіг.

**Малий (біологічний) колообіг** – сукупність процесів утворення, життєдіяльності, відмирання та розкладання живої речовини в системі «середовище – жива речовина – середовище»; послідовна циркуляція речовин і хімічних елементів у біосфері, яка здійснюється за рахунок життєдіяльності організмів та їхньої взаємодії з абіотичними чинниками.

Науці відомі кількісні дані щодо біологічного колообігу багатьох елементів, зокрема Карбону ( $10^{11}$  т/рік), Оксигену ( $2 \cdot 10^{11}$  т/рік), Нітрогену ( $2 \cdot 10^{11}$  т/рік).

Рушійною силою біогенного колообігу атомів слугує енергія Сонця, яка трансформується рослинами-продуцентами в енергію біохімічних зв'язків органічних речовин, а також енергія гравітації, яка переміщує органічні і неорганічні речовини по рельєфу від підвищень до депресій (латеральна міграція) та від поверхні вглиб ґрунту (радіальна міграція). Атоми С, Н, О в процесі фотосинтезу заряджаються енергією і стають геохімічними акумуляторами енергії в біосфері, що дозволяє енергії Сонця по трофічних ланцюгах проникати всередину планети. Інформація від живої речовини

теж надходить вглиб планети. Такий перехід атомів хімічних елементів з оточуючого середовища, і навпаки, зворотно отримав *назву біогенний колообіг атомів* (БІК), який діє з моменту появи життя на Землі (близько 4 млрд років тому).

Дослідження свідчать, що біологічний колообіг дуже інтенсивний – він упродовж 2 тис. років трансформує весь кисень атмосфери; за 300–400 років відбувається повний цикл перетворення вуглекислоти, а за 2 млн років розкладається і відновлюється вся вода океанів, морів і річок. Отже, за час існування життя на Землі (майже 4 млрд років) кисень, вода і вуглекислота «пройшли» крізь живі організми багато тисяч разів. В усьому просторі біосфери відбувається народжене життям безперервне переміщення, перемішування і концентрація речовин і хімічних елементів.

У результаті біологічного колообігу формується *окисно-відновна зональність біокосних систем*. Зокрема, у верхній зоні озер більше кисню, оскільки водні рослини активно здійснюють процес фотосинтезу. У глибоких частинах озер, навпаки, збільшується кількість  $\text{CO}_2$ . У мулах кисень може бути відсутнім зовсім, і тут превалює відновне середовище (глейове чи сірководневе). У такий спосіб в озерах формується окисно-відновна зональність: окисна зона зверху, відновна – знизу. Аналогічно в біосфері робота живої речовини створює окиснювальні умови на земній поверхні і різко відновні у болотах, мулах чи підземних водах.

**Еволюція біологічного колообігу в ході геологічної історії.** Біологічний колообіг відбувається мільярди років – з моменту появи життя на Землі, а його еволюція пов'язана із ускладненням біологічного різноманіття.

Майже 500 млн років тому рослини вийшли на суходіл, і близько 350 млн років тому, наприкінці девонського періоду палеозойської ери, на планеті з'явилися перші ліси. Упродовж тривалої еволюції в умовах теплого клімату і зволоженості рослини накопичували шляхом фотосинтезу величезні кількості органічних речовин, що й визначило нові шляхи міграції атомів за допомогою живої речовини.

Поступово виникала суперечність: чим більше накопичувалось у процесі еволюції живої речовини, тим більше розкладалось мертвих решток

рослин і тварин та енергетично потужнішою ставала протилежна гілка біологічного колообігу – мінералізація. В ґрунт надходило все більше вуглекислого газу, органічних кислот, що підкислювало ґрунтові води, які, у свою чергу, вивітрювали (руйнували) гірські породи. Як результат, відбувалося *кисле вилуговування ґрунтів*, – з них вимивалися необхідні для живлення рослин рухомі сполуки Ca, K, Mg, P, S, Cu, Zn та інших елементів. У палеозойських лісах почали формуватися кислі малородючі ґрунти, розвивалось мінеральне голодування рослин. Отже, рослини погіршили умови власного існування, що слугувало рушійною силою для природного добору рослин, здатних поглинати з ґрунту більше  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  та інших катіонів. Ці катіони закріплювалися в тілах організмів і не вимивалися з ґрунту, а після розкладання решток рослин потрапляли до верхніх горизонтів, звідки знову поглиналися рослинами.

У посушливому кліматі виникла інша суперечність – між світловим і водним живленням рослин, на якій акцентував увагу ботанік Борис Олександрович Келлер (1874–1945). Для того щоб поліпшити світлове живлення за рахунок фотосинтезу, рослина збільшує площу своїх зелених органів. Але збільшення листової поверхні для фотосинтезу викликає сильне випаровування з поверхні листків, що потребує значних витрат води. У процесі еволюційного вирішення цієї суперечності природного добору з'являються різноманітні ксерофітні риси в рослинному покриві: редукція листків, колючки, восковий покрив та ін.

**Оптимізація біологічного колообігу.** Оптимальний біологічний колообіг характеризується такими показниками: 1) інтенсивний фотосинтез; 2) висока продуктивність та різноманіття біологічної продуктивності; 3) швидке розкладання решток організмів із залученням продуктів їх мінералізації у новий цикл колообігу; 4) мінімальний вихід біофільних елементів із колообігу. Зокрема, N, P, K та інші хімічні елементи не повинні включатися у водну міграцію і виноситися річками; надлишкові кількості елементів повинні видалятися з системи, а дефіцитні – привноситися; 5) постійна мобілізація внутрішніх ресурсів біосфери за рахунок біологічного і ландшафтного різноманіття.



### 4.3. Біогеохімічний колообіг

У процесі еволюції біосфери на потужний геологічний колообіг відбулось накладання швидкого і активного біологічного. Упродовж сотень мільйонів років обидва колообіги протікають одночасно, тісно пов'язані між собою, і утворюють єдиний глобальний біогеохімічний тип міграції хімічних елементів і речовин. Отже, в умовах сучасної біосфери колообіг речовин і хімічних елементів спрямовується сукупною дією біологічних, геохімічних і геофізичних чинників. Саме в цьому розумінні вживають терміни-синоніми «біогеохімічний колообіг», «біогеохімічний цикл».

Пріоритетні дослідження біогеохімічних циклів були розпочаті В. І. Вернадським ще на початку 20-х років ХХ ст., у подальшому розвинуті в дослідженнях В. Ковди, С. Зонна, Н. Базилевича, В. Добровольського, О. Саукова, О. Безуглової, О. Ковалевського, П. Білоножка, М. Белова, Г. Гетьмана, В. Гуцулюка, Ю. Дмитрука та ін.

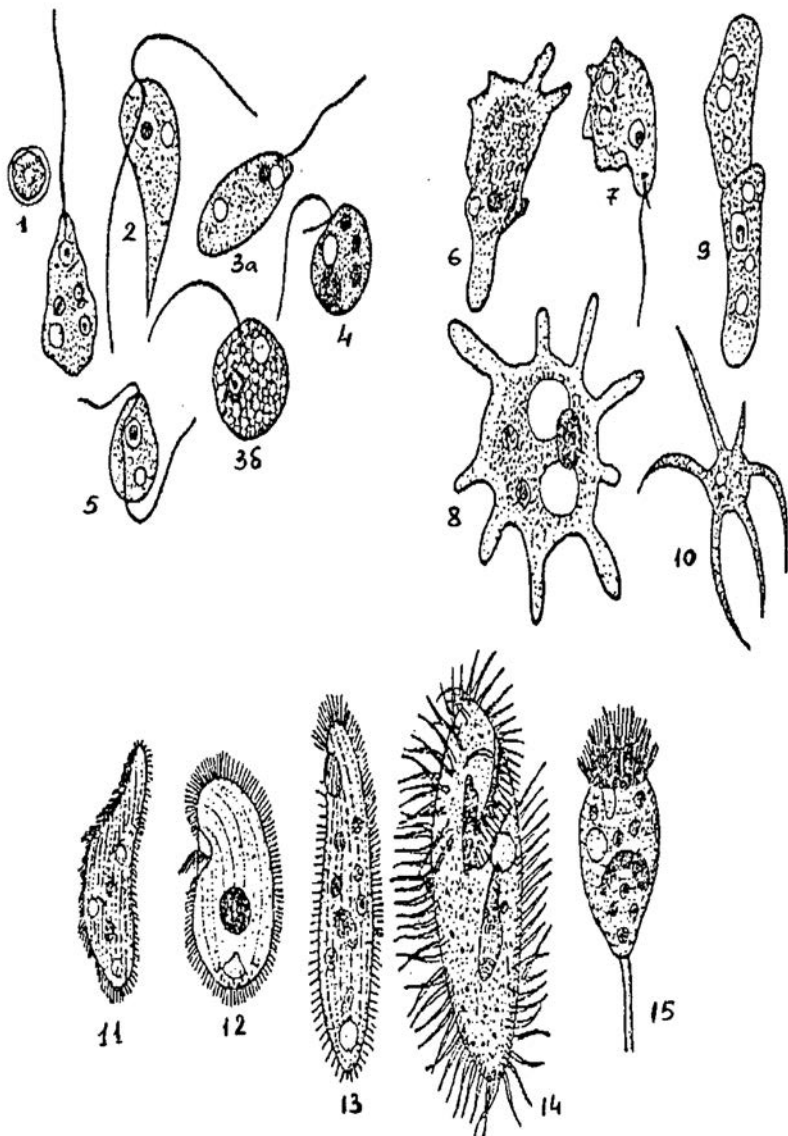
Сучасний російський ґрунтознавець і біогеохімік Віктор Абрамович Ковда (1989) виділяє три рівні біогеохімічних параметрів, які дозволяють виявляти роль і частку різних таксонів організмів у колообігу хімічних елементів:

1) біогеохімічні цикли на рівні мікробних популяцій (їх біомаса приблизно дорівнює біомасі рослин). На прикладі найпростіших ґрунтових організмів (мал. 28);

2) біогеохімічні цикли на рівні безхребетних тварин ґрунтів і водоймищ (відіграють значну роль у трансформації органічних решток у ґрунтах і водоймах);

3) біогеохімічні цикли в наземних біогеоценозах (лісових, трав'янистих). Загальний запас біомаси на Землі –  $10^{12}$ – $10^{13}$  т.

У біосфері біогеохімічні цикли тісно пов'язані один із одним і відповідні потоки співіснують разом. Тому виокремлення окремих біогеохімічних циклів досить умовне. Одні й ті самі групи організмів одночасно послуговуються різними хімічними елементами в процесах синтезу чи розкладання.



Мал. 28. Найпростіші ґрунтові організми: 1 – *Mastigamoeba invertens* – ґрунтова форма з цистою; 2 – *Cercobodo crassicauda*; 3 – а, б – *Oicomonas terma* – різні форми; 4 – *Monas* sp.; 5 – *Bodo lens*; 6 – *Vahlkampfia (Amoeba) albica*; 7 – *Naegleria bistadialis*; 8 – *Amoeba gorgona*; 9 – *Amoeba limax*; 10 – *Astramoeba radiosa*; 11 – *Amphileptus* sp.; 12 – *Colpoda* sp.; 13 – *Balantiophorus elongatus*; 14 – *Gonostomium (Oxytricha) affine*; 15 – *Vorticella microstoma*

У кожному біогеохімічному циклі розрізняють два фонди хімічного елемента: резервний і обмінний (рухливий). *Резервний* – малорухлива велика маса речовин, що містить даний елемент у складі переважно абіотичного компонента. Фонд розміщений за межами живих організмів – у зовнішньому середовищі. Іноді його називають «недоступним» фондом, але він забезпечує живлення (має місце винос елементів урожаєм). Такий винос може досягати 200–600 кг/га (залежно від культури); цифра вказує загальну біомасу (фітомасу), яка накопичується біогеоценозом до моменту підрахування на одиницю площі (кг/га, ц/га, т/га). Опад рослин щорічно активно циркулює і є фактично «доступним». *Обмінний (рухливий фонд)* – менша маса речовини (у порівнянні з масою резервного фонду), для якої характерний швидкий обмін між організмами і їхнім безпосереднім оточенням.

У біогеохімічні цикли залучені основні біогенні хімічні елементи (С, Н, О, N, P, S, Fe, Mg, Mo, Mn, Cu, Zn, Ca, Na, K та ін.) або їхні сполуки (H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> та ін.). Усі цикли складаються з двох фаз: органічної (під час якої хімічний елемент чи речовина перебувають у складі живих організмів) і неорганічної. Послідовні переходи речовин з однієї фази в іншу здійснюються безкінечно.

Оцінювання особливостей біогеохімічних циклів здійснюють за допомогою таких критеріїв (В. Дорохов, 2004; Ю. Дмитрук, 2009; О. Дрозд, 2017):

1) зольність організмів – загальна маса всіх хімічних елементів (крім Н, О, С, N) в золі після спалювання (у % на суху масу). Зазвичай враховують макроелементи (Si, Ca, Mg, Na, S, P, Fe, Al), іноді й мікроелементи також. Зольність рослин, зольний склад, вміст елементів дозволяють оцінити обсяг втрат, частку участі зольних елементів у формуванні органічної продукції (у галофітів вона досягає 20–40%, у трав – 5–19%, дерев – 5–10%). В агроценозах втрати біологічного колообігу утворюють 60–70% від сумарної маси елементів живлення (винос елементів урожаєм);

2) загальна біомаса (фітомаса), яка накопичена біогеоценозом до моменту підрахування на одиницю площі (кг/га, ц/га, т/га). Відмерлі рослини враховують окремо у вигляді опаду, відпаду, лісових підстилок або степового волоку. Під опадом розуміють щорічно відмерлу біомасу (листя, плоди, стебла, квіти, корені); під відпадом – лише стовбуровий опад деревинного ярусу;

3) структура біомаси – склад та кількісне співвідношення всіх компонентів біомаси (наприклад, співвідношення між одно- та багаторічними рослинами, деревними і трав'янистими, надземними і підземними частинами рослин тощо);

4) приріст біомаси – співвідношення усієї біомаси до її щорічного приросту ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ,  $\text{ц}/\text{га}$ ). Розрізняють первинний, вторинний і фактичний приріст. *Первинний приріст* – приріст маси живої речовини за одиницю часу рослинами (автотрофами) на одиниці площі біогеоценозу. *Вторинний* – приріст маси гетеротрофів. *Фактичний (істинний) приріст* – кількість органічної речовини, утворена за один біогеохімічний цикл (добовий, річний, столітній);

5) співвідношення загальної кількості хімічних елементів у біомасі річного приросту до річкового стоку. Його здійснюють з метою оцінки ролі і частки живої речовини в біогеохімічному циклі. Підраховано, що жива речовина щорічно поглинає  $10^8$ – $10^9$  т зольних елементів. Таку саму кількість елементів використовує річковий стік за рік (відношення дорівнює майже одиниці). Це свідчить про те, що всі хімічні елементи, перед тим як потрапити у великий геологічний колообіг, проходять шлях біологічної міграції;

6) співвідношення сумарної маси елементів у біомасі щорічного приросту до сумарної маси цих елементів, що виносяться водами даного басейну. Цей критерій доповнює попередній щодо конкретних біогеоценозів басейну (або його частини), кількісно характеризує мозаїчність біосфери, дає уяву про накопичення і винос елементів із рослин. Показник відображає вплив на біологічний колообіг клімату, рельєфу, материнських порід, типу рослинності. Зазвичай, за промивного режиму зволоження в біогеоценозах (ландшафтах) утримуються елементи-біофіли (N, P, C, O, H) та інтенсивно виносяться Cl, S, Mg;

7) співвідношення маси підстилки до маси річного опаду. Воно характеризує інтенсивність розкладання опаду і тривалість збереження підстилки. Найбільше значення показника характерне для умов, за яких процеси розкладання і мінералізації опаду сповільнені (накопичується органіка, формуються торф'яники);

8) співвідношення кількості хімічного елемента в сухому залишку води до його вмісту в літосфері. Цей критерій доповнює попередні щодо конкретних біогеоценозів басейну (або його частини);

9) ємність колообігу ( $M_c$ ) – кількість (маса) хімічних елементів у складі фітомаси зрілого фітоценозу на одиницю площі, кг/га. При розрахунках на суху речовину враховують лише зольні елементи і N. Вода і леткі органічні речовини випаровуються під час спалювання. Масу зольних елементів обчислюють за формулою:

$$M_c = M_0 - \text{ВПП},$$

де  $M_0$  (ємність) – біомаса (кг/га); ВПП – втрати при прожарюванні;

10) швидкість біологічного колообігу – період часу від поглинання рослиною хімічного елемента до його повернення у середовище (г, кг, ц, т за добу, рік, століття);

11) інтенсивність біологічного колообігу – швидкість нагромадження хімічних елементів у фітоценозі (маса зольних хімічних елементів у прирості за одиницю часу – добу, місяць, рік). За цим показником оцінюють енергетичні особливості фітоценозу і потужність його впливу на процес ґрунтоутворення;

12) контрастність біологічного колообігу – порівняльна оцінка ємності біологічного колообігу в різних біогеоценозах (ландшафтах).

Біогеохімічні цикли незамкнуті, тобто частина речовини завжди виходить з циклу на термін від десятків до декількох тисяч років. За історію розвитку біосфери (3,5–3,8 млрд років) у результаті неповної зворотності (95–98%) біогеохімічних циклів утворився кисень та азот атмосфери; поклади вугілля, горючих сланців, вапняків (цикл Карбону); діатоміту, трепелів (цикл Силіцію); фосфоритів (цикл Фосфору); бокситів (цикл Алюмінію) та інших копалин на планеті.

Рушійною силою біогеохімічних циклів слугують потоки сонячної енергії (енергії космосу) і діяльність живої речовини (за В. Вернадським). Разом вони переміщують величезні маси хімічних елементів, здійснюють накопичення і перерозподіл акумульованої в процесах фотосинтезу та хемосинтезу енергії.

У процесі розвитку біосфери сформувались спрямовані біогеохімічні цикли не тільки планетарного, але й регіонального рівнів. Це обумовило еволюційне формування динамічно стійких специфічних біогеохімічних фонів для конкретних біогеохімічних провінцій, із якими пов'язані ендемічні хвороби рослин, тварин і людини.

Біогеохімічна циклічність С, О, Н, Na, Ра, S, Са, Mg, К та інших біогенних елементів постійно формує гумусовий горизонт ґрунту та біомасу культурних рослин, які годують людство. Отже, особливе значення має з'ясування деталей біогеохімічного колообігу хімічних елементів в агроценозах, в яких порушуються цикли через відчуження елементів із врожаєм. Тут баланс завжди від'ємний, тому необхідно поповнювати втрати шляхом внесення різних добрив.

#### **4.4. Біогеохімічний колообіг органігенів**

Біогеохімічний колообіг атомів є однією з форм колообігу речовин, завдяки якому можливе тривале існування і розвиток життя при обмеженому запасі доступних хімічних елементів.

#### **Біогеохімічний колообіг Карбону (С)**

Карбон (С) зустрічається в природі у вільному стані у вигляді простих речовин (графіту і алмазу); у сполуках – у вигляді кам'яного і бурого вугілля, вапняку, торфу, гумусу, нафти і газу ( $\text{CH}_4$ ),  $\text{CO}_2$  повітря, органічних сполук живої речовини.

Виключна роль Карбону в біосфері визначається його особливостями як елемента життя. Головним біосферним джерелом Карбону для організмів-продуцентів (фото- і хемосинтетиків) є атмосфера, в якій цього елемента міститься  $668 \cdot 10^9$  т, здебільшого у вигляді  $\text{CO}_2$  (0,03% об.). Невелика частка атмосферного С входить до складу інших газів – СО і метану  $\text{CH}_4$ . Упродовж 300–400 років жива речовина засвоює стільки С, скільки його міститься в атмосфері Землі. Отже, за мільярди років з моменту появи життя увесь Карбон атмосфери і гідросфери багаторазово пройшов крізь живі організми (табл. 4.1).

Біогеохімічний колообіг Карбону є відображенням тісної взаємодії різноманітних взаємопов'язаних глобальних процесів:

1) синтезу (шляхом фотосинтезу і хемосинтезу), накопичення і трансформації органічної речовини; створення нових тіл живої речовини. Атоми  $^{12}\text{C}$  в процесі фотосинтезу спочатку заряджаються енергією кван-

тів світла, стають біогеохімічними акумуляторами енергії в біосфері у вигляді глюкози, АТФ, ліпідів, амінокислот та інших органічних сполук; потім ця енергія використовується консументами різних рівнів трофічних ланцюгів;

Таблиця 4.1

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Карбону

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів в основному стані	6; $1s^2 2s^2 2p^2$ валентні електрони: $2s^2 2p^2$
Масові числа природних ізотопів*	$^{12}\text{C}$ (98,89%); $^{13}\text{C}$ (1,11%)
Відносна атомна маса (а.о.м).	12,01
Ковалентний радіус атома, нм	0,077
Атомний об'єм, $\text{см}^3/\text{г-атом}$	5,46
Радіус іона $\text{E}^{+4}$ , нм	0,016
Перший потенціал іонізації, В	11,2604
Відносна електронегативність	2,50
Ступені окиснення	- 1, - 3, - 4, - 2, 0, + 2, + 4
Густина ( $\rho$ ), $\text{г}/\text{см}^3$ (293 К)	2,265 (графіт); 3,515 (алмаз)
Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$	3845-3890 при тиску 1 атм (графіт)
Температура кипіння, $^{\circ}\text{C}$	3700 (суб.)
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta\text{H}_{298}^{\circ}$ ), кДж/моль	715,6

\* Існує природний радіоактивний ізотоп із  $\beta$ -випромінюванням –  $^{14}\text{C}$  (період напіврозпаду 5600 років), використовується для визначення геологічного віку; крім того, штучно одержано ізотоп  $^{11}\text{C}$  (період напіврозпаду 20 хв.), використовується у якості радіоактивного індикатора

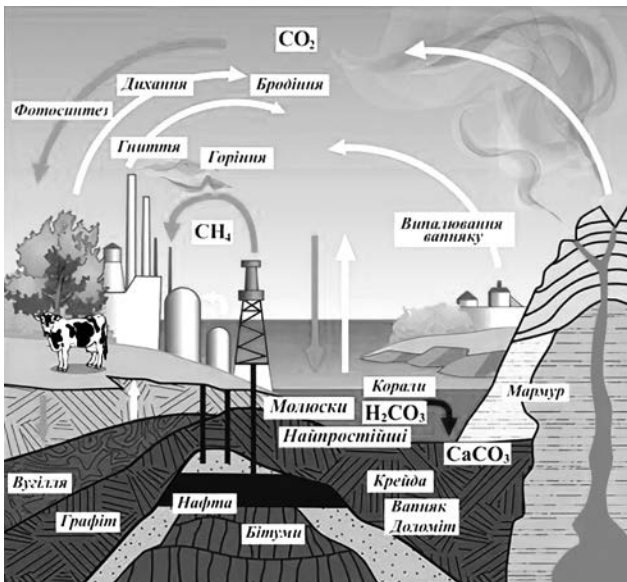
2) повернення С в атмосферу шляхом дихання (різних видів бродіння, аеробних процесів повного окиснення), розкладання органічної речовини (процесів деструкції, гниття, мінералізації органіки за допомогою бактерій, грибів, сапрофагів, копрофагів, некрофагів та ін.), виділення фітонцидів рослинами, вулканічної діяльності, антропогенного спалювання;

3) відкладання неповністю окиснених органічних сполук у вигляді гумусу, торфу, сапропелю, бітумів, бурого та кам'яного вугілля та ін. Це свідчить про те, що цикл Карбону повністю не замкнутий і значна частина С надовго вилучається з колообігу. Це має велике значення для існування вільного кисню атмосфери;



4) поглинання Світовим океаном надлишку  $\text{CO}_2$  і перетворення його на карбонатну кислоту, карбонат кальцію, доломіт. Карбонатна кислота – важливий фактор вивітрювання порід:  $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ . При зменшенні парціального тиску  $\text{CO}_2$  і збільшення температури створюються умови для виділення його з води. У такий спосіб виникає геохімічний бар'єр, на якому осаджуються карбонати. Світовий океан діє як насос: у полярних широтах він поглинає своїми холодними водами  $\text{CO}_2$ , а в екваторіальних і тропічних зонах, де вода тепла, віддає його в атмосферу. У цьому обмінному процесі між атмосферою й океаном приймають участь щороку близько 100 млрд тонн  $\text{CO}_2$  (мал. 29).

На *термодинамічних геохімічних бар'єрах*, які виникають на ділянках зміни тиску і температури, відбувається утворення вапнякових туфів. У підземних водах зі збільшенням тиску розчинність  $\text{CO}_2$  збільшується, що обумовлює розчинність мінералу кальциту. Коли такі води виходять на поверхню, тиск у них різко зменшується,  $\text{CO}_2$  виділяється в атмосферу, а кальцит випадає в осад і утворює туфи (травертини).



а

Мал. 29. Біогеохімічний колооіг Карбону.



На біогеохімічний колообіг Карбону останні десятиліття суттєво впливає господарська діяльність людини (спалювання різних видів палива, вирубка лісів, осушення торф'яників, інтенсивне розорювання земель та ін.). Зокрема, ввільненню  $\text{CO}_2$  з ґрунту сприяють механічний обробіток ґрунту, осушення боліт та торфовищ, з подальшим використанням мулу та торфу для удобрення сільськогосподарських угідь, процеси мінералізації органічної речовини в ґрунті й інтенсивність дихання коренів і мікроорганізмів (О. Германович, 2018).

Багато дослідників вважають, що у сучасному потеплінні клімату суттєву роль відіграє фактор накопичення парникових газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$  та ін.). Відповідно до гіпотези антропогенної природи потепління найбільший внесок (близько 60 %) в потепління клімату вносить  $\text{CO}_2$ , тому що на тлі підвищення вмісту цього парникового газу ( $\sim 2,20 \pm 0,01$  ppm у рік) середня температура приземних шарів атмосфери планети за останні 100 років підвищилася на  $0,7$  °C. Міжнародні експерти прогнозують, якщо температура підніметься понад  $1,5$ – $2$  °C, людству буде важко вести той спосіб життя, до якого вони звикли – будуть проблеми з водопостачанням, деградація мерзлоти, посухи, зростання засолення, посилення кислотного вивітрювання і карстових процесів, багато регіонів стануть непридатними для життя.

Отже, подальша інтенсифікація техногенезу може супроводжуватися підвищенням концентрації  $\text{CO}_2$  в атмосфері. Зокрема, підвищення концентрації вуглекислого газу до  $0,07$  %, забруднення повітря і води шкідливими органічними речовинами різко погіршують умови дихання людини і тварин. У деяких містах-мегаполісах така загроза реальна вже сьогодні.

## **Біогеохімічний колообіг Нітрогену (N)**

Газоподібний молекулярний азот ( $\text{N}_2$ ) завдяки хімічній інертності є найстійкішою формою знаходження Нітрогену в біосфері (табл. 4.2).

Біофільність N сумісна із біофільністю C; це один із чотирьох біогенних елементів, що входять до складу основних полімерів живих клітин – структурних білків, ферментів, нуклеїнових кислот, АТФ та ін. Оскільки маємо білкову форму життя, то є підстави вважати, що колообіг N в біосфері

визначає функціонування основної ланки біологічного циклу – утворення первинної продукції для забезпечення геохімічної роботи живої речовини.

Таблиця 4.2

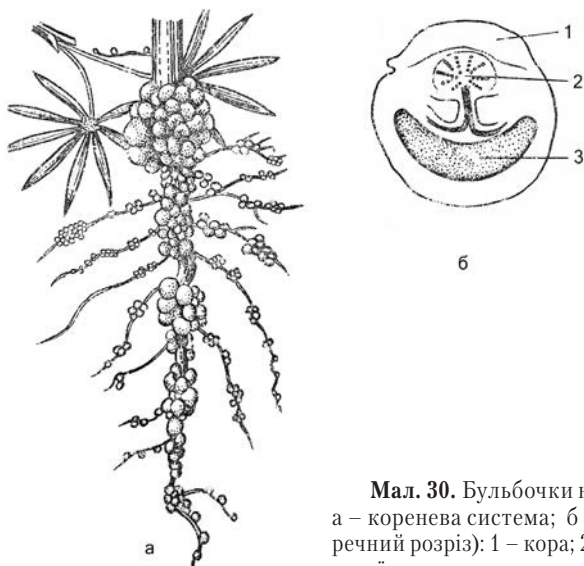
### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Нітрогену

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів в основному стані	7; $1s^2 2s^2 2p^3$ валентні електрони: $2s^2 2p^3$
Масові числа природних ізотопів	$^{14}\text{N}$ (99,635%); $^{15}\text{N}$ (0,365%)
Відносна атомна маса (а.о.м)	14,00674
Ковалентний радіус атома, нм	0,075
Металічний радіус атома, нм	0,092
Радіус іона $E^{-3}$ , $E^{+3}$ , $E^{+5}$ , нм	0,148; 0,016; 0,013
Перший потенціал іонізації, В	14,5352
Відносна електронегативність	3,07
Ступені окиснення	+5, +4, +3, +2, +1, 0, -1, -2, -3
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	1,026 (зріджений)
Температура плавлення, °С	- 209,71
Температура кипіння, °С	- 195,8
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta H_{298}^{\circ}$ ), кДж/моль	473,03

Біогеохімічний колообіг Нітрогену є одним із найшвидших, пов'язаний із такими процесами в біосфері:

1) зв'язування вільного атмосферного азоту мікроорганізмами-фіксаторами, що є основним шляхом забезпечення рослин  $\text{NH}_4^+$ . Це створює первинну продукцію для усіх ланок трофічного ланцюга і підтримує екологічну рівновагу в біогеоценозах, не забруднює ґрунти, водоймища та атмосферу. Фіксацію азоту здатні здійснювати вільноіснуючі аеробні бактерії роду азотобактер (*Azotobacter*) та анаеробні види роду клостридій (*Clostridium*); симбіотичні бульбочкові бактерії (мікосимбіонти) бобових (*Rhizobium*); синьозелені водорості: види родів анабена (*Anabaena*) і носток (*Nostoc*).  $\text{N}_2$  фіксують також пурпурні і зелені фотосинтезуючі бактерії. Усі вони в кінцевому результаті перетворюють азот атмосфери на аміак та сполуки амонію ( $\text{NH}_4^+$ ). Такі ціанобіонти є симбіонтами грибів, мохів, папоротей, ряду вищих рослин.

Симбіотичні системи бульбочкових бактерій з бобовими (конюшина, соя, люпин та ін.) здатні залучати до колообігу майже 90 млн т азоту пові-



**Мал. 30.** Бульбочки на корнях люпину: а – коренева система; б – бульбочка (поперечний розріз): 1 – кора; 2 – ксилема, 3 – бактероїдна тканина.

тря за рік. Накопичення біологічного азоту бобовими відбувається лише за наявності в ґрунті симбіотично активних бульбочкових бактерій. На мал. 30 показані бульбочки на корнях люпину, утворені бактеріями роду *Rhizobium*.

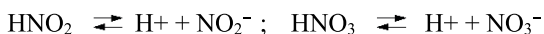
Відсутність мікросимбіонтів приводить до зміни екологічної функції бобових: вони з культур, які акумулюють фіксований азот атмосфери, перетворюються на культури, що використовують азот ґрунту. На цю здатність бобових необхідно звертати увагу вченим і практикам при сівозмінах, інтродукції рослин у нові регіони.

Незважаючи на те, що екологія бульбочкових бактерій вивчається в багатьох наукових центрах, остаточно маловідомі механізми поширення цих мікроорганізмів на нові території. Вважається, що в природних біогеоценозах одним з можливих шляхів розповсюдження ризобій є перенесення їх з насінням, комахами та пилом. В агрофітоценозах бульбочкові бактерії можуть потрапляти в ґрунт у складі комерційних біопрепаратів та підтримуватися як симбіонти місцевих видів бобових. Оскільки соя інтродукована в Україні порівняно недавно, дані щодо поширення виду *V. japonicum* в ґрунтах країни обмежені. Перспективними є дослідження стану популяцій бульбочкових бактерій сої в різних ектопах. Зокре-

ма, встановлено, що з насінням сої не відбувається активне розселення бульбочкових бактерій на нові території. Ризобій сої не виявлено в складі епіфітної та ендофітної мікрофлори насіння досліджених сортів сої (Д. Крутило, 2004).

В океанах широко поширені біоценози азотфіксуючих мікроорганізмів (діазотрофів) на глибину до 1000 м; вони впливають на колообіг N, біотичний цикл C, і тим самим регулюють морську продуктивність (Bonnet, S. et al., 2023);

2) послідовне окислення бактеріями нітрифікаторами родів (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Nitrosococcus*) амоніаку ( $\text{NH}_3$ ), що утворюється у процесах гниття решток тварин і рослин, до нітритної та нітратної кислот. Вони у свою чергу, при взаємодії із ґрунтовими мінералами утворюють нітрити ( $\text{NO}^{2-}$ ) і нітрати ( $\text{NO}^{3-}$ ):

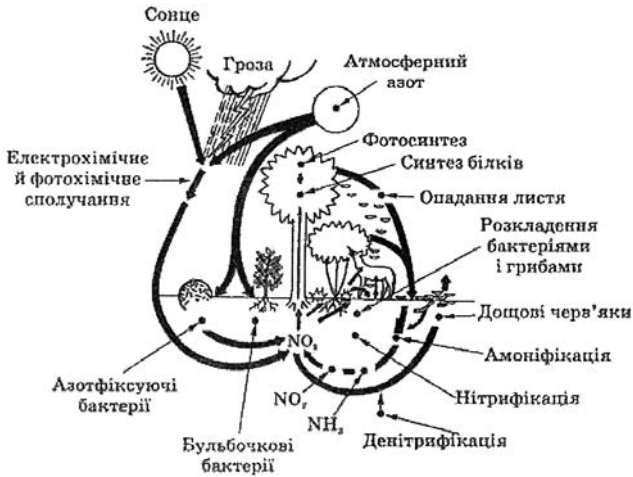


У такій формі сполуки N здатні ефективно засвоюватися вищими рослинами для синтезу пептидних зв'язків C-N амінокислот і білків. У подальшому, по трофічним ланцюгам Нітроген потрапляє в організми людей, тварин, грибів. Зокрема, велика кількість дерев здатна до біологічної N-фіксації у такий спосіб у тропічних лісах, що сприяє балансу концентрації нітратів (Ardon M., et al., 2023).

3) повернення вільного азоту до атмосфери, що відбувається у результаті мікробіологічних процесів за участі ґрунтових бактерій-денітрифікаторів, які знову переводять N у молекулярну форму. Якби не було процесу денітрифікації, то бактерії, що фіксують атмосферний азот, повністю витратили б його для себе;

4) абіотична форма засвоєння живою речовиною Нітрогену за рахунок йонізації, електричних розрядів, лісових пожеж та інших процесів, здатних розірвати міцний потрійний зв'язок у молекулі  $\text{N}_2$ . Так, наприклад, під дією електричного розряду азот реагує з киснем повітря утворюючи монооксид:  $\text{N}_2 + \text{O}_2 = 2\text{NO}$ , який може реагувати з наступною молекулою кисню:  $2\text{NO} + \text{O}_2 = 2\text{NO}_2$ ;

5) надходження в атмосферу завдяки вулканічній діяльності різноманітних газоподібних сполук Нітрогену, які здатні переходити у вільну молеку-



Мал. 31. Біогеохімічний колообіг Нітрогену.

лярну форму. Крім того, в біосферу надходить глибинний азот термальних вод, тобто колообіг N незамкнутий.

Отже, головним постачальником N у біосфері є надра Землі, основним накопичувачем – атмосфера, точніше тропосфера (частина атмосфери, що простягається на 8–12 км від поверхні Землі).

З біогеохімічної точки зору у складі органічних сполук N заряджається енергією, у процесах нітрифікації – втрачає її. Отже, N, як і O, H, C, S теж є геохімічним акумулятором сонячної енергії в біосфері.

Антропогенна діяльність значно впливає на колообіг Нітрогену за рахунок викидів у атмосферу оксидів Нітрогену промисловістю та автотранспортом; використання надлишку азотних добрив і пестицидів, що призводить до накопичення нітратів у сільськогосподарській продукції; вирубування лісів, зрошення полів, осушення боліт, що змінюють мікрофлору ценозів та ін.

Токсична дія нітратів полягає у гіпоксії (кисневому голодуванні тканин), токсичній пневмонії, що розвивається через порушення транспортування кисню кров'ю внаслідок утворення метгемоглобіну та гальмування активності деяких ферментних систем тканинного дихання. Інтоксикація нітратами характеризується тяжким перебігом, а лікування отруєння має бути невідкладним. Накопичення нітратів у рослинах залежить від біологічних особливостей самих культур; дози, форми і способу внесення азотних до-

брив; погодних умов (освітленості, вологості, температури); збалансованості елементами живлення; терміну після останнього азотного підживлення та збирання врожаю та ін.

Однією з ключових проблем біогеохімії є кількісна оцінка взаємодії між циклами С та N, особливо в глобальному масштабі, оскільки зростання CO<sub>2</sub> та сполук N в тропосфері продовжується. Одним з розумних прогнозів є збільшення накопичення як С, так і N у рослинній біомасі та органічній речовині ґрунту, проте проблеми пов'язані з відносною відкритістю біогеохімічних циклів і їх взаємодією з циклами інших макро- та мікроелементів, що потребує дослідження (V. Bashkin, 2002).

## Біогеохімічний колообіг Оксигену (O)

Найпоширеніший елемент в природі: кларк в земній корі 47,2 %; гідросфері – 85,7%; живій речовині – 65–70 %. Основними природними сполуками, до складу яких входить Оксиген, є: кисень повітря (O<sub>2</sub> – 20,9 об'ємн. %); вода (H<sub>2</sub>O); SiO<sub>2</sub>, силікати та алюмосилікати (відомо близько 1400 мінералів, що містять O); озон (O<sub>3</sub>). Майже увесь молекулярний кисень (O<sub>2</sub>) атмосфери і гідросфери виник і підтримується на постійному рівні завдяки фотосинтетичній діяльності зелених рослин; в земній корі відбуваються як біологічні, так і хімічні процеси із виділенням вільного кисню (мал. 32).

Оксиген має високу хімічну активність (табл. 4.3), реагує практично з усіма елементами земної кори, що обумовлює його важливу геохімічну роль в біосфері. Ряд активності взаємодії металів із O<sub>2</sub> має вигляд:



В. Вернадський зауважував, що вільний кисень атмосфери є найпотужнішим «хімічним диктатором», що мільярди років впливає на системи біосфери і визначає їх геохімічну специфіку. Розчинений O<sub>2</sub> разом із підземними водами може проникати в літосферу на глибину понад 1 км.

Оксиген – циклічний елемент, приймає участь в численних колообігах різного масштабу – від окремих біогеоценозів, до біосферного рівня. Оксиген визначає окисно-відновні та лужно-кислотні умови розчинів та розплавів. Для нього характерна як іонна, так і неіонна форми міграції у розчинах.



Мал. 32. Колообіг Оксигену.

Таблиця 4.3

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Оксигену

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів в основному стані	8; $1s^2 2s^2 2p^4$
Масові числа природних ізотопів *	$^{16}\text{O}$ (99,759%); $^{17}\text{O}$ (0,037%); $^{18}\text{O}$ (0,204%)
Відносна атомна маса (а.о.м).	15,9994
Ковалентний радіус атома, нм	0,073
Спорідненість до електрону, eV	1,467
Радіус іона $\text{E}^{-2}$ , нм	0,136
Перший потенціал іонізації, В	13,6182
Відносна електронегативність	3,50
Ступені окиснення	+2, -2, -1
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (273 К)	1,13 (для зріджн.)
Температура плавлення, °С	- 218,8
Температура кипіння, °С	- 182,812
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta\text{H}^{\circ}_{298}$ ), кДж/моль	249,36

\* Крім того, одержано п'ять штучних радіоактивних ізотопів, які використовуються у якості радіоактивних індикаторів.

Кисень – найважливіший розчинний газ поверхневих вод. Основні джерела надходження  $O_2$  у поверхневі води: абсорбція з атмосфери, фотосинтез водних рослин, опади. Швидкість абсорбції  $O_2$  з атмосфери поверхнею водойми підвищується із пониженням температури, підвищенням атмосферного тиску, зниженням мінералізації води (табл. 4.4). Саме тому один із етапів міграційного циклу вільного кисню пов'язаний із обміном у системі «природні води – тропосфера».

В океанській воді міститься від  $3 \cdot 10^9$  до  $10 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> розчиненого кисню, а у тропосфері міститься 80% атмосферного повітря і майже уся водяна пара. Холодна вода високих широт поглинає кисень, з океанічними течіями переносить у тропіки, де вивільняє його в атмосферу. Саме у тропосфері формуються повітряні маси, розвиваються циклони, антициклони та інші процеси, що визначають клімат. Поглинання і виділення кисню відбувається також при зміні сезонів року, що пов'язано зі зміною температури води.

Таблиця 4.4

### Залежність концентрації кисню у воді від температури

( $P = 760$  мм. рт. ст)

Температура, °C	Розчинний кисень, мг/л	Температура, °C	Розчинний кисень, мг/л
0	14,65	15	10,0
5	12,80	20	9,0
10	11,20	25	8,20

Еволюція біосфери супроводжувалася поступовим збільшенням вмісту кисню в атмосфері і гідросфері. Поява вільного кисню сприяла перетворенню відновлювальної зони гіпергенезу (вивітрювання) материків на окиснювальну. Зокрема, води боліт не містять вільного кисню і мають відновлювальні властивості. Якщо води такого типу контактують з вільним  $O_2$ , то виникає кисневий *геохімічний бар'єр*, на якому концентруються Fe, Mn, S та деякі інші елементи. На такому бар'єрі відбувається утворення деяких сірчаних, залізних та марганцевих руд.

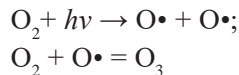
Окисно-відновна зональність спостерігається в солончаках (1–2 см), болотах і озерах (декілька метрів). Вона обумовлена одночасним існуванням у цих екосистемах двох зон: окиснення (де відбувається фотосинтетична



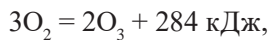
діяльність рослин); відновлення (де здійснюються процеси активного розкладання органічної речовини мікроорганізмами). Для озер характерна зона окиснення у верхній частині озера, зона відновлення – у нижній частині та мулі. У болотах знаходиться багато сполук відновлювального характеру – метан, самородна мідь та ін. Отже, окисно-відновна зональність у біосфері породжена сонячною енергією, яка накопичує сильний окисник ( $O_2$ ) і сильні відновники (органічні сполуки,  $H_2S$  та ін.).

Величезна кількість кисню витрачається на окисні реакції біогеохімічної природи. Під час таких реакцій вивільняється енергія, поглинута живою речовиною в процесі фотосинтезу. В ґрунтах, мулах, водоносних горизонтах розвиваються аеробні мікроорганізми, які використовують  $O_2$  для окиснення органічних сполук.

**Озон.** У стратосфері в результаті фізико-хімічних реакцій (дії радіації та електричних розрядів) молекулярний кисень розпадається на два активних радикали, які здатні взаємодіяти з новими молекулами кисню з утворенням озону:



Термохімічне рівняння реакції утворення озону з кисню має вигляд:



тобто на 1 моль утвореного  $O_3$  поглинається значна кількість енергії (284/2 = 142,3 кДж). Через це хімічні зв'язки в його молекулі мають великий запас енергії. Озон – найсильніший окисник.

Основна маса озону перебуває на висотах від 10 до 50 км, а його максимум – на висоті 18–25 км. Якби усю кількість озону (а це майже 3,3 трильйони тонн) зібрати за нормального тиску 760 мм рт. ст. і температури 273,15 К, то товщина цього шару склала б усього 2–4 мм. Такий «озоновий екран» затримує згубну для усього живого жорстку ультрафіолетову сонячну радіацію ( $\lambda = 280\text{--}180$  нм); випромінювання іншого УФ-діапазону (400–290 нм) досягають поверхні Землі. Озоновий екран, немов щит, оберігає ДНК, ферменти та інші біологічно важливі молекули живої речовини від прямого руйнування, чим і забезпечує хід еволюції. Саме тому життя на поверхні планети, на думку вчених, могло розвиватися тільки після виникнення такого захисного екрану – на початку палеозойської ери (близько 600 млн років тому).

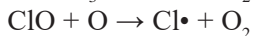
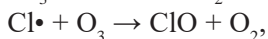
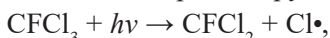
За даними екологічного відділу ООН і Всесвітньої метеорологічної ради, нині продовжується руйнування озонового шару над Північною Америкою, Європою, Австралією, Новою Зеландією та частиною Південної Америки. Антропогенними причинами, що викликають ослаблення озонового щита (руйнації  $O_3$ ), вчені вважають:

1) запуски космічних ракет, реактивних літаків (паливо при згорянні «випалює» в озоновому шарі великі «дірки»; пара та оксиди Нітрогену викидів літаків на висоті 12–15 км);

2) виділення оксидів Нітрогену з поверхні ґрунту при розкладанні азотних добрив;

3) хлорофлуоровуглеці (ХФВ), або фреони – леткі хімічні речовини, які застосовують у побуті та виробництві в якості холодоагентів (в холодильниках, кондиціонерах, рефрижераторах), піноутворювачів, розпилювачів аерозолів і т. ін. Коли молекули ХФВ з конвективними потоками піднімаються до висоти, де концентрація озону максимальна (приблизно 25 км), вони піддаються інтенсивному впливу короткохвильового УФ-випромінювання, яке не проникає на менші висоти через екрануючу дію озону.

У 1995 році Паулю Крутцену, Марію Моліні та Роланду Шервуду була присуджена Нобелівська премія з хімії за дослідження процесу створення та руйнування озонового шару Землі. Вчені встановили, що ультрафіолет руйнує стійкі у звичайних умовах молекули фреонів, вони розпадаються на компоненти, що мають високу реакційну здатність, зокрема атомарний хлор ( $Cl\bullet$ ), який вступає в ланцюгові реакції руйнування озону:



Таким чином, ХФВ переносить хлор з поверхні Землі через тропосферу у стратосферу (до шару з найбільшою концентрацією озону). Один радикал  $Cl\bullet$  здатний зруйнувати до 100 тис. молекул  $O_3$ . У місцях, де відбуваються такі взаємодії, виникають т.зв. «озонові діри». Термін «озонова діра» з точки зору геофізика є не зовсім коректним. Це явище правильніше називати сезонною варіацією концентрації озону в атмосфері. Адже «діра» у цьому разі є лише меншою локальною концентрацією, а не фізичною прогалиною в стратосфері. Натепер викиди фреонів в атмосферу обчислюються

мільйонами тонн, але навіть у разі повного припинення виробництва й використання ХФВ швидкого позитивного результату досягти не вдасться, оскільки термін існування ХФВ в атмосфері до 100 років. Зокрема, період життя в атмосфері двох найпоширеніших ХФВ: фреон-11 ( $\text{CFCl}_3$ ) і фреон-12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) – 75 і 100 років відповідно.

Практично безконтрольне використання ХФВ призвело до накопичення хлорфторвуглеводнів в атмосфері. За допомогою електронного детектора Лавлока виявлено присутність хлорфторвуглеводнів навіть в верхніх шарах атмосфери. Науковці прогнозують, якщо озоновий шар зменшиться на 10%, це спричинить розвиток раку шкіри додатково щорічно у 300 тис. людей, катаракти – майже у 2 млн. Постає серйозна загроза здоров'ю всього населення Землі, оскільки знижується резистентність організму до хвороб.

Першим міжнародним актом, обмежуючим виробництво сполук, які руйнують озоновий шар став Монреальський протокол (підписаний 16.09.1987 р.), який вступив в силу з 1.01.1989 р. Саме тому 16 вересня відзначається як Міжнародний день охорони озонowego шару Землі. Основне положеннями цього документа – виробництво фреонів заморозити на рівні 1986 року і почати скорочення їх виробництва. Україною підписано та ратифіковано Монреальський протокол, тим самим підтверджено наміри вжити необхідних заходів для захисту озонowego екрану шляхом припинення виробництва та використання озоноруйнівних речовин. За попередніми даними, якщо країни, які підписали протокол, будуть його дотримуватися і в майбутньому, то є сподівання, що озоновий шар відновиться до 2050 року. Зокрема, у 2017 р. був запущений Sentinel-5P – перший супутник, який здійснює екологічний моніторинг нашої атмосфери за програмою «Copernicus». Європейська комісія, яка керує цією програмою, 11.07.2018 р. повідомила: озоновой дірки над Антарктидою більше не існує (В. Костік, 2019).

Більшість хімічних сполук промислових викидів у природних водах зв'язують розчинений у них кисень. Забруднення водою органічними речовинами та сполуками, здатними до окиснення, значно погіршує їхній стан щодо забезпечення киснем. Результатом є нестача розчинного кисню, переважання процесів гниття, що виділяють у водойми  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  та інші отруйні для гідробіонтів сполуки. З позицій екологічної безпеки розчин-

ний кисень є основним параметром біологічного очищення стічних вод, а концентрація кисню у природних водоймах визначає сутність і швидкість процесів самоочищення.

Забруднення ґрунтів та Світового океану, вирубування лісів, опустелювання земель на великих територіях зменшує фотосинтетичне виробництво кисню рослинами. Крім того, значна кількість атмосферного кисню витрачається на спалювання різних видів палива. У деяких промислово розвинених штатах США, окремих регіонах Росії (Кемерово) та інших регіонах спостерігається тенденція – споживання атмосферного кисню переважає його утворення шляхом фотосинтезу. Завдяки компенсаторним процесам біосфера ще здатна долати ці негативні для людства явища.

## Колообіги Гідрогену (H) і води (H<sub>2</sub>O)

Гідроген належить до найлегших та найпоширеніших елементів у космосі (майже 75%), входить до складу міжзоряного газу, міститься у космічних туманностях. Близько половини маси Сонця та багатьох інших зірок припадає на цей елемент.

Кларк H в земній корі – 0,15%; гідросфері – 10,8%; живій речовині – 8–10%. Основними природними сполуками, до складу яких входить Гідроген, є: водень (H<sub>2</sub>) повітря (5 • 10–5% об.) та вулканічних газів, вода (H<sub>2</sub>O), вугілля (буре і кам'яне), нафта, глини, гідриди металів, живі організми, деякі мінерали.

Хімічні властивості Гідрогену (табл. 4.5) відрізняються від властивостей інших елементів. Це пояснюють наявністю лише одного валентного електрона (1s<sup>1</sup>) та відсутністю проміжних електронних шарів. Атом H аналогічно лужним металам підгрупи I(A) може утворювати у водних розчинах позитивні йони (H<sup>+</sup>) і бути відновником. Одночасно, у вигляді простої речовини водню (H<sub>2</sub>) – Гідроген подібний до галогенів: два атоми в молекулі (H<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>); неполярний ковалентний зв'язок; відсутність електропровідності. Хімічні особливості води (утворення диполя, водневих зв'язків) обумовлені властивостями атомів H, з'єднаних з більш електронегативним Оксигеном.

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Гідрогену

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів в основному стані	1; 1s <sup>1</sup> , валентний електрон 1s <sup>1</sup>
Масові числа природних ізотопів *	<sup>1</sup> H (99,9849%); <sup>2</sup> D (0,0139%); <sup>3</sup> T (0,0012%)
Відносна атомна маса (а.о.м).	1,00794
Ковалентний радіус атома, нм	0,046
Спорідненість до електрону, eV	0,7542
Радіус іона E <sup>-</sup> , нм	0,136
Перший потенціал іонізації, В	13,5986
Відносна електронегативність	2,10
Ступені окиснення	-1, 0, +1
Густина (ρ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	0,08988
Температура плавлення, °С	- 258,99
Температура кипіння, °С	- 252,72
Стандартна ентальпія атомізації елементів (ΔH <sup>o</sup> <sub>298</sub> ), кДж/моль	218,13

\* Природний водень (H<sub>2</sub>) – суміш двох ізотопів: протію (<sup>1</sup>H) і дейтерію (<sup>2</sup>D). Тритій (<sup>3</sup>T) одержують з дейтерію в результаті ядерних реакцій. Тритій – радіоактивний елемент з періодом напіврозпаду 12,5 років.

Молекулярний водень продукують багато бактерій, які розкладають органічні речовини (масляну, пропіонову та інші кислоти) в анаеробних умовах. Вільний H<sub>2</sub> утворюється у глибинах Землі (у місцях розломів надходить на поверхню), а також при дії радіоактивних випромінювань на воду (радіоліз води). Вільний водень – сильний відновник, і у місцях його надходження в біосфері формується *глейовий геохімічний бар'єр*. На такому бар'єрі з підземних вод осаджується Fe (у вигляді мінералу сидериту – FeCO<sub>3</sub>), самородна мідь, срібло, селен, молібден, золото.

Жива речовина при фотосинтезі фіксує Гідроген у вигляді органічної речовини біосфери, а також бере участь у його закріпленні мінеральною речовиною ґрунту. Це стає можливим завдяки дисоціації кислотних продуктів метаболізму із вивільненням йону H<sup>+</sup>. Останній, зазвичай, утворює із молекулою води йон гідроксонію (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>). Деякі силікати поглинають H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> і трансформуються у глинисті мінерали. Геохімік В. Добровольський наголошував, що інтенсивність продукування продуктів метаболізму з

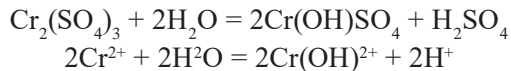
кислотними властивостями ( $\text{pH} < 7$ ) – важливий процес гіпергенного перетворення кристалічних гірських порід і утворення кори вивітрювання.

Для звичайної дощової води  $\text{pH}$  становить 5,6–5,7, тобто вода має слабкокислу реакцію. Обумовлено це тим, що  $\text{CO}_2$ , яке входить до складу повітря, вступає в реакцію з атмосферою вологою і утворює слабку карбонатну кислоту.

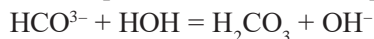
У водоймах зміни значення  $\text{pH}$  тісно пов'язані з процесами фотосинтезу, розпаду органічної речовини та реакціями гідролізу. У більшості природних вод активна концентрація  $\text{H}^+$  коливається від  $10^{-8}$  до  $10^{-5}$  г/л (8–5 у одиницях  $\text{pH}$ ). Отже, є вміст йонів  $\text{H}^+$  у природних водах обумовлений переважно кількісним співвідношенням концентрацій карбонатної кислоти та її йонів:



У природі наведеної рівноваги в чистому вигляді не існує, оскільки на природні води чинять дію численні фактори, а саме: температура, тиск, вміст в атмосфері кисню, амоніаку, діоксиду та триоксиду Сульфур, Нітрогню, склад порід, якими протікає річка чи розташоване озеро. Джерелом  $\text{H}^+$  є також гумінові кислоти, а також гідроліз солей важких металів (Cd, Fe, Cr, Al, Zn, Pb та ін.). Гідроліз відбувається по катіону (сіль слабкої основи і сильної кислоти). Наприклад:



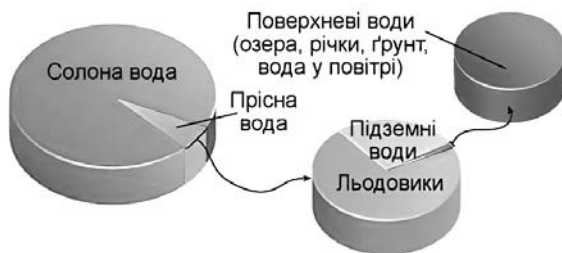
При дисоціації гідрокарбонатів  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  та  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  утворюються  $\text{HCO}_3^-$ , що призводить до змін  $\text{pH}$  води внаслідок гідролізу солей по аніону:



Проте у біогеохімічній історії Гідрогену вищеназвані процеси відіграють другорядну роль, а вирішальне значення має історія Н у вигляді води.

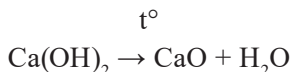
Величезна площа Землі (71 %) охоплена водою, на частку материків припадає 29 % площі. Найбільше її міститься в океанах (їх п'ять – Тихий, Атлантичний, Північний Льодовитий, Індійський, Південний) і морях. Солоність океанічної води досить стала і становить 35 г/л (35 %). Незначне її зниження відбувається з глибиною, а підвищення – у зоні тропіків. Прісною вважається вода, солоність якої не перевищує 1 %. Солоні вода непридатна для використання людиною. Більша частина прісної води зосереджена у

вигляді льодовиків. Невелика кількість її міститься в надрах землі (мал.33). Річки є джерелом прісної води, придатної для використання людиною.

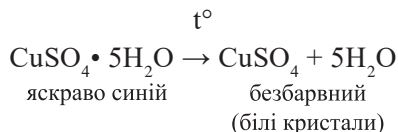


Мал. 33. Гідросфера.

Вода, що входить до складу різних речовин, має різну природу. Різняться конституційну, кристалічну і гігроскопічну воду. *Конституційна вода* – входить до складу кристалічної решітки деяких речовин у вигляді іонів, напр.,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}^+$ , що утворюють воду, однак тільки після деструкції мінералу її можна виділити:



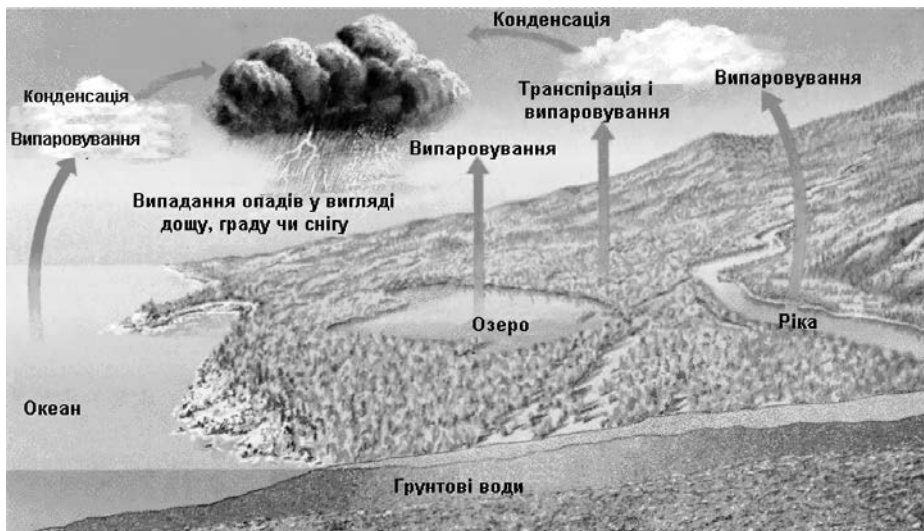
У результаті відщеплення *кристалізаційної води* хімічна природа сполуки не змінюється, але можуть змінюватися фізичні властивості (колір):



*Гігроскопічна вода* сорбована сполуками, а не хімічно зв'язана, тому після її вилучення шляхом висушування сполука не змінюється хімічно. Така форма води у ґрунті нерухома і недоступна для рослин, оскільки утримується на поверхні колоїдних частинок потужними силами сорбції (10–20 тис. атм). Знання водних особливостей ґрунту дозволяє агрохімікам, екологам достовірно оцінювати запаси продуктивної (доступної для рослин) вологи.

*Колообіг води* відбувається постійно у біосфері і земній корі. Рушійними силами колообігу води є енергія Сонця і сила тяжіння (мал. 34). Під

впливом тепла відбуваються випаровування і активні висхідні переміщення водяної пари. Вода, випаровуючись із поверхні океану і суші, поповнює атмосферу вологою. Затрачена на випаровування енергія звільняється при конденсації вологи в атмосфері. Сила тяжіння є причиною падіння крапель дощу, течії річок, руху ґрунтових і підземних вод.



Мал. 34. Колообіг води.

Отже, повітря піднімається вгору, охолоджується, водяна пара конденсується. Утворюються атмосферні опади, які випадають переважно у вигляді дощу чи снігу. Опади поглинаються ґрунтами частково. Вода, що не встигає просочитися крізь землю, утворює поверхневий стік. Вода стікає зі схилів, збирається у вимивинах, ярах, балках і у вигляді розгалуженої мережі потоків потрапляє до річок. Але це лише частина материкового стоку – поверхневого. Річки живлять підземні води внаслідок просочування ґрунтових вод крізь товщу осадових порід. Частина найактивніших підземних вод виходить на поверхню у вигляді джерел або дренажується річками. Постійний притік ріки одержують саме завдяки живленню підземними водами. Води озер і морів, як і Світового океану загалом, поповнюються також атмосферними опадами і річковими водами. У такий спосіб



відбувається безперервне відновлення води, що була втрачена внаслідок випаровування з поверхні океану або суходолу.

Уявлення про масштаби річного колообігу води на планеті відображено у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

**Річний баланс води за М. Львовичем (2000)**

Елементи водного балансу	Об'єм, км <sup>3</sup>	Шар, мм	% від атмосферних опадів
<b>Периферійна частина суходолу (117504 тис. км<sup>2</sup>)</b>			
Опади	106000	910	19,4
Річний стік	36380	309	7,0
Випаровування	64620	550	12,4
<b>Замкнена («безстічна») частина суходолу (31124 тис. км<sup>2</sup>)</b>			
Опади	7500	238	1,4
Випаровування	7500	238	1,4
<b>Світовий океан (361455 тис. км<sup>2</sup>)</b>			
Опади	411 600	1140	79,2
Притік річних вод	44 230	120	7,0
Випаровування	447980	1240	86,2
<b>Земна куля (51 0000 тис. км<sup>2</sup>)</b>			
Опади	520 000	1020	100
Випаровування	520 000	1020	100

Залежно від географічних просторів, які охоплює колообіг води, його особливостей формування, розрізняють малий і великий колообіги води. *Малий колообіг* відбувається за схемою: випаровування води з поверхні Світового океану – перенесення водяної пари над океаном та її конденсація – опади на поверхню океану. *Великий колообіг* також бере свій початок від випаровування води з поверхні Світового океану, але далі водяна пара і хмари переміщуються вітрами над акваторією у повітряний басейн суходолу, де й відбувається конденсація вологи і випадання атмосферних опадів. Цей процес є основним джерелом відновлення прісних водних ресурсів на Землі – найбільш цінних для функціонування екосистем. Перенесена з океану на сушу вода з часом повертається назад з материковим стоком. При цьому значні обсяги води витрачаються на випаровування і транспірацію рослин.

Колообіг води у геологічному часі незамкнутий. Значні маси води надходять у біосферу при вулканічних виверженнях, а також з зони метаморфізму у результаті віджимання води при ущільненні глинистих порід, перетворенню їх на сланці. У біосфері відбуваються процеси гідратації, – зв'язування води у складі глинистих та інших мінералів. При прогинанні земної кори у геосинклінальних зонах такі гідратовані товщі потрапляють на великі глибини і вода надовго вилучається з колообігу. У процесі колообігу води в біосфері відбувається розділення ізотопів Гідрогену і Оксигену. При випаровуванні вода збагачується легкими ізотопами, внаслідок чого атмосферні опади, поверхневі і ґрунтові води мають більше легких ізотопів, ніж океанічні.

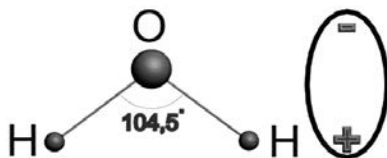
Потужна енергія Сонця щороку піднімає з поверхні планети в атмосферу понад 500 тис. км<sup>3</sup> води, долаючи силу земного тяжіння. За наближеними підрахунками, взимку в атмосфері знаходиться в середньому 13080 км<sup>3</sup> води, а влітку – близько 14540 км<sup>3</sup>. Це в сім разів більше, ніж міститься води в усіх річках світу. Порівняємо кількість опадів за рік (500 тис. км<sup>3</sup>) і загальну кількість води в атмосфері (13 тис. км<sup>3</sup>). Кількість опадів за рік майже в 40 разів перевищує кількість води в атмосфері. Тобто, 40 разів на рік (в середньому кожні 9 діб), вода в атмосфері повністю оновлюється. Отже, колообіг води в атмосфері є дуже динамічним.

Колообіг води на земній кулі створює у глобальному, регіональному і місцевому масштабі основний механізм перерозподілу на Землі речовини, енергії та інформації, об'єднує в єдине ціле усі водні об'єкти. Він тісно пов'язує між собою гідросферу, літосферу, атмосферу і біосферу в єдине ціле; робить можливим життя на планеті. Вважається, що в своєму колообігу вода проходить крізь екосистеми практично без втрат. При цьому, біосфера щорічно використовує на формування біомаси тільки 1 % води, що випала у вигляді опадів (В. Костік, 2019, с. 33).

#### *Біоекологічні функції води:*

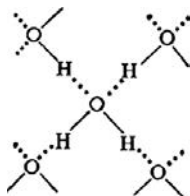
1. Головна складова частина всіх живих організмів (тіло людини на 70 % складається з води, а деякі організми, такі як медуза або огірок – на 98–99 %); об'єднує усі частини організму в єдине ціле і забезпечує обмін речовин (метаболізм); бере участь у визначенні конформації молекул і формуванні структури біологічних мембран.

2. Універсальний розчинник і середовище для перебігу біохімічних реакцій. Здатність води розчиняти найрізноманітніші речовини та її інші унікальні властивості спричинені складом і асиметричною будовою молекули (мал. 35).



**Мал. 35.** Зв'язки між О–Н у молекулі води ковалентні полярні. Кут між зв'язками  $104,5^\circ$ , що спричинює асиметричність структури і виникнення *диполя* – системи двох зарядів ( $\delta^+$  і  $\delta^-$ ), протилежних за знаком, але однакових за величиною. На кінці молекули, де знаходяться ядра атомів Гідрогену, утворюється частково позитивний заряд –  $\delta^+$ ; біля атомів Оксигену – частково негативний заряд –  $\delta^-$ . У такий спосіб утворюється *диполь*.

Разом молекули води з'єднуються *водневими зв'язками* (мал. 36).



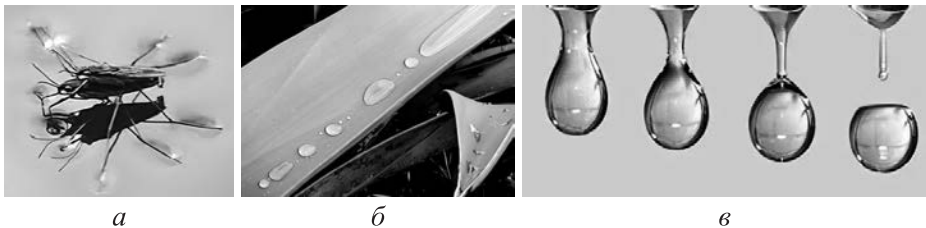
**Мал. 36.** Молекули води притягуються одна до одної внаслідок електростатичної взаємодії атомів Н і О різних молекул. Кожна молекула з'єднується водневими зв'язками (позначають крапками) з 4-ма сусідніми молекулами і т.д. Умовно усю гідросферу можна зобразити як  $(\text{H}_2\text{O})_n$ . У льоді вода утворює ажурну конструкцію.

3. Постачальник кисню у рушійному біогеохімічному процесі біосфери – фотосинтезі; джерело протонів ( $\text{H}^+$ ) для світлової фази (див. підрозділ хоx).

4. Вода з причин високої теплоємності виконує терморегулюючий функцію шляхом випаровування, транспірації, потіння. Висока теплоємність води пояснюється тим, що значна частина енергії витрачається на розрив водневих зв'язків, що обмежують рухливість молекул – на подолання «зчепленості» її молекул. Отже, істотне збільшення теплоти навколо певного обсягу води викликає лише порівняно невелике підвищення її температури. Завдяки цьому протікання біохімічних процесів в живих організмах захищене водою від різких відхилень температури навколиш-

нього середовища. Вода забезпечує динамічну сталість умов (гомеостаз). Висока теплоємність води захищає організми від різкого підвищення температури – терморегуляцію. Завдяки цьому температура океану змінюється повільно, і цим регулюється температура планети.

5. Поверхневий натяг – фізичне явище – прагнення рідини скоротити площу своєї поверхні при незмінному об'ємі. Завдяки силам поверхневого натягу краплі рідини приймають максимально близьку до сферичної форми, виникає капілярний ефект, деякі комахи можуть ходити по воді. Простими словами поверхневий натяг – це внутрішньо молекулярна сила, яка об'єднує молекули води в невидиму пружну плівку (мал. 37).



**Мал. 37.** Явище *адгезії* (а, б) – прилипання води (рідкої фази) до твердої фази; створює поверхневий натяг на листках деяких рослин краплі мають форму кульок (б), оскільки вода не змочує поверхню листка. Явище *когезії* (в) – зчепленість молекул всередині рідкої фази в одне ціле (крапля). Властивості когезії та адгезії є основними в проходженні води капілярами ґрунту, судин ксилеми рослин проти сил гравітації на значні відстані (до 100 м). Тобто, якщо адгезія міцніша за когезію, то стінка змочується рідиною, яка підіймається по капіляру. Тіло і кінчики ніг водомірки (*Gerridae*) покриті жорсткими незмочуваними водою волосками, завдяки чому водомірки пристосовані до ковзання по воді (а).

6. Густина води змінюється в залежності від температури: при зниженні температури спочатку поводить себе як й інші рідини – збільшує густину і зменшує об'єм. У точці 3,98 °С вода має найбільшу густину, а потім об'єм починає збільшуватися (на 11% при 0 °С). Кожна молекула з'єдналася водневи зв'язками з 4-ма сусідніми молекулами. У льоді вода утворює ажурну конструкцію. Отже, під льодом температура завжди менша за + 4 °С. Лід легший від води і не тоне у ній. Завдяки цьому, а також малій теплопровідності шар льоду захищає глибокі водойми від промерзання до дна, і цим забезпечується у них життя – екологічне значення.

7. Середовище існування гідробіонтів.

## 4.5. Особливості біогеохімічних циклів деяких макро- і мікроелементів

Біогеохімічні цикли макро- і мікроелементів мають певні особливості, зумовлені їхніми властивостями. У природних умовах цикли практично не відокремлені, в них одночасно беруть участь декілька хімічних елементів (відповідно до закону Кларка-Вернадського у кожному природному об'єкті присутні всі хімічні елементи). Багато з елементів прискорюють або уповільнюються реакції, інші – створюють певні кислотно-лужні і т.п. умови, частина з них входить до складу нових утворень у вигляді закономірних і випадкових домішок.

### Біогеохімічний цикл Сульфуру (S)

Сульфур (S) поширений у природі; його кларк у земній корі становить 0,05%. Основні природні сполуки, до складу яких входить S, – *сульфіди* – ( $\text{FeS}_2$  (пірит або залізний колчедан),  $\text{ZnS}$  (цинкова обманка),  $\text{PbS}$  (свинцевий блиск),  $\text{HgS}$  (кіновар),  $\text{CuFeS}_2$  (халькопірит)), і сульфати ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (гіпс),  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (глауберова сіль),  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (гірка сіль),  $\text{SrSO}_4$  (целестин),  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (астраханіт),  $\text{BaSO}_4$  (барит),  $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (полігаліт),  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (кізерит)). У вільному стані зустрічається самородна сірка (S): Італія (Сицилія), США (Луїзіана, Техас), Японія (Хоккайдо), Туркменістан, Україна (Крим) та інші райони поблизу вулканів. Виявлено S в метеоритах у вигляді ферум сульфїду.

Крім того, разом із вулканічними газами виділяється оксид Сульфуру (IV)  $\text{SO}_2$  та сірководень  $\text{H}_2\text{S}$ , який міститься також у мінеральних джерелах (Мацеста, П'ятигорськ) та у Чорному морі (на глибині понад 200 м). Деякі найпростіші морські тварини (наприклад, Сувойки – *Vorticella*) будують свій скелет із сульфатів ( $\text{SrSO}_4$ ,  $\text{BaSO}_4$ ). Вільна сульфатна кислота міститься у деяких молюсках, асцидіях, мурахах.

За геохімічною класифікацією елементів В. Гольдшмідта, виокремлено халькофільні елементи (халькофіли), які збагачують сульфїди (Cu, Ag, Zn, Pb, Cd, Hg, Se, Te, As, Sb, Bi, In, Tl і ін.) (табл. 4.7.).

Сульфур – біогенний елемент. Входить до складу амінокислот метіоніну і цистеїну, коферменту А (КоА), деяких гормонів і вітамінів, які є незамінними компонентами біохімічних процесів клітин (S забезпечує просторову організацію та функціональні функції білків, захищає процеси біохімічного синтезу від окиснення, а весь організм – від токсичної дії чужорідних речовин тощо).

Сульфур є компонентом структурного білка колагену. Важливими метаболітами, що містять S, є гемоглобін, гепарин, цитохроми, фібриноген та ін. Вміст S в тілі дорослої людини – приблизно 0,16%. Багато S в м'язах, шкірі, кістках, нервовій тканині, печінці. Добова потреба організму в цьому хімічному елементі 1–2 г, який надходить із харчовими продуктами та у складі неорганічних / органічних сполук. Найбагатші на S нежирна яловичина, риба, молюски, яйця, сири, молоко, капуста і квасоля. До елементів, що сприяють засвоєнню S, належать F і Fe, до антагоністів – As, Ba, Fe, Pb, Mo і Se.

Таблиця 4.7

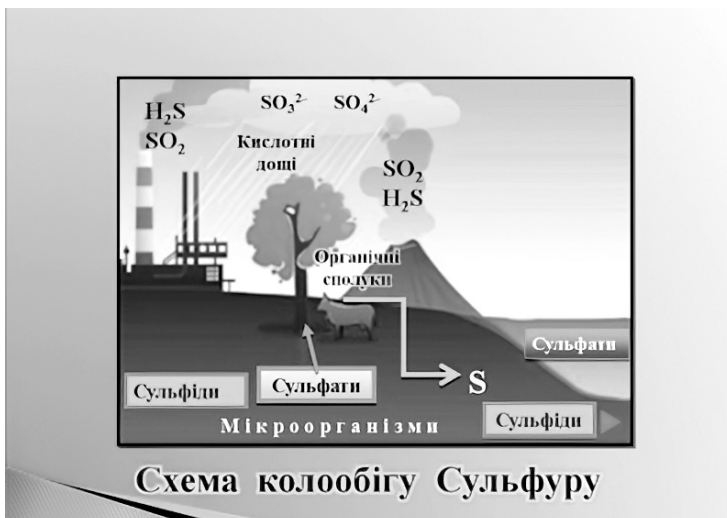
### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Сульфур

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	16; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4 3d^0$ валентні електрони $3s^2 3p^4$
Масові числа природних ізотопів *	$^{32}\text{S}$ (95,018%); $^{33}\text{S}$ (0,75%); $^{34}\text{S}$ (4,215%); $^{36}\text{S}$ (0,017%)
Відносна атомна маса (а.о.м).	32,066
Ковалентний радіус атома, нм	0,102
Спорідненість до електрона, eВ	2,0772
Радіус іона $E^{-2}$ , нм	0,184
$E^{+4}$	0,037
$E^{+6}$	0,029
Перший потенціал іонізації, В	10,3601
Відносна електронегативність	2,60
Ступені окиснення	-2, 0, +1, +2, +3, +4, +6
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	2, 07 (для ромб.)
Температура плавлення, °С	112,8
Температура кипіння, °С	444,82
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta H_{298}^0$ ), кДж/моль	249,36

\* штучно одержано ще три ізотопи Сульфур.

Мікрофлорою кишечника людини виробляється ендогенна  $H_2SO_4$ , що бере участь у знешкодженні токсичних з'єднань (фенолу, індолу, скатолу та ін.), а також зв'язує чужорідні для організму речовини (у т. ч. лікарські препарати та їхні метаболіти). При цьому утворюються кон'югати, що виводяться з організму. Обмін S впливає на білковий обмін, зокрема на гормони гіпофіза, щитоподібної залози, наднирників, статевих залоз.

У біосфері мають місце біогеохімічні колообіги S різних масштабів – від невеликих біогеоценозів до океану. При цьому S багаторазово змінює валентність – то окиснюється до шестивалентного стану з утворенням сульфатів ( $SO_4^{2-}$ ) або вільної сульфатної кислоти ( $H_2SO_4$ ), то відновлюється до двовалентного з утворенням сірководню ( $H_2S$ ) та його похідних – сульфідів ( $S^{2-}$ ). Усі ці процеси здійснюються переважно за участі бактерій, тобто мають біогеохімічну природу. Зокрема, тіонові бактерії (родів *Thiobacillus*, *Thiomicrospira*, *Thiodendron* та ін.) здатні окиснювати із одержанням енергії молекулярну сірку та мінеральні відновлені сполуки Сульфору: сульфідів ( $S^{2-}$ ), тіосульфати ( $S_2O_3^{2-}$ ), сульфіти ( $SO_3^{2-}$ ), тритіонати ( $S_3O_6^{2-}$ ), тетратіонати ( $S_4O_6^{2-}$ ). Ряд тіонових бактерій здатні одержувати енергію за рахунок окиснення тіоціонату ( $CNS^-$ ), диметил-сульфіду ( $CH_3SCH_3$ ), диметилди-сульфіду ( $CH_3S-SCH_3$ ), а також сульфідів важких металів.



Мал. 38. Колообіг Сульфуру.

У біогеохімічному циклі Сульфуру виокремлюють такі стадії:

1) засвоєння сполук S живими організмами (рослинами і бактеріями) із подальшим включенням до складу амінокислот, білків та інших органічних сполук;

2) перетворення органічного S живими організмами (тваринами, грибами, бактеріями) на  $H_2S$ ;

3) окиснення мінерального S живими організмами (сіркобактеріями, тіоновими бактеріями) у процесах сульфатредукції. На цій стадії відбувається окиснення  $H_2S$ , елементарної сірки, її тіо- і тетрасполук;

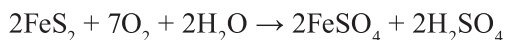
4) відновлення мінерального S живими організмами (бактеріями) у процесі десульфатізації до  $H_2S$ .

Отже, важливим ланцюгом біогеохімічного циклу Сульфуру у біосфері є біогенне утворення сірководню.

До характерних особливостей колообігу S можна зарахувати процеси атмосферної міграції, а також багатоманітність форм знаходження, що обумовлено перетворенням сульфідних форм на сульфатні (і навпаки), залежно від змін окиснювально-відновних умов.

Основним резервуаром S, з якого жива речовина черпає для власних потреб цей елемент, є літосфера. Таке пояснення обумовлено тим, що стійке існування сполук Сульфуру у вигляді  $H_2S$  чи оксидів  $SO_x$  в умовах сучасної атмосфери Землі неможливе. Сірководень ( $H_2S$ ) у кисневому середовищі атмосфери окиснюється, а оксиди Сульфуру реагують із парами води і утворюють сульфітну або сульфатну кислоти, що випадає на поверхню Землі у вигляді кислотних опадів. Оксиди  $SO_x$ , хоча і здатні засвоюватися рослинами безпосередньо з атмосфери, але суттєвої ролі в колообігу S не відіграють.

Первинною, глибинною за походженням, мінеральною формою відкладень S в земній корі, вважається сульфідна. Сульфідні сполуки в умовах біосфери практично нерозчинні у воді, тому Сульфур у вигляді  $S^{2-}$  не засвоюється рослинами. Коли сульфідні з надр Землі потрапляють на земну поверхню (у кисневе середовище), вони окиснюються і S входить до складу сульфат-іона  $SO_4^{2-}$





Водорозчинні сульфатні солі активно мігрують у водних розчинах у різних географічних оболонках планети. Вони ефективно засвоюються рослинами, а потім передаються по харчовому ланцюгу тваринам. Сульфатні сполуки входять до складу ґрунтового поглинаючого комплексу (ГПК), тому накопичуються в ґрунтах і беруть участь у процесах обмінної сорбції.

Вилучення S з біосферного колообігу відбувається шляхом накопичення сульфатних відкладень у літосфері (гіпсових та ін.). Втрати компенсуються, по-перше, процесами вулканізму (шляхом надходження  $H_2S$  та  $SO_x$  в атмосферу, а звідти, з атмосферними опадами, – на поверхню Землі); по-друге, в результаті діяльності термальних вод, з якими S надходить до верхніх горизонтів земної кори і на дно Світового океану у вигляді нерозчинних сульфідних сполук.

Отже, в біосфері чітко простежується колообіг Сульфуру за участі живої речовини (особливо мікроорганізмів, які здійснюють окиснення і відновлення сульфурвмісних сполук). Геохімічна робота живої речовини постійно змінює співвідношення 4-х природних ізотопів у бік збільшення легкого ізотопу ( $^{32}S$ ) у верхніх гумусових горизонтах ґрунтів.

Сульфур – важливий геохімічний акумулятор сонячної енергії, поглинання якої відбувається при відновленні сульфатів і утворенні сірководню та сульфідів, а виділення – при окисненні сульфідів, сірководню та елементарної сірки. З огляду на відносно високий кларк Сульфуру у сульфідах зосереджені великі запаси сонячної енергії.

Антропогенне надходження Сульфуру в біосферу суттєво змінює колообіг цього елемента, результатом чого є поступове його накопичення. Щорічно добуваються величезні кількості піриту та інших сульфідів, елементарної сірки. Під час технологічних операцій відновлений Сульфур окиснюється.

Результатом різних промислових процесів є утворення викидів у атмосферу сірчистого ангідриду ( $SO_2$ ), який при розчиненні у воді перетворюється на сульфитну кислоту. Атмосферні опади стають кислими ( $pH = 4$ ), що викликає захворювання людей, загибель рослин і тварин, руйнує будівлі та пам'ятки архітектури. Зокрема, багато видів риб (форель, харіус та ін.) дуже чутливі до показника кислотності води. За вмісту 1 л природної води навіть  $3 \cdot 10^{-6}$  моль сульфатної кислоти (може потрапити в річки з промисловими стоками чи кислотними дощами) мальки цих риб гинуть.

Дослідження колообігу хімічних елементів S, Fe, C, N за участі мікробіоти допомагає знайти шляхи рекультивації *мероміктних озер* – озер, які характеризуються розшаруванням маси води на два, які не перемішуються один з одним: нижній (монімолімніон) – відрізняється підвищеною мінералізацією, і верхній (міксолімніон), в якому вода перемішується. Ці шари розділені шаром хімічного стрибка – *хемокліном*. Вміст кисню у воді зменшується від поверхні до його повного зникнення у хемокліні або трохи глибше. Вміст  $H_2S$  починаючи від хемокліну до дна. Мероміктне озеро виникає в результаті інтенсивного надходження мінеральних солей у водойму, зокрема внаслідок скидів промислово-комунальних стоків. Вчені дослідили мікробні таксони, які беруть участь в колообігу S, Fe, C, N у водоймах шахт (Ayala-Muñoz D. *et al.*, 2023). Виявлено, що зелена водорість *Coccomyxa onubensis* домінує у верхньому шарі та хемокліні (шар з максимальним значенням вертикального градієнта мінералізації). Окиснення Fe (II) популяціями *Ca. Acidulodesulfobacterium*, *Ferrovum*, *Leptospirillum* і *Armatimonadetes* зафіксовано в хемокліні. Відновлення Fe (III) виявлено лише в глибокому шарі і пов'язане з діяльністю *Proteobacteria*. Активність щодо дисиміляційного колообігу N, включаючи фіксацію азоту та відновлення нітратів, зафіксована в хемокліні. У глибинному шарі домінує окиснення сульфідів гетеротрофними архейними популяціями *Thermoplasmatales*. У глибокому шарі популяції бактерій *Actinobacteria*, *Chloroflexi* та *Nitrospirae* сприяють як відновленню сульфатів, так і окисненню сульфідів.

Грунтуючись на цій інформації, вчені оцінили потенціал опадів сульфідних мінералів у глибинному шарі як інструмент для рекультивації. Сульфідні опади найбільше пов'язані з кількістю та якістю органічного C, що досягає глибоких шарів, а також додаванням  $O_2$  до ґрунтових вод, що сприяє окисненню S. Додавання органічного вуглецю та елементарної сірки стимулює відновлення сульфату та обмежує повторне окислення сульфідних мінералів (Ayala-Muñoz, D. *et al.*, 2023).

В останні десятиліття одним із джерел надлишкового надходження S в організм людини стали сульфіти, що додаються як консерванти або вибілювачі до харчових продуктів, алкогольних та безалкогольних напоїв. До найпоширеніших консервантів-сульфітів належать: сульфит натрію ( $Na_2SO_3$ ) або його гідратна форма ( $Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$ ), тіосульфат ( $Na_2S_2O_3$ ),

або гідросульфід натрію ( $\text{NaHSO}_3$ ). Усі ці сполуки водорозчинні, виділяють сірчистий ангідрид ( $\text{SO}_3$ ), чим і обумовлена їхня антимикробна (консервуюча) дія щодо пригнічення розвитку пліснявих грибів, дріжджів та аеробних бактерій. У кислому середовищі цей ефект посилюється.

## Біогеохімічний цикл Фосфору (P)

Фосфор має високу хімічну активність, тому у вільній формі в природі не зустрічається, а здебільшого у вигляді фосфат-іонів  $\text{PO}_4^{3-}$ :  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  – фосфориту,  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$  – гідроксилапатиту,  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$  – фторапатиту,  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCl}_2$  – хлорпапатиту. Надлишок катіонів  $\text{Ca}^{2+}$ , а також аніонів  $\text{F}^-$  та  $\text{Cl}^-$  розміщуються у проміжках кристалічної решітки ортофосфату кальцію, чим надають різним різновидам апатиту компактність і твердість. Зустрічається P також у вигляді  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  – вівіаніту (синьої залізної руди) та  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{P}_2\text{O}_5 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  – вавеліту (табл. 4.8).

Таблиця 4.8

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики P

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	15; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3 3d^0$ валентні електрони $3s^2 3p^3$
Масові числа природних ізотопів *	$^{31}\text{P}$ (100 %)
Відносна атомна маса (а.о.м).	30,973762
Ковалентний радіус атома, нм	0,106
Спорідненість до електрона, eV	0,8
Радіус іона $\text{E}^{-3}$ , нм	0,186
$\text{E}^{+3}$	0,044
$\text{E}^{+5}$	0,035
Перший потенціал іонізації, В	10,4867
Відносна електронегативність	2,10
Ступені окиснення	- 3, 0, + 3, + 5
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	1,83 (білий $\text{P}_4$ )**
Температура плавлення, °С	44,1 (білий $\text{P}_4$ )
Температура кипіння, °С	275 ( $\text{P}_4$ )
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta\text{H}^\circ_{298}$ ), кДж/моль	316,48

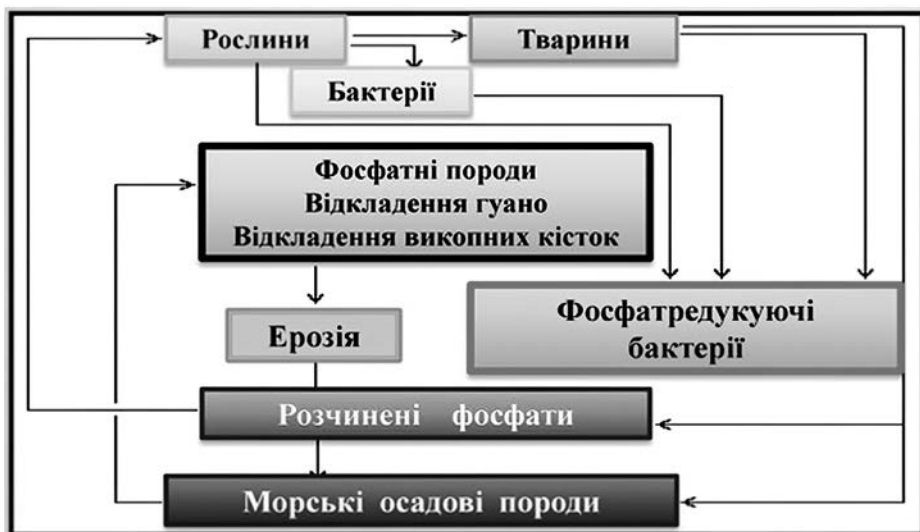
\* Штучно одержані радіоактивні ізотопи  $^{30}\text{P}$  і  $^{32}\text{P}$  (період напіврозпаду 14,3 доби);

\*\* Відомо декілька алотропних модифікацій фосфору: білий ( $\text{P}_4$ ), червоний, чорний та ін.; різняться розміщенням атомів один відносно одного у кристалічних решітках.

Загальний кларк Р в земній корі 0,08%. Суцільні великі скупчення апатиту відносно рідкісні, але його кристали пронизують масивні гірські породи (граніти, гнейси та ін.) і слугують першоджерелом фосфорних сполук в природі.

Колообіг Р представлено на мал. 39.

**У земній корі Фосфору багато. Вн малорозчинний, малорухомий, утворює лише одну газондібну сполуку - фосфін (PH<sub>3</sub>)**



**Схема колообігу Фосфору**

Мал. 39. Колообіг Фосфору.

Фосфат-аніони входять до складу складних органічних сполук, що забезпечують феномен живого – нуклеїнових кислот (ДНК, РНК), АТФ, ферментів, фосфопротеїди та ін. Геохімік О. Ферсман назвав Фосфор «елементом життя і думки». Баланс Р в організмі людини доцільно регулювати харчуванням сирами, рибою, курячими яйцями та ін. Добова потреба у Фосфорі для людини – 1,3 г. Всмоктування, розподіл і виведення Р з організму значною мірою пов'язано з обміном Са.

Основний запас Р зосереджений на нашій планеті у вигляді мінералів і гірських порід літосфери. При їх вивітрянні кристали апатиту потра-

пляють у ґрунт, де поступово розчиняються при контакті з кислотами і кореневими виділеннями рослин. Утворюються фосфат-аніони ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), які поглинаються рослинами для синтезу органічних речовин своєї біомаси.

Тварини є більшими концентраторами Фосфору (у складі тканин мозку, скелета та ін.), ніж рослини. Відомі декілька способів засвоєння Р організмами-консументами: 1) шляхом живлення безпосередньо рослинами; 2) добування водними організмами-фільтраторами Фосфору з органічних зависей; 3) засвоєння органічних сполук Фосфору організмами-мулоїдами на дні водойм.

Після відмирання рослин і тварин Р мінералізують мікроорганізми – редуценти. Мінералізація органічних решток і повернення Р у вигляді фосфат-аніонів у ґрунт відбувається завдяки життєдіяльності багатьох бактерій, які використовують енергію зв'язків органічних сполук Р (АТФ та ін.). Отже, накопичувачами Фосфору є рослини, а консументи різних рівнів споживають його у трофічному ланцюгу.

Газова форма сполук Фосфору (зокрема,  $\text{PH}_3$  – *фосфін*) практично не бере широкої участі у колообігу. Фосфін існує на Землі завдяки біологічним процесам (певні мікроорганізми в анаеробному середовищі здатні його генерувати) або техногенним процесам (виробляють люди). Фосфін вважають речовиною, що може бути індикатором феномену життя. У астрономічній спільноті немає інших джерел фосфіну, за винятком умов дуже екстремальних температур (зокрема, у гарячій щільній внутрішній атмосфері Юпітера та Сатурна є фосфін) або деяких зірок. Створений фосфін руйнується з часом різними процесами, наприклад, реакціями з киснем і воднем або ультрафіолетовим чи іонізуючим випромінюванням. Це означає, що без джерела, що виробляє фосфін, він повинен повільно зникати з часом. У 2020 році фосфін виявили в атмосфері Венери, що може бути доказом існування мікробного життя на Венері.

Втрати Фосфору з біогеохімічної точки зору пов'язані здебільшого із його виносом в моря та океан, звідки Р частково повертається на суходіл з рибою чи гуано (послід морських рибоїдних птахів).

Техногенез вносить у природні біогеохімічні цикли Р негативні корективи. Зокрема, використання фосфорних добрив, фосфоровмісних синтетичних поверхнево-активних речовин (СПАР) призводить до евтрофікації водойм.

## Біогеохімічні цикли Натрію (Na) і Калію (K)

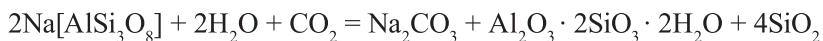
Na і K – належать до лужних металів, які в природі у вільному стані не зустрічаються; входять до складу різних мінералів (у вигляді хлоридів, сульфатів, карбонатів, нітратів) і гірських порід – силікатів. Найважливішою сполукою Натрію є NaCl, яка утворює поклади кам'яної солі, міститься у морській воді. Звичайно верхні шари кам'яної солі містять калійні солі (сильвініт, карналіт та ін.). Кларки в земній корі високі: Na – 2,5; K – 2,6.

Калійвмісні породи (польовошпатові гранітоїди) поширені на Українському щиті, є джерелом K, який надходить у верхні шари літосфери і знаменує формування зрілої континентальної кори (Л. Степанюк, 2019).

Незважаючи на велику схожість хімічних властивостей Na і K (табл. 4.9), їхні біологічні функції різні. Концентрація  $K^+$  всередині клітини перевищує концентрацію  $Na^+$ , що пов'язано з кращою проникністю  $K^+$  крізь мембрани. У плазмі крові значний вміст  $K^+$ , але відносно мало  $Na^+$ , і, навпаки,  $Na^+$  – основний позаклітинний йон. Ці явища спричинюють виникнення мембранного потенціалу (МП) клітин, який забезпечує проведення нервового імпульсу та інші біоелектричні явища в живій речовині біосфери.

Вміст Na в тілі дорослої людини становить 0,25%; добове споживання становить 4–7 г. У медицині NaCl у вигляді ізотонічного (0,9%) розчину застосовують при зневоднюванні організму, як дезінтоксикаційний засіб та ін. Вміст K в організмі людини становить 0,22%. Постійний надлишок Na і K в їжі супроводжується деяким підвищенням рівня інсуліну в крові. Відзначаються й інші гормональні зрушення.

Первинним джерелом Na і K у природі слугують мінерали алюмосилікатів. При вивітрюванні первинні польові шпати піддаються процесам деструкції з утворенням розчинних карбонатів, які переходять до ґрунтового розчину:



### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Na і K

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	Na 11; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ K 19; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$ валентні електрони $3s^1(\text{Na}); 4s^1(\text{K})$
Масові числа природних ізотопів	$^{23}\text{Na}$ (100 %) $^{39}\text{K}$ (93,08 %) $^{40}\text{K}^*$ (0,011 %) $^{41}\text{K}$ (6,91 %)
Відносна атомна маса (а.о.м).	Na 22,989768 K 39,0983
Ковалентний радіус атома, нм	Na 0,154 K 0,203
Спорідненість до електрона, eВ	Na 0,8 K 0,47
Радіус іона $E^+$ , нм	Na 0,102 K 0,138
Перший потенціал іонізації, В	Na 5,1392 K 4,3407
Відносна електронегативність	Na 1,01 K 0,91
Ступені окиснення	+ 1
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	Na 0,97 K 0,862
Температура плавлення, °С	Na 97,96 K 63,8
Температура кипіння, °С	Na 882,9 K 760
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta H_{298}^\circ$ ), кДж/моль	Na 91,77 K 90,39

\* радіоактивний ізотоп.

У ґрунтах ці два елементи існують у трьох формах: необмінній, обмінній та водорозчинній. У більшості ґрунтів основна маса (> 99%) лужних металів перебуває у необмінній формі (вміст Na і K у такій формі майже однаковий). В обмінній формі вміст K істотно перевищує вміст Na, оскільки K краще утримується ґрунтовими йонообмінними комплексами. Це пов'язано з тим, що їхня сумісна поведінка у зоні гіпер-

генезу загалом відрізняється. Значна частина К під час гіпергенного перетворення силікатів залишається у складі вторинних глинистих мінералів. Катіони  $\text{Na}^+$ , які слабо утримуються ґрунтами, мігрують і накопичуються у Світовому океані, соляних озерах, беруть участь в атмосферній міграції. Отже, для Na характерна водна міграція. Зворотний потік Na з океану на сушу визначається т. зв. «бризковиносом» – явищем перенесення частинок  $\text{NaCl}$  на значні відстані (до тисячі кілометрів) з найдрібнішими бризками океанської води під час бур і сильних вітрів.

Колообіг К набагато менший за масштабами, ніж Na, оскільки К краще поглинається ґрунтом. Калій необхідний для росту і розвитку хімічний елемент. У вигляді  $\text{K}^+$  добре засвоюється рослинами, а з відмерлими рештками повертається в ґрунт у вигляді біомаси.

Антропогенний вплив на колообіг Na значний. Людство споживає понад  $10^7$  т/рік Na, а добуває його у межах  $2 \cdot 10^7$  т/рік (В. Ковда, 1973).

## **Біогеохімічний цикл Кальцію (Ca)**

Ca належить до найпоширеніших елементів; його кларк у земній корі 3,6 %. У природі Ca зустрічається найчастіше у вигляді таких сполук: мінерал кальцит  $\text{CaCO}_3$  (з нього утворені масиви вапняку, мармуру, крейди, аргоніту); гіпс  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; апатит  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2(\text{CaCl}_2)$ ; доломіт  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ; плавиковий шпат  $\text{CaF}_2$  та ін. Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Кальцію наведено у таблиці 4.10.

Ca входить до групи елементів-біофілів (біофільність 0,34); кларк в організмі людини 1,5%. Кальцій володіє високою біологічною активністю, виконує в організмі такі функції: регуляція процесів нервової провідності і м'язових скорочень, формування кісткової тканини, мінералізація зубів; регуляція проникності клітинних мембран, регуляція внутрішньоклітинних процесів, підтримка стабільної серцевої діяльності, участь у процесах згортання крові. Він не може бути замінений ніяким іншим хімічним елементом.



### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Кальцію

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	20 ; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$ , валентні електрони: $4s^2$
Масові числа природних ізотопів *	$^{40}\text{Ca}$ (96,97 %); $^{42}\text{Ca}$ (0,64 %); $^{43}\text{Ca}$ (0,145 %); $^{44}\text{Ca}$ (2,06 %); $^{46}\text{Ca}$ (0,0033 %); $^{48}\text{Ca}$ (0,037%)
Відносна атомна маса (а.о.м).	40,078
Ковалентний радіус атома, нм	0,174
Металічний радіус атома, нм	0,197
Радіус іона $\text{E}^{+2}$ , нм	0,100
Перший потенціал іонізації, В	6,1131
Відносна електронегативність	1,04
Ступені окиснення	+2
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	1,55
Температура плавлення, °С	842
Температура кипіння, °С	1495
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta\text{H}_{298}^0$ ), кДж/моль	176,68

\* штучно одержано ще ізотоп  $^{45}\text{Ca}$  (період напіврозпаду 163,5 доби); використовується як радіоактивний індикатор.

Серед геохімічних функцій живої речовини виокремлюють *кальцієву функцію*, яка притаманна усім організмам із кальцієвим скелетом. Такі організми викликають енергійне переміщення атомів Са з навколишнього середовища всередину свого тіла. Малорозчинні солі Са відіграють роль конструктивного матеріалу в організмах тварин і рослин. Мінеральною основою клітинних стінок рослин, панцерів молюсків, шкаралупи яєць слугує  $\text{CaCO}_3$ . Дрібні кристали гідроксилapatиту  $\text{Ca}_5[\text{OH}(\text{PO}_4)_3]$  – неорганічні складові скелету хребетних.

Кальцій бере активну участь у багатьох процесах ґрунтоутворення, а саме: входить до складу гумусу та ґрунтового поглинаючого комплексу, який відповідає за кислотність ґрунтів, визначає ємність поглинання ґрунту; цементує ґрунтові частинки, що спричиняє утворення водостійкої структури; впливає на розчинення або осадження оксидів Fe, Al, Mn, Si.

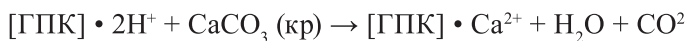
Біогеохімічному циклу Кальцію притаманна відносно висока здатність до міграції, яка залежить від особливостей клімату. У процесах вивітрювання Са вилужується з мінералів природними водами. При вивітрюванні гірських порід у зоні гіпергенезу руйнуються насамперед силікати Са. Утворення карбонатів, гідроксидів, фосфатів Са і Mg, зазвичай, відбувається на лужних геохімічних бар'єрах (тобто там, де виникає зміна кислих умов на лужні).

Загалом, для біогеохімічних циклів усіх лужних і лужноземельних металів характерна незамкнутість глобальних річних циклів. Результатом є інтенсивна акумуляція цих елементів в осадових породах Світового океану, де зосереджено до 99% Са, 98% К і понад 60% Na.

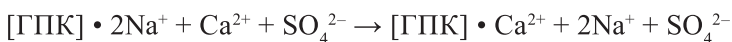
По відношенню до вивітрювання мінерали Са утворюють послідовність: плагіоклаз – кальцієвий авгіт – кальцієвий амфібол. У групі плагіоклазів субстанції, багаті на Са, вивітрюються швидше, ніж із Na. При цьому природні розчини, котрі енергійно видаляють Са, містять значні кількості  $\text{HCO}_3^-$ . У ґрунтах гумідних зон спостерігається значний дефіцит Са. Дуже мало його у корі вивітрювання, що пояснюється високою здатністю Са до міграції.

В йонному стоку з материків  $\text{Ca}^{2+}$  займає перше місце серед катіонів. Річками він виноситься переважно у вигляді карбонатів, сульфатів та бікарбонату у розчиненому стані. Геохімічна історія Са у Світовому океані пов'язана із карбонатною системою рівноваги, температурою води і діяльністю живих організмів.

Біогеохімічний цикл Са порушується техногенними чинниками. Зокрема, в будівництві широко використовуються вапняк, мармур, цемент, вапно;  $\text{CaCO}_3$  вносять у ґрунти з метою усунення їхньої підвищеної кислотності (вапнування); збиткову лужність усувають гіпсуванням. *Вапнування ґрунтів* основане на взаємодії  $\text{CaCO}_3$  із катіонами  $\text{H}^+$  ґрунтового поглинаючого комплексу (ГПК):



*Гіпсування* основане на внесення у ґрунт гіпсу  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

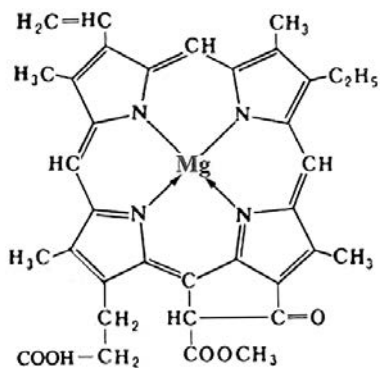


Кальцій, вилучений з ґрунту з урожаєм сільськогосподарських культур, перевозять з одних районів у інші, що також порушує його баланс біологічного колообігу.

## Біогеохімічний цикл Магнію (Mg)

Mg в природі поширений і становить 2,35% маси земної кори. Основними природними мінералами, до складу яких входить Mg, є: *карбонати* – магнезит  $MgCO_3$ , доломіт  $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ; *силікати* – олівін  $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$ ; серпантин  $3MgO \cdot Mg(OH)_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ ; азбест  $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ; *соли і подвійні соли* – бішофіт  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ; карналіт  $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ; кайніт  $KCl \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$ ; шеніт  $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$ .

Соли Mg надають гіркий присмак морській і річковій (озерній) воді. Mg – біофільний елемент, є обов'язковою складовою молекули хлорофілу (мал. 40), входить до складу рибосом та ін.



Мал. 40. Молекула хлорофілу

Основні характеристики Mg відображено у таблиці 4.11.

Mg виконує важливу роль в організмі людини. Йони  $Mg^{2+}$  залежно від концентрації блокують або забезпечують нервово-м'язову провідність, пригнічують дихальний центр, а також судиноруховий центр, завдяки чому знижують артеріальний тиск. Магній входить до складу багатьох ферментних систем, стимулює утворення білків, регулює зберігання і вивільнення АТФ та ін.

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Mg

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	12 ; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ , валентні електрони: $3s^2$
Масові числа природних ізотопів *	$^{24}\text{Mg}$ (78,6 %); $^{25}\text{Mg}$ (10–11 %); $^{26}\text{Mg}$ (11,29 %)
Відносна атомна маса (а.о.м).	24,3050
Ковалентний радіус атома, нм	0,136
Металічний радіус атома, нм	0,160
Радіус іона $E^{+2}$ , нм	0,074
Перший потенціал іонізації, В	7,6461
Відносна електронегативність	1,23
Ступені окиснення	+2
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	1,738
Температура плавлення, °С	651
Температура кипіння, °С	1107
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta H_{298}^0$ ), кДж/моль	147,79

\* крім того, ще штучно одержано радіоактивні ізотопи  $^{23}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Mg}$ ; останній з періодом напіврозпаду 21,2 год (використовується як індикатор).

В обмінних процесах Mg тісно взаємодіє із K, Na. У крові людини близько 50% Mg знаходиться у зв'язаному стані, а інша частина – в йонному.

Найближчим сусідом Mg у II(A) підгрупі періодичної системи є Ca, з яким Mg вступає в обмінні реакції. Ці два елементи легко витісняють один одного зі сполук. Дефіцит Mg у дієті, багатій на Ca, обумовлює затримку Ca в усіх тканинах.

Дефіцит Mg є найпоширенішим серед населення багатьох країн, зокрема США. Основні причини дефіциту Mg в організмі мають фізіологічну і медичну природу. Засвоєння Mg може порушуватися при надлишковому надходженні в організм Mn, Co, Pb, Ni, Cd, Ca.  $\text{MgSO}_4$  («англійська сіль») застосовується як безпечний, жовчогінний і проносний засіб. Особливо багато Mg в рослинах, оскільки він входить до складу молекул хлорофілу, які забезпечують реакції фотосинтезу.

За розмірами йон  $\text{Mg}^{2+}$  близький до йонів  $\text{Fe}^{2+}$  та  $\text{Ni}^{2+}$ , разом вони входять до складу олівінів та піроксенів, концентруються переважно в ультраосновних магматичних гірських породах. На відміну від інших лужноземельних і лужних металів Mg, завдяки малому розміру йонів, легко входить у

кристалічну решітку глинистих мінералів (вторинних силікатів), утворює вторинні магнезіальні алюмосилікати.

В гумідних ландшафтах Mg вилужується з ґрунтів. Тут діє декілька геохімічних бар'єрів. В аридних умовах на розподіл Mg впливає висока розчинність його хлоридів і сульфатів. У результаті спостерігається накопичення цих солей на випарних бар'єрах та формування солончаків.

Міграція Mg упродовж геологічної історії змінювалась. Після вивітрювання гірських порід Mg потрапляє у Світовий океан і масштаби цього надходження були особливо великі у минулому. Якщо у докембрійських вапняках міститься до 12,6% Mg, то в сучасних – тільки 1%. Утворення доломітів у відкритих морях припинилось ще у кінці палеозою. На сьогодні доломіти осаджуються тільки у деяких лагунах. За підрахунками В. Гольдшміда, упродовж геологічної історії з материків у океан надійшло 12,6 г Mg на кг води. Вміст Mg у водах сучасного океану становить всього 1,35 г. Такі відмінності обумовлені багаторазовою участю кожного атома Mg у великому геологічному колообігу, відкладанням доломітів та інших осадових порід із Mg.

Технофільність Mg значно нижча за Ca і Na. Якщо раніше використовувались лише доломіт і магнезит, то останні десятиліття широко використовуються сплави, що містять Mg. У бідних на Mg ландшафтах спостерігається незначне його накопичення завдяки внесенню мікродобрів із Mg та вапнування ґрунтів за допомогою доломіту.

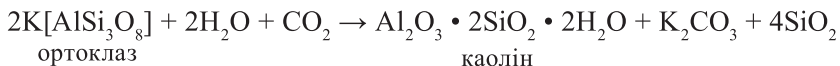
## **Біогеохімічні цикли Алюмінію (Al), Феруму (Fe), Мангану (Mn)**

Алюміній та Ферум є одними з найпоширеніш елементів, а кларк Мангану – 0,1 %.

**Алюміній.** Al – один з трьох найпоширеніших елементів земної кори (після O та Si); його кларк – 8,5%. КБП – 0,1-0,01. Найважливіші природні сполуки Al – алюмосилікати, боксит, криоліт ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ).

*Алюмосилікати* – силікати, до складу яких входить Алюміній. Вони становлять основну масу земної кори. Їх можна розглядати як солі, утворені оксидами Al, Si, лужних і лужноземельних металів:  $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$  (ортоклаз, або калієвий польовий шпат);  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$  (альбіт, або натрієвий польовий

шпат) та ін. Процес вивітрювання польового шпату з утворенням каоліну (головного складника білої глини), можна зобразити таким рівнянням:



Внаслідок вивітрювання гірських порід на планеті утворились поклади глини, піску і деяких солей.

Боксити – осадова гірська порода, яку утворюють переважно оксиди і гідроксиди алюмінію; містить від 32 до 60%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Саме з бокситів добувають алюміній.

Основні атомні та фізико-хімічні характеристики алюмінію (Al) представлено у табл. 4.12.

Al належить до незамінних для живого організму мікроелементів, хоча його біологічну роль не з'ясовано остаточно. Концентрується переважно у сироватці крові, легенях, печінці, кістках, нирках, оболонках нервових клітин головного мозку. В організмі відіграє опорну роль; приймає участь у побудові епітеліальної та сполучної тканин, що займають до 50% маси тіла; Al діє як інгібітор на низку ферментів.

Таблиця 4.12

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Al

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	13 ; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$ , валентні електрони: $3s^2 3p^1$
Масові числа природних ізотопів *	$^{27}\text{Al}$ (100 %)
Відносна атомна маса (а.о.м).	26,98139
Ковалентний радіус атома, нм	0,126
Металічний радіус атома, нм	0,143
Радіус іона $\text{E}^{+3}$ , нм	0,0535
Перший потенціал іонізації, В	5,9858
Відносна електронегативність	1,47
Ступені окиснення	+ 3
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	2,70
Температура плавлення, °С	660
Температура кипіння, °С	2452
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta\text{H}_{298}^0$ ), кДж/моль	324,9

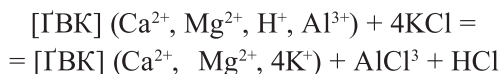
\* штучно одержано декілька ізотопів Al, серед яких  $^{36}\text{Al}$  використовується як мічений атом.

*Біогеохімічні особливості Алюмінію* визначаються такими факторами: 1) значною спорідненістю із киснем (у мінералах Al входить до оксигенових октаедрів і тетраедрів); 2) постійною валентністю (III), що робить міграцію Al менш залежною від окисно-відновних умов середовища; 3) слабкою розчинністю більшості природних сполук; 4) амфотерністю (яка обумовлює сильну залежність міграції від кислотно-лужних умов середовища).

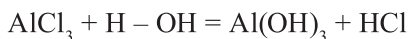
У біосфері Al – слабкий мігрант, його мало в живій речовині (в рослинах < 0,02%) і гідросфері ( $1 \cdot 10^{-6} \%$ ).

У вологому кліматі Al мігрує в ґрунтах і водах у вигляді орґано-мінеральних колоїдних сполук, оскільки після розкладання рослинної біомаси утворюється багато орґанічних кислот. Al адсорбується колоїдами, осаджується у нижній частині ґрунтів, що спричинює утворення елювіальних бокситів. Енергійна міґрація Al відбувається у вулканічних зонах, де кислі річкові та підземні води багаті на сполуки з Al. У місцях змішування кислих вод із лужними морськими (в гирлах річок та ін.) утворюється геохімічний бар'єр, де Al осаджується з утворенням бокситових родовищ. У степах і пустелях Al майже не міґрує, оскільки там живої речовини мало, а води нейтральні і лужні. У минулі геологічні епохи боксити накопичувалися також в озерах і прибережній зоні морів тропічних областей (прикладом слугують осадові боксити Казахстану). У біосфері існують орґанізми-концентратори Al – бактерії роду *Crenotrics*, які накопичують до 17% цього хімічного елемента.

Зв'язок  $Al^{3+}$  з ґрунтовими колоїдами (ГВК), а також катіони  $H^+$  обумовлюють потенційну обмінну кислотність ґрунту, яка виявляється за обробки ґрунту розчином нейтральної солі (KCl):



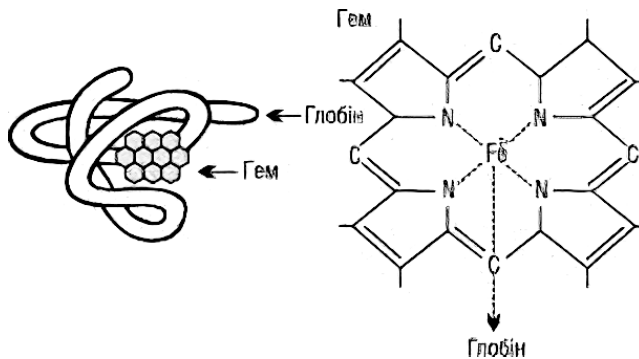
Сіль  $\text{AlCl}_3$  у водному розчині гідролізується:



Отже, в результаті взаємодії сольового розчину з ґрунтом та гідролізу  $\text{AlCl}_3$  утворюється HCl, яка характеризує потенційну обмінну кислотність ґрунту.

**Ферум.** За поширеністю Fe займає друге місце після Al серед металів і четверте (O, Si, Al, Fe) серед усіх елементів земної кори, де кларк Fe 5,1%. Величезні кількості Fe знаходяться в ядрі Землі. Основні природні сполуки Fe: Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (магнетит, або магнітний залізняк); Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (гематит, або червоний залізняк; його найпотужніше родовище в Україні – Криворізьке); 2Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> • 3H<sub>2</sub>O (лімоніт, або бурий залізняк; велике родовище – Керченське). Крім того, природними покладами цього елемента є FeCO<sub>3</sub> (сидерит, або залізний шпат), FeS<sub>2</sub> (пірит, або залізний колчедан), FeS (магнітний колчедан), FeTiO<sub>3</sub> (ільменіт).

Fe бере участь в утворенні гемоглобіну (мал. 41); входить до складу дихальних ферментів цитохромів, каталази, пероксидази та ін. Нестача Fe у живленні рослин призводить до виникнення хлорозу.



Мал. 41. Молекула гемоглобіну.

Біогеохімічний цикл Феруму залежить від умов зволоження, реакції середовища та ін. При руйнуванні феросилікатів кори вивітрювання Fe потрапляє у природні води. У ґрунтах Fe звичайно перебуває у малорухомих формах і тому, з погляду геохімії, не переноситься на далекі відстані. У багатьох ґрунтах гумідного клімату Fe акумулюється в ілювіальних горизонтах у вигляді FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Fe(OH)<sub>2</sub> + Fe(OH)<sub>3</sub> або конкрецій у будь-якому горизонті. Хімічно найбільш активна колоїдна форма Ферум(III) гідроксиду, що обумовлюється її здатністю багаторазово змінювати ступінь дисперсності (переходити із гелю в золь, і навпаки). Основні атомні та фізико-хімічні особливості Феруму відображено в табл. 4.13.



Ферум часто змінює свою валентність, а тому бере участь в окисно-відновних реакціях у біосфері. Fe разом з Mn (а також O та H) формує окислювально-відновний режим ґрунтів. З ґрунту Fe надходить до рослин у вигляді  $Fe^{2+}$  координаційних сполук (хелатів). Доступність Fe для рослин залежить від рН середовища, наявності в ґрунті Ca, Cu, Mn, умов зволоження, наявності симбіотичної мікрофлори. Міграція Fe здійснюється у складі живої речовини, гумусових кислот чи хелатів. Після відмирання організмів та їхньої мінералізації частина Fe повертається в ґрунт, інша – в природні води. У ґрунті Fe знову залучається у новий біогеохімічний цикл.

Таблиця 4.13

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Fe

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	26 ; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$ , валентні неспарені d-електрони: $4s^2 3d^6$
Масові числа природних ізотопів *	$^{54}Fe$ (5,84 %); $^{56}Fe$ (91,68 %); $^{57}Fe$ (2,17 %); $^{58}Fe$ (0,31 %)
Відносна атомна маса (а.о.м).	55,847
Ковалентний радіус атома, нм	0,117
Металічний радіус атома, нм	0,126
Радіус іона $E^{+2}$ , нм $E^{+3}$	0,078 0,0658
Перший потенціал іонізації, В	7,893
Відносна електронегативність	1,64
Ступені окиснення	+1, +2, +3, +4, +6
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	7,874
Температура плавлення, °С	1539
Температура кипіння, °С	3200
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta H_{298}^\circ$ ), кДж/моль	418,0

\* штучно одержано ще ізотопи  $^{55}Fe$  і  $^{59}Fe$  (період напіврозпаду 2,94 роки і 45,1 доби відповідно); використовується як радіоактивні індикатори.

Безпосереднє накопичення Fe у значних кількостях характерне лише для небагатьох організмів. У цьому відношенні унікальні залізобактерії, що окиснюють сполуки  $Fe^{2+}$  з подальшим утворенням лімоніту. Значний внесок у вивчення залізобактерій зробив український фізіолог рослин і мікробіолог Микола Григорович Холодний (1882–1953). Здатні засвоювати Fe з нерозчинних колоїдів також діатомові водорості. Крім того, Ферум

споживає зоопланктон, що має гемоглобін у крові (дрібні рачки). При загибелі цих організмів, розчиненні детритових частин, певна кількість Fe переходить у розчин у вигляді гідратів та інших форм.

**Манган.** Вміст Mn в земній корі 0,1%; КБП – 0,1 – 100. У вільному вигляді цей метал в природі не зустрічається. Основні природні сполуки Mn :  $MnO_2$  (піролюзит),  $Mn_3O_4$  (гаусманіт),  $3Mn_2O_3 \cdot MnSiO_3$  (брауніт),  $[Mn, Fe(II)]_2O_3$  (біксбіт),  $MnCO_3$  (родохрозит), MnS (марганцевий колчедан). Атомні та фізико-хімічні характеристики Mn відображено у табл. 4.14.

Таблиця 4.14

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Mn

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	25 ; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^2$ , валентні електрони: $3d^5 4s^2$
Масові числа природних ізотопів *	$^{55}Mn$ (100 %)
Відносна атомна маса (а.о.м).	54,93805
Ковалентний радіус атома, нм	0,117
Металічний радіус атома, нм	0,132
Радіус іона $E^{+2}$ , нм	0,083
$E^{+3}$	0,065
$E^{+4}$	0,053
$E^{+7}$	0,046
Перший потенціал іонізації, В	7,435
Відносна електронегативність	1,60
Ступені окиснення	+2, +3, +4, +6, +7
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	7,44
Температура плавлення, °С	1244
Температура кипіння, °С	2080
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta H_{298}^\circ$ ), кДж/моль	279,3

\* штучно одержано ізотопи  $^{52}Mn$  і  $^{56}Mn$  (період напіврозпаду 5,72 доби і 2,567 год відповідно); використовується як радіоактивні індикатори.

Mn входить до складу багатьох ферментів, активізує утворення хлорофілу, бере участь у процесах фотосинтезу, дихання, нітрогенного, фітогормонального та нуклеїнового обмінів. Манган впливає на діяльність залоз внутрішньої секреції: за його нестачі пригнічується функція гормонів гіпофіза. Надмірна кількість сполук Mn отруйна для живих організмів.

Біологічна роль Mn в окисно-відновних реакціях живих організмів обумовлена тим, що: Mn має властивість утворювати комплекси з оксигено- та нітрогеновмісними лігандами; виявляє різний ступінь окиснення (див. табл. 4.14).

Біогеохімічний цикл Мангану (так само як і Fe) значною мірою залежить від умов зволоження, реакції середовища, ступеня аерації ґрунту, умов розкладання органічної речовини. Цикл повного біологічного колообігу Mn пов'язаний із перетворенням за схемою:  $Mn^{2+} - Mn^{4+} - Mn^{2+}$ .

Mn бере участь у процесах ґрунтоутворення: синтезу гумусу, глиноутворення, оглеєнні; утворенні ілювіальних горизонтів, гідрогенної акумуляції конкрецій. У цих процесах Mn поглинається, але при опідзоленні та осолодінні – виноситься з ґрунту. Кислі ґрунти сприяють утворенню фосфатів Mn, нейтральні та слабо лужні – важкорозчинних сполук Mn. В ґрунтах  $MnO_2$  має негативний заряд, тому зв'язує катіони і осаджується у вигляді гелю разом із Fe та Al.

Разом з Fe Mn активно залучається у біогеохімічний колообіг. Ґрунтові горизонти із підвищеним вмістом Fe (особливо ілювіальні) також містять підвищену кількість Mn. Манган мігрує активніше, оскільки значення рН, за якого випадає у осад його гідроксид, вище, ніж для Fe. Рослинам більш доступний  $Mn^{2+}$  у перегнійних горизонтах ґрунту.

Міграція Fe і Mn можлива також у складі живої речовини. Після відмирання організмів та їхньої мінералізації частина елементів закріплюється у ґрунті, інша – надходить у природні води. Після повернення в ґрунт біогеохімічний цикл починається знову.

## Біогеохімічний цикл Купруму (Cu)

*Купрум* (Cu). Кларк у літосфері – 0,01 %. Найважливіші природні сполуки Cu:  $Cu_2S$  (халькозин),  $CuFeS_2$  (халькопірит),  $Cu_2FeS_4$  (борніт), CuS (ковелін), CuO (тенорит),  $Cu_2O$  (куприт),  $Cu_2(OH)_2CO_3$  (малахіт). Зустрічається мідь у вигляді самородків.

Основні атомні та фізико-хімічні характеристики хімічного елементу Cu представлено у табл. 4.15. Радіус атома Cu (елемента І В) майже удвічі менший, ніж радіуси Na і K (елементів І А), що пояснює високий показ-

ник потенціалу іонізації Cu, а також меншу відновлювальну здатність у порівнянні з лужними металами.

Купрум є життєво важливим мікроелементом: входить до складу багатьох вітамінів, гормонів, ферментів, дихальних пігментів, приймає участь у процесах обміну речовин, у тканинному диханні, синтезі гемоглобіну, підтримці нормальної структури кісток, хрящів, сухожилів (колаген), еластичності стінок кровоносних судин, легневих альвеол, шкіри (еластин). Cu використовується у лікуванні і профілактиці захворювань опорно-рухового апарата, гіпотіреозу.

Таблиця 4.15

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Cu

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	29; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$ валентні електрони знаходяться на $4s^1 3d^{10}$ підрівнях
Масові числа природних ізотопів *	$^{63}\text{Cu}$ (69,1%); $^{65}\text{Cu}$ (30,9%)
Відносна атомна маса (а.о.м).	63,546
Ковалентний радіус атома, нм	0,117
Металічний радіус атома, нм	0,128
Радіус іона $\text{E}^+$ , нм	0,077
$\text{E}^{+2}$	0,073
$\text{E}^{+3}$	0,054
Перший потенціал іонізації, В	7,7264
Відносна електронегативність	1,75
Ступені окиснення	+1, +2, +3
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	8,96
Температура плавлення, °С	1083,6
Температура кипіння, °С	2567
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta H_{298}^{\circ}$ ), кДж/моль	339,5

\* штучно одержано ізотопи  $^{61}\text{Cu}$  і  $^{64}\text{Cu}$ , які використовуються як радіоактивні індикатори.

Оптимальна добова потреба дорослої людини складає 2–3 мг Cu. Багаті на Cu морепродукти, шоколад, какао, авокадо, печінка. Зниженню засвоєння Cu сприяють Fe, Mn, Cd, антоціани, таніни, аскорбінова кислота. Дефіцит Cu може викликати посилений прийом Mo і Zn.

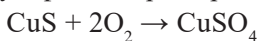
У рослин при нестачі Cu з'являється сухoverхість плодoвих дерев (екзантема) і т.з. «біла чума» – характерне побіління кінчиків листків, пригніченням формування зернівок у злакових. Надлишок Cu у ґрунтах негативно впливає на організм людини і тварин, оскільки у великих дозах цей хімічний елемент має отруйну дію і використовується як фунгіцид і бактерицид.

Серед представників тваринного світу найбільше Cu містять восьминоги, каракатиці, устриці та деякі інші молюски і членистоногі. Кров ракоподібних і головоногих містить дихальний пігмент – гемоціанін, до складу якого входить Cu (0,33–0,38%), – відіграє ту саму роль, що Fe в гемоглобіні. При сполученні з киснем повітря безбарвний гемоціанін Cu(I) перетворюється на блакитний Cu(II) (тому у молюсків «блакитна кров»). Після віддавання кисню гемоціанін знову знебарвлюється.

У тайгових та інших ландшафтах вологого клімату Cu відносно легко вилугується з кислих ґрунтів, що призводить до дефіциту цього елемента і виникнення ендемічних захворювань рослин і тварин (особливо на пісках і торфовищах). У степах і пустелях (із характерними для них слаболужними розчинами) Cu малорухомиий; на ділянках родовищ Купруму спостерігається його надлишок в ґрунтах і рослинах, що спричинює хвороби домашніх тварин. У ґрунтах Cu міститься у вигляді солей та комплексних металорганічних сполук у водорозчинній формі, обмінній і поглинутій колоїдами. У річcovій воді Cu мало –  $1 \cdot 10^{-7}$  %. Разом зі стоком Cu переноситься у Світовий океан, де відносно швидко переходить у морський мул. Тому глини і сланці відносно збагачені Cu ( $2 \cdot 10^{-3}$  %), а морська вода бідна на Cu ( $2 \cdot 10^{-6}$  %).

У морях минулих геологічних епох місцями відбувалось значне накопичення Cu в мулах, що спричинило утворення родовищ (зокрема, Мансфельд в Німеччині). Cu енергійно мігрує також у підземних водах біосфери, з цими процесами пов'язано накопичення руд Cu в піщаниках.

У природі існують специфічні тіонові бактерії *Thio bacillus ferrooxidans*, які окиснюють нерозчинні сульфідни і перетворюють їх на розчинні за схемою:



Таке явище одержало назву «бактеріальне вилужування» – вибіркoве добування хімічних елементів (S, Cu, U) з багатокoмпонентних сполук шляхом їхнього розчинення мікроорганізмами у водному середовищі. Такі мікроорганізми використовують також для переробки відвалів.

## Біогеохімічний цикл Цинку (Zn)

Кларк Zn у літосфері  $5 \cdot 10^{-3} \%$ , КПБ – 10. Найважливіші природні сполуки: ZnS (сфалерит, цинкова обманка), ZnCO<sub>3</sub> (галомей), ZnO (цинкіт).

Цинк (Zn) відноситься до групи незамінних мікроелементів. У висушеній рослині вміст Zn 15–70 мг/кг (найбільше в насінні), в організмах тварин – 30–90 мг/кг (найбільше у волоссі, м'язовій тканині, клітках крові, шкірі, передміхуровій залозі, спермі). Zn входить до складу понад 40 ферментних систем, гормонів (інсуліну), еритроцитів, за фізіологічною дією наближається до Fe. Добова оптимальна потреба для дорослої людини 10–15 мг. Дефіцит Zn може розвиватися при недостатньому надходженні цього елемента в організм (1 мг/день і менше), а поріг токсичності становить 600 мг/день. Функціональними антагоністами Zn є Cu, Cd, Pb, особливо на фоні дефіциту білка. Cd здатний витіснити Zn з організму. Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Цинку наведено в таблиці 4.16.

Потреба рослин у Zn зростає із підвищенням інтенсивності освітлення. У сільському господарстві застосовують цинкові добрива – 45,5% ZnSO<sub>4</sub> (норма внесення – 0,3 мг/кг сухого ґрунту). У ґрунтах Zn може накопичуватися біогенним шляхом. Відомі організми-концентратори Zn; на його родовищах росте особлива «галмейна флора» (фіалка). Вміст Zn в ґрунтах залежить від характеру материнських порід, вмісту органічної речовини, текстури ґрунту, вологості, рН. Характерний склад породи – це основний фактор, який визначає вміст Zn в ґрунтах. Ґрунти після вивітрювання основних порід завжди вміщують більше Zn, ніж розвинені на гранітах, гнейсах. Ґрунти на пісках, підзолисті, ті, що промиваються водою, латеральні – втрачають Zn швидше, ніж ґрунти, які збагачені глинистим матеріалом і мають високий процент тонкої фракції. Зокрема, Zn дуже погано вилучається водою і слабкими розчинами з глинистих ґрунтів з великою кількістю тонкої фракції і добре в таких ґрунтах фіксується.

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Zn

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	30 ; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$ , валентні електрони: $4s^2$
Масові числа природних ізотопів *	$^{64}\text{Zn}$ (48,89 %); $^{66}\text{Zn}$ (28,81 %); $^{67}\text{Zn}$ (2,07 %); $^{68}\text{Zn}$ (18,61 %); $^{70}\text{Zn}$ (0,89 %)
Відносна атомна маса (а.о.м).	65,39
Ковалентний радіус атома, нм	0,125
Металічний радіус атома, нм	0,138
Радіус іона $E^{+2}$ , нм	0,074
Перший потенціал іонізації, В	9,3941
Відносна електронегативність	7,133
Ступені окиснення	+ 2
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	2,70
Температура плавлення, °С	419,73
Температура кипіння, °С	907
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta H_{298}^0$ ), кДж/моль	130,5

\* штучно одержано дев'ять ізотопів Zn, серед яких  $^{65}\text{Zn}$  використовується як радіоактивний індикатор (період напіврозпаду 245 діб).

В ґрунтах розрізняють Zn нерозчинний і розчинний. При кислому руйнуванні порід частина Цинку відходить з розчинами (наприклад, при руйнуванні гранітів); протилежний процес спостерігається при вапнуванні, з яким він частково осаджується (вапнякові ґрунти фіксують Zn).

Отже, вилучення Zn з ґрунтів залежить від реакції ґрунту, лужні розчини зовсім не вилучають Zn. Чим більш кислий розчин, тим більше вилучається Zn із ґрунту, особливо це характерно для гумусового горизонту. Zn легко вилучається водою і слабо кислими розчинами і легко засвоюється рослинами.

Вміст Zn в ґрунтах в середньому у два рази вищий, ніж вміст Cu і значно підвищується в гумусових горизонтах (для таких ґрунтів характерний найбільший вміст). Вміст органічної речовини в ґрунтах безпосередньо пов'язаний із загальним вмістом елемента: чим більше органічної речовини в даному горизонті, тим більший вміст Zn (органічна речовина утримує цей

хімічний елемент). Велике значення тут має характер органічної речовини (зокрема, присутність гумінової кислоти). Мікрофлора ґрунтів потребує наявності Zn і поглинає його.

У біосфері Zn активно мігрує з поверхневими і підземними водами, де його вміст звичайно  $n - 10^{-5}$  г/л. У кислих кисневих і глейових водах багато водорозчинних сполук Zn, особливо  $ZnSO_4$ , а також  $Zn(HCO_3)_2$ .

Zn енергійно мігрує в гідротермах, де він утворює різні комплекси і осаджується разом з Pb, Ag та іншими халькофілами, з подальшим утворенням різних сульфідів (поліметалічних руд). Низькотемпературні страти фіковані Pb та Zn родовища у вапняках деякі дослідники вважають осадовими або гідротермально-осадовими.  $Zn(OH)_2$  випадає в осад при  $pH = 6,8$ , тому Zn малорухомий у нейтральних і слаболужних розчинах;  $ZnCO_3$  – малорозчинна сіль. При підвищенні pH Цинк знову переходить у розчин в результаті утворення розчинних гідроксоцинкатів  $Na_2[Zn(OH)_4]$ :



У сірчано-водневому середовищі Zn утворює практично нерозчинний сульфід. При нагріванні сполука  $Na_2[Zn(OH)_4]$  втрачає воду, переходить у сіль цинкової кислоти  $Na_2ZnO_2$  (з класу цинкатів –  $Me_2ZnO_2$ ). У ландшафтах вологого клімату Zn активно мігрує у бікарбонатній, або органо-мінеральній, формі і частково виноситься з них.

В аридних ландшафтах Zn менш рухомий, тут можливе його слабе випарне концентрування на геохімічному бар'єрі в солоних озерах і солончаках. У чорноземних ґрунтах рухливість Цинку пов'язана з формою з'єднання і pH середовища. Нерухомість Zn спостерігається при високих значеннях pH (в лужних ґрунтах, які збагачені на  $CaCO_3$ ), підвищена рухливість – у кислих ґрунтах ( $pH < 5$ ).

До підвищеного вмісту Zn в ґрунтах призводять техногенні аномалії, пов'язані зі збільшенням промислових зон і кількості автомагістралей. Тут спостерігаються широкі коливання концентрації Zn – у 2–16 разів вище фонового (у поодиноких випадках досягають 50 фонових значень).



## Біогеохімічний цикл Йоду (I)

Хімічний елемент I зустрічається скрізь на Землі, але у дуже незначних кількостях і тільки у вигляді сполук (з Na, K, Mg). Кларк I у літосфері  $4 \cdot 10^{-5} \%$ .

Основні атомні та фізико-хімічні характеристики хімічного елементу I представлено у табл. 4. 17.

Таблиця 4.17

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики I

Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	53 ; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^5 5d^0$ , валентні електрони: $5s^2 5p^5$
Масові числа природних ізотопів *	$^{127}\text{I}$ (100 %)
Відносна атомна маса (а.о.м).	126,9045
Ковалентний радіус атома, нм	0,133
Металічний радіус атома, нм	3,08
Радіус іона $\text{E}^-$ , нм $\text{E}^{+7}$	0,220 0,053
Перший потенціал іонізації, В	10,4514
Відносна електронегативність	1,47
Ступені окиснення	-1, +1, +3, +5, +7
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	4,93 (тв.)
Температура плавлення, °С	113,7
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta H_{298}^0$ ), кДж/моль	106,69

\* штучно одержано ще 17 ізотопів I, які використовуються як радіоактивні індикатори.

Найважливіші природні сполуки:  $\text{KIO}_3$ ,  $\text{KIO}_4$ ,  $\text{NaIO}_3$ ,  $\text{NaIO}_4$  (присутні у покладах селітри в Чілі). Основним резервуаром Йоду є гідросфера – Світовий океан. В океанічну і морську воду Йод може потрапляти внаслідок дегазації мантії Землі та під час підводного виверження вулканів. Виділення Йоду відбувається у вигляді легкої сполуки  $\text{HI}$ . У морській воді частина йодид-іонів ( $\text{I}^-$ ) окиснюється до йодат-іонів ( $\text{IO}_3^-$ ) і в незначній кількості – до молекулярного Йоду ( $\text{I}_2$ ) (П. Білоножка, 2018).

Середній вміст Йоду в морській воді –  $5 \cdot 10^{-6} \%$ . Із морської води I поглинають усі живі організми. Вміст Йоду в морських організмах

коливається межах від  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $6 \cdot 10^{-5} \%$ , деякі з них концентрують I в сотні–тисячі разів більше, що є однією з функцій живої речовини. Найбільшими концентраторами Йоду є морські водорості, губки, корали. Зокрема, вміст Йоду в скелетному утворенні губок спонгії – до 8,5%; в одній тонні висушеної «морської капусти» – ламінарії міститься до 5 кг I. Наземні рослини бідніші на Йод, ніж морські. Вони добувають мікроелементи з ґрунту, ґрунтових вод і повітря (О. Виноградов, 1939; А. Кудельський, 1976; П. Білоножко, 2018).

Поглинання Йоду рослинами залежить від вмісту в ґрунтах його сполук і виду рослин. Міграція Йоду відбувається найбільш ефективно за участі живої речовини та морського повітря. Головний геохімічний бар'єр для Йоду – біогеохімічний, меншу роль відіграють сорбційний та випарний бар'єри. Для Йоду характерне біогенне накопичення у деяких ґрунтах і мулах, випарна концентрація у солоних озерах і солончаках.

Концентрація Йоду в морських мулах у тисячі разів більша, ж у морській воді. Наприклад, у мулах Каспійського, Чорного, Азовського, Карського, Баренцового й Охотського морів вміст Йоду коливається в межах  $1 \cdot 10^{-3}$  –  $3 \cdot 10^{-2} \%$  (О. Виноградов, 1939, 1958). Результати досліджень Г. Павлової і О. Шишкіної (1973, 1979) показали – концентрація Йоду в осадах Тихого океану зменшується вниз по розрізу, а його кількість у муловій (поровій) воді зростає.

Для вивчення процесу збагачення мулів Йодом О. Виноградов провів дослідження: у відібрану пробу свіжого мулу разом з морською водою додавав розчин KI; після ретельного змішування і тривалого відстоювання проводив декантацію і визначав вміст Йоду в мулі. Виявлено, що майже весь Йод із водного розчину поглинався мулом. Отже, є підстави стверджувати, що під час розкладу розсіяної органічної речовини, яка міститься в мулах і осадових породах, Йод виділяється з них і переходить спочатку в мулові, а потім у підземні води. Зазначимо, що вміст Йоду у підземних бурових (супутніх) водах нафтових свердловин може сягати 100 мг/л.

Підвищений вміст Йоду в підземних водах, в осадових товщах порід геологи використовують для прогнозування перспектив нафтогазоносності (О. Виноградов, 1958; А. Кудельський, 1976; П. Білоножко, 2018). Ці дані дають підстави зробити важливий висновок: Йод у підземних водах

нафтоносних басейнів, а також оптичнв ізомерія вуглеводнів нафти (див. підрозділ 3.2) є показником органічного походження нафти.

Йод – життєво необхідний для тварин і людини мікроелемент. У тваринний організм Йод надходить разом із їжею, водою, повітрям. У нормі міститься в організмі людини у кількості 20 – 25 мг (з них 15 мг у щитоподібній залозі, решта – у м'язах, шкірі, кістках, печінці, нирках, головному мозку, крові та ін.). За допомогою радіоактивного Йоду ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ) показано, що у щитоподібній залозі Йод накопичується в мітохондріях епітеліальних клітин. Постійна концентрація Йоду в крові людини ( $1 \cdot 10^{-5}$  –  $1 \cdot 10^{-4}$  %) вважається «йодним дзеркалом» крові. Йод надходить в організм з їжею і водою. Добова потреба організму в Йоді складає 0,15 – 0,2 мг, хоча вона залежить від фізіологічного стану організму, пори року, температури, адаптації організму до вмісту Йоду в середовищі. Антагоністами Йоду є надлишкові кількості Ca, Cl, Co, Mn, Pb, Br, F.

У ґрунтах і рослинах тайгово-лісової нечорноземної, сухостепової, пустельної і гірських біогеохімічних зон Йод міститься у недостатній кількості або його кількість незбалансована з деякими іншими мікроелементами (Ca, Mn, Cu), що є причиною поширення в цих зонах ендемічного зоба.

У різних біогеохімічних провінціях вміст Йоду у добовому раціоні коливається (для людини – від 20 до 240 мкг, для вівці – від 20 до 400 мкг). Потреба тварини в Йоді залежить від її фізіологічного стану, пори року, температури, адаптації організму до вмісту Йоду у навколишньому природному середовищі.

Основна біологічна роль Йоду – участь у синтезі гормону щитоподібної залози – тироксину; Йод є його обов'язковим структурним і функціональним компонентом. Основні функції Йоду в організмі: регуляція температури тіла, білкового, ліпідного, водно-електролітного обміну; диференціювання тканин, процесів росту і розвитку, у т. ч. нервово-психічного організму, індукція підвищення споживання кисню тканинами; обмін деяких вітамінів.

Основні прояви дефіциту Йоду: збільшення вироблення і виділення гормонів щитоподібної залози, формування ендемічного зобу, гіпотиреоз (нервово-психічні розлади, в'ялість), сонливість, набряки кінцівок і тулуба; закрепи; глухонімота, паралічі; зниження інтелектуального рівня.

Основні прояви надлишку Йоду (*йодизму*): розвиток гіпертиреозу, тиреотоксикозу; зменшення ваги; головні болі, утом, слабкість, депресія; оніміння і пощипування шкіри, висипка, вугрі; розвиток асептичного запалення (йодизм) слизових оболонок у місцях виділення Йоду.

Нестача Йоду залишається одним із найбільш поширених мінеральних дефіцитів у світі, від якого страждає понад 1 млрд людей. Відповідно до рекомендацій Всесвітньої організації здоров'я (ВОЗ), у світі застосовуються чотири методи профілактики йододефіцитних захворювань: йодування кухонної солі із використанням KI або  $KIO_3$  (40 мкг Йоду в 1 г NaCl), хліба, олії, молока та споживання збагачених Йодом біологічних добавок до їжі.

Українські виробники випускають пігулки йодиду калію (KI) з дозуванням 250 мг чи 125 мг. При ядерній катастрофі KI дозволяє запобігти поглинанню організмом людини радіоактивного. Дорослі та діти, старші двох років – одна таблетка дозуванням 125 мг або половина таблетки 250 мг Йоду. Від радіації препарат не захищає. Приймати пігулки просто «для профілактики» не можна.

## Біогеохімічний цикл Силіцію (Si)

Силіцій (Si) є другим за поширеністю (після O) хімічним елементом у земній корі. Кларк Si у земній корі 27,7%, ґрунті – 31%, океані –  $3 \cdot 10^{-5}$  %. У вільному стані Si у природі не зустрічається. Найпоширеніші його сполуки:  $SiO_2$  (кремнезем, пісок, кварц, яшма, опал, трепел, діатоміт та ін.); Na, K, Ba [ $AlSi_3O_8$ ] (польові шпати); солі кремнієвих кислот – силікати.

Крім того,  $SiO_2$  у невеликих кількостях міститься в усіх рослинах (у межах 0,15%) і тваринах (0,001%); входить до складу мембран клітин. Основні атомні та фізико-хімічні характеристики представлено у табл. 4.18.

Фізіологічну роль Si остаточно не з'ясовано, але жоден організм у біосфері не може існувати без цього елементу (на це вказував ще В. Вернадський). Кларк Si в людському організмі  $1 \cdot 10^{-3}$  %; найбільше Si міститься у м'язах, нігтях, зубах, волоссі, печінці, наднирниках, кришталику ока. В організм людини Si потрапляє із їжею та через легені у вигляді  $SiO_2$ .

### Основні атомні та фізико-хімічні характеристики Si

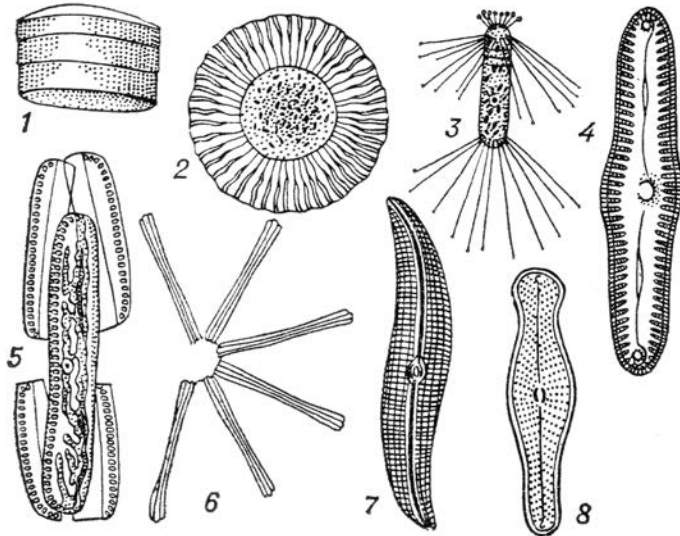
Порядковий номер; електронна конфігурація атомів у основному стані	14 ; $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ , валентні електрони: $3s^2 3p^2$
Масові числа природних ізотопів*	$^{28}\text{Si}$ (92,27 %); $^{29}\text{Si}$ (4,68 %); $^{30}\text{Si}$ (3,05 %)
Відносна атомна маса (а.о.м).	28,0855
Ковалентний радіус атома, нм	0,117
Металічний радіус атома, нм	0,134
Радіус іона $\text{E}^{+4}$ , нм	0,040
Перший потенціал іонізації, В	8,1517
Відносна електронегативність	1,74
Ступені окиснення	+1, +2, +3, +4
Густина ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup> (293 К)	2,328
Температура плавлення, °С	1415
Температура кипіння, °С	3250
Стандартна ентальпія атомізації елементів ( $\Delta H_{298}^\circ$ ), кДж/моль	468,9

\* штучно одержано три ізотопи цього елемента, у тому числі  $^{31}\text{Si}$ , який використовується як радіоактивний індикатор.

Si і його сполуки впливають на формування і нормальне функціонування епітеліальної та сполучної тканин, надають їм міцності та еластичності. Сполуки Si запобігають проникненню ліпідів у плазму крові та їх відкладанню на стінках судин. Виникнення багатьох патологічних процесів в організмі пов'язують з порушенням обміну Si, а саме: гіпертонії, ревматизму, виразки шлунку, гепатиту, деяких захворювань шкіри, кісток та ін.). Результатом надлишкового впливу аерозолів кремнезему на організм людини і тварин може бути розвиток захворювання силікоз.

Біогеохімічний колообіг Силіцію вивчений недостатньо. Хімічний зв'язок Si з O виключно міцний і майже не порушується. Тому біогеохімія Si – це переважно біогеохімія кремнезему ( $\text{SiO}_2$ ). Процес вивітрювання природних силікатів супроводжується утворенням каоліну (глини), піску і деяких солей. З порід, що піддаються вивітрюванню,  $\text{SiO}_2$  виноситься у вигляді істинного чи колоїдного розчину. При температурі 20 °С і рН 8–9 вміст кремнезему у водах озер і річок не перевищує 10 – 20 мг/л (тобто  $\text{SiO}_2$  наявний у вигляді ненасиченого розчину). Це пояснюють постійним

поглинанням Si з води живими організмами-концентраторами (діатомовими водоростями, кремнієвими губками, радіоляріями) (мал. 42). Організми засвоюють розчинений у воді кремнезем і насичують ним рослинні клітинні стінки, у тварини він є будівельним матеріалом екзоскелетів, спікул.



**Мал. 42.** Діатомові водорості (діатомеї – розділені навпіл) – велика група (близько 20 тис. видів) кремнієвих, мікроскопічних (0,75–1500 мкм), одноклітинних, одиничних або колоніальних форм мікроорганізмів: 1 – *Ethmodiscus gazellae*; 2 – *Planktoniella sol*; 3 – *Corethron valdiviae*; 4 – *Pinularia viridis*; 5 – *Surirella saxonica*; 6 – *Asterionella gracillima*; 7 – *Pleurosigma attenuatum*; 8 – *Didymosphenia gemina*.

Ще наприкінці ст. Д. Мюррей, Р. Ірвін з'ясували, що діатомові водорості живуть у морській воді, у якій вміст Si дуже низький і його не вистачає для їхнього життя. Вони висловили припущення, що діатомові водорості рокладають глини, які містяться в морській воді, і добувають з них Si. Висловлені здогадки пізніше Р. Ірвін підтвердив експериментальними дослідженнями, у ході яких виявив, що діатомові (*Navicula sp.*) успішно розвиваються у воді, яка не має кремнію, однак містить осади глин. Ці нові дані привернули увагу вчених (П. Білоніжко, 2018). В. Вернадський дійшов висновку, що така особлива здатність мікроорганізмів розкладати силікати відіграє важливу роль у хімії моря, хімії земної кори.

При магматичних процесах Si диференціюється слабо, він накопичується у кислих породах – граїноїдах. При високих температурах і тиску розчинність кремнезему підвищується і можлива його міграція із водяною парою.

У Світовому океані основна частина кремнезему (90 – 99%) залучена у постійний біологічний колообіг, але 1 – 10% вибуває з нього у вигляді донних відкладень. У прісних водоймах, навпаки, тільки незначна частина  $\text{SiO}_2$  залучається у біологічний колообіг, відбувається донне нагромадження кремнезему біогенного.

Перетворення кремнистих мулів на породу відбувається у геологічному часі за схемою: біогенний гель кремнезему – опал ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) – порцеланіт (неупорядкований кристобаліт) – халцедон – вторинний кварц. Поява масових скупчень кремнезему в морських та океанічних осадах пов'язана з кліматичними умовами певних геологічних епох, а також із регіональним прогріванням верхніх частин земної кори. При сполученні з гідроксидами Fe і Al кремнезем утворює вторинні глинисті матеріали (каоолініт, нонтроніт та ін.).

Грунтовий  $\text{SiO}_2$  теж активно залучається організмами у біологічний колообіг. На континенті колообіг Si пов'язаний з ландшафтно-геохімічними умовами: видовим складом рослинності, літологією відкладень, кліматом. Рухомість кремнезему у ґрунтових водах зростає зі збільшенням рН середовища (у лужному інтервалі). Зокрема, концентрація кремнезему при рН = 10 – 11 може досягати 200 мг/л. Підвищення температури також збільшує розчинність аморфного кремнезему. Наявність сульфатів, бікарбонатів, карбонатів Mg і Ca знижує розчинність кремнезему і викликає його осадження. У ґрунтах  $\text{SiO}_2$  перебуває в різних формах: кристалічній, аморфній, колоїдній, а також у вигляді біолітів – кремнійорганічних мінералів, що утворюються всередині рослин.

Утворення біолітів рослинами є потужним механізмом, що приводить в дію біогеохімічний колообіг Si на суходолі. Найбільше біолітів кремнезему накопичують злакові, хвощі, лишайники, мохи, осокові, ковила, голки хвойних (зокрема, хвойні ліси є потужним природним механізмом, що перекачує маси кремнезему гірських порід, ґрунтів, природних вод і знову повертає його в ландшафт у формі біолітів), листя і кора дуба, мінеральні

скелети діатомових водоростей. Si міститься у пір'ї птахів, шерсті тварин, волоссі людини та ін. Частина біолітів осаджується хемогенним шляхом за рахунок коагуляції у вигляді опалу з подальшим утворенням халцедону та кварцу. Інша частина силіцієвих біолітів залучається до активної міграції в ґрунтових водах у формі колоїдних та справжніх розчинів.

Отже, організми добувають Si з природних вод і ґрунтів для забезпечення функціонування власних біохімічних процесів, вивільняють його разом з екскрементами і при відмиранні, що приводить до відкладання потужних мас кремнезему на дні водойм. Так сформувалась незамкнута гілка біогеохімічного колообігу Si, оскільки частина кремнезему виводиться з нього. Динамічний багаторазовий щорічний перехід Si з організмів фітопланктону в навколишнє середовище та у зворотному напрямі свідчить про важливу функцію біогеохімічного циклу Si – перенесення речовини, енергії та інформації з поверхневих до більш глибоких зон Світового океану.

Має місце також вулканічний шлях накопичення кремнезему у водоймах. У районах підводного вулканізму та гідротермальної діяльності спостерігається активізація хіміко-біогенного фактора, що забезпечує переведення в осад розчиненого у морській воді кремнезему. Його винесення сучасними гідротермами оцінюється сотнями тонн на добу, що сприяє розквіту діатомей, радіолярій та накопиченню помітних мас кремнезему. При охолодженні розчин стає перенасиченим, частина його зв'язується з Fe і Mn з утворенням специфічних силікатів, частина осаджується у вигляді водного гелю  $\text{SiO}_2$ . Наслідком такого явища є утворення кремнистих сланців, часто разом із прошарками залізних руд.

Про співвідношення органогенної і хемогенної форм накопичення кремнезему свідчить приклад яшмової формації Південного Уралу, яка пов'язана з підводним вулканізмом. Більша частина цієї формації накопичилась у період затухання вулканізму. Отже, припинення активного вулканізму не виключає дію поствулканічних гарячих джерел, що сприяють привнесенню кремнезему. Зокрема, вулканічні води ісландських гейзерів багаті на кремнезем (до 45 мг/л). Силікатні накопичення термальних джерел (гейзерити) виникають у результаті зменшення тиску, зниження температури, прояву хімічних реакцій, діяльності водоростей. Хімічне осадження при досягненні межі насичення оптимально забезпечують



умови жаркого вологого клімату звідки поєднанню інтенсифікації процесу хімічного вивітрювання в зоні знесення та додаткового надходження кремнезему вулканічного походження.

Важливою особливістю біогеохімічного циклу Si у Світовому океані є його неперервний зв'язок з колообігом C, Al та інших елементів. Зокрема, кремнезем зв'язує у ґрунті надлишкові кількості Al і тим самим запобігає його токсичному впливу; при цьому SiO<sub>2</sub> підсилює надходження в рослини необхідних елементів фосфорного живлення у вигляді H<sub>2</sub>PO<sup>-</sup> та HPO<sup>2-</sup>.

Техногенез негативно впливає на біогеохімічний цикл Si. Це пов'язано з переробкою кремнезему на цеглу, цемент, скло; надходженням Si з відходами напівпровідникового, сільськогосподарського виробництва, побутовими стоками та ін. У забруднених водоймах спостерігається порушення циклу розвитку діатомового фітопланктону – носія кремнезему.

#### **4.6. Закономірності біогеохімічної міграції радіонуклідів Стронцію (Sr) і Цезію (Cs)**

Аварія на Чорнобильській АЕС у квітні 1986 року не має аналогів як за площею впливу йонізуючої радіації на природні екосистеми, так і за масштабом робіт з ліквідації її наслідків. Чорнобильська катастрофа поставила перед людством винятково складні завдання, що стосуються практично усіх сфер життя, багатьох галузей науки, виробництва і культури. Раніше (29 вересня 1957 року) був значний аварійний викид радіонуклідів на Південному Уралі у місті «Челябінськ 40». Додаткове сучасне забруднення біосфери радіонуклідами відбулося весною 2011 року під час аварії реакторів АЕС «Фукусіма» (Японія). Особливо небезпечні радіонукліди Sr і Cs.

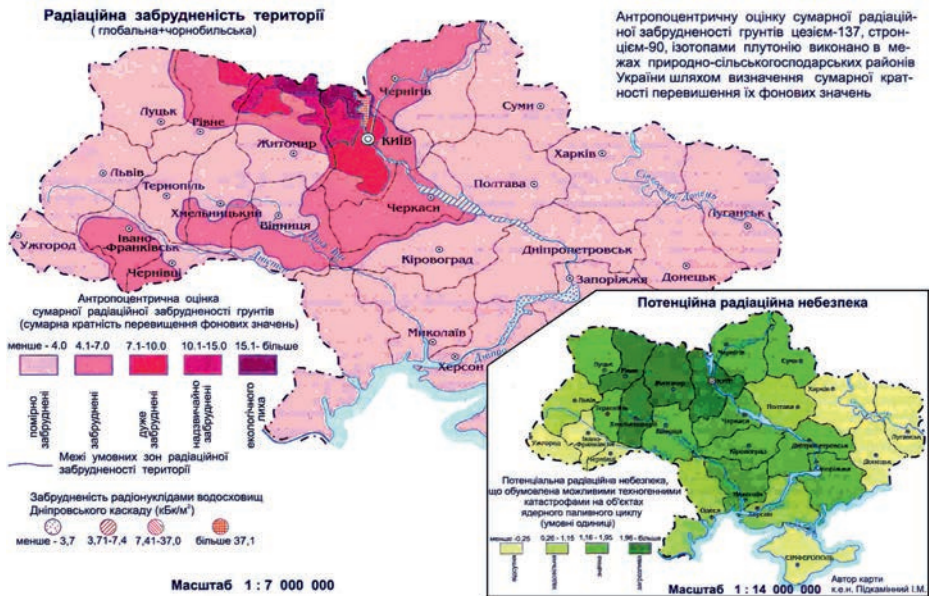
*Цезій* (Cs) – елемент I (А) групи періодичної системи; атомний номер 55; атомна маса 132,90543; кларк у літосфері  $3,7 \cdot 10^{-4}$  %. Існує тільки один природний ізотоп цезію – <sup>133</sup>Cs (100%). Cs – хімічний аналог К. Радіоактивний ізотоп <sup>137</sup>Cs виникає під час ядерних вибухів і аварій на об'єктах атомної енергетики (період напіврозпаду 29 років).

*Стронцій* (Sr) – елемент II (А) групи періодичної системи, хімічний аналог Са; атомний номер 38; атомна маса 87,62; кларк у літосфері 0,04%;

в організмі люди ни –  $1 \cdot 10^{-3} \%$ . У природі існує у вигляді таких ізотопів:  $^{84}\text{Sr}$  (0,5%),  $^{86}\text{Sr}$  (9,8%),  $^{87}\text{Sr}$  (7,2%),  $^{88}\text{Sr}$  (82,5%). В організмі накопичується у місцях активного остеогенезу. Радіоактивний ізотоп  $^{90}\text{Sr}$  також виникає під час ядерних вибухів та аварій на об'єктах атомної енергетики (період напіврозпаду 30 років).

Йонізуюча дія випромінювання при розпаді радіоактивних ізотопів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  призводить до ушкодження кісткового мозку, сприяє розвитку лейкемії, злоякісних пухлин та інших негативних наслідків для здоров'я людини, тварин та нормального стану інших біологічних об'єктів.

Радіонукліди  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  після ядерної аварії потрапили в атмосферу, звідти на поверхню ґрунту, водних об'єктів, рослинний покрив, дороги, будівлі та ін. Стан радіонуклідів залежав від їхніх фізико-хімічних особливостей, розчинності та взаємодії з речовинами поверхонь, куди вони потрапили. Після Чорнобильської аварії радіонукліди  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  перебували у вигляді оксидів, карбідів, атомарної вільної форми, а також у складі аерозольних частинок із розмірами порядку мікрона і більше.



Мал. 43. Фонові значення забрудненості (2022 р.): від помірного природного (блідорозове) до екологічного лиха (фіолетове).



**Мал. 44.** «Саркофаг»/укриття ЧАЕС: 2019 рік – введено в експлуатацію; 165 м – довжина, 260 м – у ширина, 110 м – висота. Загальна площа верхньої частини укриття – 86 тис. кв.м. Металева основа й обшивка саркофага важать приблизно 25 тис. тонн. Вартість 2,15 мільярда доларів. Термін експлуатації – одне століття.

Гетерогенність та розподіл вихідного забруднення визначалися напрямом вітру, розмірами частинок, їхньою розчинністю та спонтанними опадами з атмосфери. Радіоактивні хмари у місцях випадання дощу створювали зони і плями з різними рівнями радіації на поверхні землі. Це простежується на картах радіоактивно забруднених  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  територій України. Сьогодні забрудненими в Україні залишаються 42,8 тис. км<sup>2</sup> (7% території); наприкінці 1986 р. їх було 53,5 тис. км<sup>2</sup> (9%) (мал. 43). Враховуючи період природного напіврозпаду, через 300 років концентрація радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  вже не буде загрозливою для людини на зазначених територіях (проте слід моніторити забруднення «довгоживучими» радіоізотопами  $^{238-239}\text{Pu}$  та ін.). Зруйнований реактор вкритий «саркофагом» (мал. 44).

Оскільки незначні маси різних форм радіонуклідів розподілені повітряними потоками на великій території, їхню поведінку до змішування із носієм слід розглядати як стан крайнього розсіювання, коли основну роль відіграють процеси сорбції на поверхні ґрунту, кутикули листків, кори стебел, будівлях. Таким був стартовий стан входження в біосферу радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  та їхнє залучення у колообіг хімічних елементів за участі живої речовини.

Масові кількості радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  в біосфері низькі, тому їхній фізико-хімічний вплив якісно не змінює історично встановлений хід біогеохімічних циклів, а лише впливає на живі організми в локальних місцях забруднення, тобто опосередковано змінює темпи біологічного колообігу. У подальшому починається процес розподілу радіонуклідів у ґрунті, тканинах рослин, природних водах. Зокрема, з поверхні листків радіонукліди залучаються всередину клітин і піддаються метаболічному засвоєнню як ізотопи біогенних елементів. При цьому відбувається природна заміна  $^{137}\text{Cs}$  на К внутрішньоклітинний, а  $^{90}\text{Sr}$  – на Са. Позакореневе надходження радіонуклідів у десятки разів повільніше, ніж кореневе, при якому рухливий  $^{90}\text{Sr}$  швидше надходить з ґрунту у рослини через корінь. Подальша міграція цієї частини радіонуклідів у ґрунт пов'язана з листовим опадом та відмиранням рослин. Значна частина радіонуклідів перебуває у ґрунті, як на поверхні, так і в нижніх шарах, при цьому їхня міграція багато в чому залежить від типу ґрунту, його гранулометричних, водно-фізичних і агрохімічних властивостей. Крім того, ефект міграції радіонуклідів залежить від метеорологічних умов (кількості опадів). Так, на поверхні ґрунту  $^{90}\text{Sr}$  вимивається дощем у нижчі шари. Міграція радіонуклідів у ґрунтах відбувається повільно в шарі 0,5 см завтовшки. За ступенем накопичення  $^{137}\text{Cs}$  у біомасі рослин, ґрунти можна розташувати в такій послідовності: дерново-підзолисті супіщані, дерново-підзолисті суглинні, сірі лісові, чорноземи.

Нагромадження (винос) радіонуклідів сільськогосподарськими рослинами залежить як від властивостей ґрунту, так і біологічних особливостей рослин. Із кислих ґрунтів радіонукліди надходять у рослини в значно більших кількостях, ніж із слабокислих. Зниження кислотності ґрунту, зазвичай, сприяє зменшенню масштабів переходу радіонуклідів у рослини. Зокрема,  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$ , у 2–6 разів інтенсивніше поглинаються зернобобовими культурами, ніж злаковими.

Накопичення радіонуклідів у рослинах залежить також від вмісту в ґрунті елементів живлення. Наприклад, мінеральні добрива у дозах  $\text{N}_{90}$ ,  $\text{P}_{90}$  збільшують концентрацію  $^{137}\text{Cs}$  в овочевих культурах у 3–4 рази, а аналогічні внесення К – у 2–3 рази знижують його вміст. Позитивний ефект на зменшення надходження  $^{90}\text{Sr}$  у врожай зернобобових культур має

внесення речовин, що містять Са. Зокрема, збагачення чорнозему вапном у дозах, еквівалентних гідролітичній кислотності, зменшує надходження  $^{90}\text{Sr}$  у зернові культури в 1,5–3,5 рази.

Радіонукліди, що випали на поверхню водойм, швидко зв'язуються різними суспендованими речовинами, частина з яких потрапляє на дно у утворенням шарів мулу. У такий спосіб здійснюється участь радіонуклідів у біогеохімічних циклах у природних водах.

У біосфері міграція радіонуклідів нерозривно пов'язана із сукупною діяльністю усієї біоти, оскільки біогеохімічний колообіг  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  ефективно реалізується в системі трофічних ланцюгів. Швидкість передавання радіонукліда від одної ланки трофічного ланцюга до іншої визначається як його здатністю накопичувати радіонукліди, так і тривалістю утримання  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  в організмах цієї ланки. Тому загальний потік радіонуклідів переважно залежить від біологічних процесів: швидкості утворення біомаси; концентрації в ній радіонуклідів; темпів переходу  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  в продукти. Крім того, органічні речовини, що містять радіонукліди, завжди переробляються мікроорганізмами.

В агроценозах радіонукліди разом з кормами потрапляють в організм домашніх тварин, далі у гній; а з продуктами харчування і водою – людині. Особливо небезпечний для організму радіоактивний  $^{90}\text{Sr}^{2+}$ , оскільки він, потрапляючи до складу кісткової тканини, замінює  $\text{Ca}^{2+}$  в кістках, опромінює кістковий мозок і спотворює кровотворні процеси. За умов надлишку в ландшафті Sr (при обов'язковому дефіциті природного Са) в кістках тварин і людини у 5–6 разів збільшується концентрація Sr. При цьому виникає важка «уровська хвороба» (хвороба Кашина – Бека) або «стронцієвий рахіт» – ендемічне захворювання, вперше виявлене у населення поблизу річки Уров у Східному Сибіру.

При дослідженні особливостей міграції радіонуклідів у трофічних ланцюгах вираховується *коефіцієнт концентрування* (КК) – співвідношення концентрації радіонукліда у вищій ланці трофічного ланцюга до його концентрації у нижчій ланці ланцюга або у ґрунті. Порівнюючи концентрації радіонуклідів, отримують *коефіцієнт накопичення* (КН); порівнюють концентрацію радіонукліду у сільськогосподарських продуктах зі щільністю радіоактивного забруднення ґрунту – *коефіцієнт переходу* (КП).

Застосування підвищених норм фосфорно-калійних добрив ( $P_{30,60}$ ,  $K_{30,60}$ ) зменшує коефіцієнт переходу (КП)  $^{137}\text{Cs}$  в кормові культури.

Хвойні дерева (сосна, ялина, кедр, модрина) у 5–10 разів вразливіші до радіоактивних забруднень, ніж листяні породи. Трав'янисті рослини й більшість чагарників стійкіша за деревні. Нижчі рослини (мохи, водорості, лишайники) стійкіші до радіоактивного опромінення. Коефіцієнт накопичення  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у мохів у 5–10 разів вищий, ніж у трав'яних рослин. Мохи відрізняються найбільшою концентрувальною здатністю радіонуклідів. У деревному ярусі найбільше забруднення характерне для кори дерев і асимілюючих органів (листя, хвоя), гілок – спочатку дрібних, потім великих. Найбільше забруднюється деревина берези, менше – дуба, вільхи.

Здатність певних видів рослин і ґрунтових мікроорганізмів до накопичення радіонуклідів використовують як засіб біологічного очищення або доочищення радіоактивних територій. Такі прийоми отримали назву біоремедіації.

Ефективним біогеохімічним індикатором радіаційного забруднення ґрунтів і підземних вод, є береза звисла (*Betula pendula* L.), оскільки використання її соку задовольняє потреби радіогідрогеохімічного моніторингу ландшафтів в умовах Українського Полісся.

## 4.6. Особливості біогенної міграції пестицидів

Сучасний перелік пестицидів вміщує понад тисячу різних класів органічних сполук, який постійно поповнюється.

*Пестициди* – загальна назва усіх хімічних сполук, що застосовують в сільському господарстві для захисту культурних рослин від шкідників, захворювань, бур'янів (інсектициди, фунгіциди, гербіциди та ін.). В усьому світі в середньому за рік застосовується близько 3,2 млн т пестицидів (у середньому 0,5 кг на мешканця планети).

Особливості міграції пестицидів у атмосфері, гідросфері, ґрунті і трофічних ланцюгах визначають такі фактори:

1) фізико-хімічні властивості пестицидів (леткість, розчинність, здатність до гідролізу, стійкість до фотохімічного розкладання та ін.);



2) деструкція пестицидів мікроорганізмами, для яких такі пестициди є джерелом живлення органічним Карбоном. Проте продукти деструкції можуть бути високотоксичними для мікроорганізмів і переривати процеси самоочищення ґрунту від цього виду ксенобіотиків;

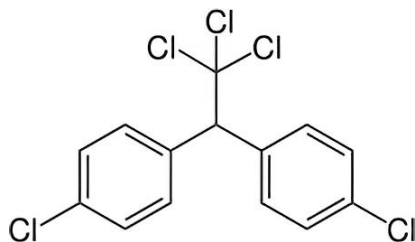
3) норми витрат і масштаби застосування;

4) здатність накопичуватися в атмосферних опадах і випадати у вигляді дощу;

5) здатність до біогенної акумуляції.

Фізико-хімічні та екотоксикологічні властивості сучасних пестицидів зумовлені їх полярністю, яка характеризується величиною дипольного моменту ( $\mu$ ). Основний асортимент інсектицидів та фунгіцидів утворюють малополярні сполуки з  $2 < \mu < 6$  Дебай. Полярні властивості пестициду визначають його здатність до розкладання на більш прості і небезпечні речовини ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  та ін.).

У 1873 р. було синтезовано австрійським хіміком Отмаром Цейдлером пестицид *дихлордифенілтрихлоретан* (ДДТ) (мал. 45); у 1939 р. швейцарський хімік Пауль Мюллер відкрив його інсектицидні властивості, за що у 1948 р. одержав Нобелівську премію. ДДТ широко використовувався як інсектицид у 1950 – 1970 рр. в усьому світі. За даними Мінагрополітики, у 1967 – 1968 рр. обсяги застосування препаратів на основі ДДТ в Україні становили 7470,5 т/рік.



Мал. 45. Пестицид дихлордифенілтрихлоретан (ДДТ).

Пізніше цей пестицид було заборонено у багатьох країнах. Проте його до сьогодні використовують у боротьбі з малярійними комарами (він допоміг у багатьох країнах викоринити це захворювання). Після заборони використання ДДТ було синтезовано подібні і не менш небезпечні пестициди: хлордан, гептахлор, алдрин, диелдрин, дибромхлоропропан, кепон, мірекс, етилендибромід (ЕДБ).

Хлорорганічні пестициди (ХОП) не розчиняються у воді, стійкі у ґрунті, накопичуються у харчових ланцюгах, утримуються в організмах (у жировій чи м'язовій тканинах) та завдають шкоду здоров'ю людини і

тварин. Навіть незначні дози цих пестицидів, які накопичує популяція людей упродовж тривалого періоду, приводять до негативних ефектів, серед яких: канцерогенез (розвиток раку), мутагенез (поява мутацій), тератогенез (народження дітей із дефектами). Крім того, ХОП викликають серйозні захворювання печінки і нирок, безпліддя та інші фізіологічні і неврологічні розлади.

ХОП особливо небезпечні здатністю до біоаккумуляції, яка полягає у тому, що малі дози пестицидів упродовж тривалого часу накопичуються в організмі, створюють, у підсумку токсичну концентрацію і завдають шкоди здоров'ю. Біоаккумуляція відбувається через відсутність біодеградації, оскільки в організмі немає ферментів, які здатні їх розщепити. ХОП легко поглинаються, але важко виводяться з організму, оскільки накопичуються переважно у жировій тканині; здатні до транскордонного переміщення на значні відстані (повітряними потоками, водними шляхами та шляхами міграції птахів, риб та інших тварин). Зокрема, у середині 60-х років ХХ ст. ДДТ був виявлений у печінці пінгвінів в Антарктиці, тобто дуже далеко від місць його безпосереднього використання. Птахи особливо чутливі до цього отрутохімікату, оскільки він викликає гормональні зміни, пов'язані із метаболізмом Са, що призводить до стоншення шкаралупи яєць, які розбиваються при висиджуванні.

Біоаккумуляція пестицидів посилюється у трофічних ланцюгах – продуценти їх поглинають із навколишнього середовища і накопичують у своїх тканинах. Консументи першого трофічного рівня живляться продуцентами і накопичують ще більш високі концентрації пестицидів і т. д. На вершині піраміди харчового ланцюга в організмах концентрація ДДТ може бути у сотні тисяч разів більша, ніж у зовнішньому середовищі. Таке накопичення речовини при проходженні через трофічний ланцюг називають біоконцентруванням.

Нині серед усіх пестицидів найбільшу екологічну небезпеку становлять пестициди першого покоління (ХОП). У процесі удосконалення асортименту препаратів було отримано пестициди другого (фосфорорганічні) і третього поколінь (піретроїди). Синтетичні піретроїди неполярні ( $\mu$  від 0 до 2 Дебай), мають високу інсектицидну активність, достатньо швидку дію, низьку токсичність для теплокровних



тварин. Хоча необхідно пам'ятати, що усі пестициди – це біологічно активні речовини, але з різним ступенем токсичності для тварин і людини.

Екологи встановили небезпечні особливості сучасних хімічних засобів захисту рослин. Окрім знищення шкідливих комах, збудників хвороб чи бур'янів вони обов'язково шкодять їх природним ворогам чи багатьом іншим видам у біосфері. Рівень токсичності, мутагенності і канцерогенності будь-яких пестицидів для теплокровних часто дуже високий. Отже, шкідливий ефект від застосування пестицидів поширюється на всі види, а також на людину. Пестициди вражають відразу всю популяцію певного виду, тоді як шкідливою часто є лише її частина. Дози, як правило, у кілька разів перевищують необхідні норми. Площі, на яких використовують пестициди, дуже великі. Тільки у Європі вони сягають сотні мільйонів га. Загальна кількість і різноманітність внесених у ґрунт отруйних речовин занадто великі, щоб нехтувати шкідливими наслідками їхньої дії. Ефективність внесення пестицидів традиційними способами (розпилення з літаків чи наземних машин) низька, оскільки більша частина випаровується або змивається водою у ґрунт і водойми, що знищує біорізноманіття екосистем. Зазвичай пестициди мають тривалий період напіврозпаду у воді і ґрунті (12 років для ДДТ, до 20 – для деяких інших). У підземних горизонтах цей інтервал ще довший через незначний вплив біологічних процесів. Пестициди здатні до біоаккумуляції, трансформації та міграції у вигляді аерозолів з водою, в організмах тварин.

Отже, розуміння закономірностей динаміки вмісту пестицидів, часу їх зберігання в агроценозах, взаємодії з організмами, впливу на якість сільськогосподарської продукції важливе для їх оптимального застосування.

Проблеми, пов'язані із застосуванням пестицидів, можна поділити на чотири категорії: 1) розвиток стійкості до пестицидів у шкідників, збудників хвороб і бур'янів; 2) відродження шкідників і збудників хвороб, вторинні спалахи їхньої чисельності; 3) зростання витрат; 4) негативний вплив на навколишнє природне середовище і здоров'я людини.

## ЗАПИТАННЯ. ЗАВДАННЯ

---

1. З'ясуйте, що називають великим геологічним і малим біологічним колообігами? Визначте їхні рушійні сили.
2. Охарактеризуйте види міграції хімічних елементів.
3. З'ясуйте значення поняття «біогеохімічний колообіг речовин і хімічних елементів».
4. Визначте особливості біогеохімічного колообігу води; Карбону; Фосфору; Оксигену; Сульфуру; Нітрогену; Силіцію; Кальцію; Йоду; пестицидів; радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ .
5. У чому полягає проблема оптимізації біологічного колообігу?
6. Поясніть, що таке кислотні опади та причини їх виникнення.
7. У чому полягає негативний вплив підвищеної кислотності води на розвиток водних організмів?
8. Що називають біологічним вивітрюванням?
9. Охарактеризуйте мікроорганізми, що окиснюють сполуки Нітрогену.
10. Наведіть геологічні результати здійснення живою речовиною окисно-відновної функції.
11. Охарактеризуйте процеси розкладання та мінералізації органічних решток на поверхні суходолу.
12. З'ясуйте, у чому виявляється небезпека впливу пестицидів на живі організми.

## 5. ТЕХНОГЕННА МІГРАЦІЯ АТОМІВ І РЕЧОВИН. БІОГЕОХІМІЧНЕ РАЙОНУВАННЯ ЛАНДШАФТІВ. БІОГЕОХІМІЧНІ ЕНДЕМІЇ

### 5.1. Загальні особливості техногенної міграції. Техногенні геохімічні аномалії

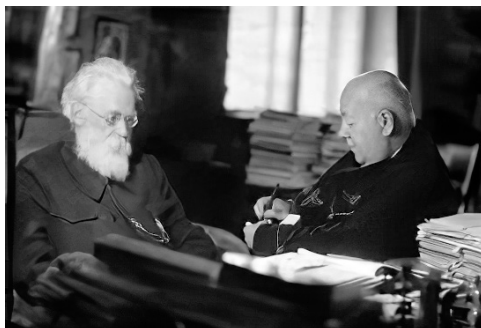
Добування корисних копалин, транспортування та спалювання вугілля, нафти, газу, виплавляння металів з руд, розвиток землеробства і тваринництва, урбанізація здійснюють разом настільки сильний вплив на міграцію хімічних елементів і речовин, що у науковців виникла необхідність виокремлення особливої категорії геохімічних процесів – *техногенної міграції (техногенезу)*.

Термін «техногенез» запропонував Олександр Євгенович Ферсман (1883–1945) – учень і соратник В. Вернадського. У праці «Геохімія техногенезу» він тлумачить його: «Під техногенезом ми розуміємо сукупність хімічних і технічних процесів, які викликані дією людини і призводять до перерозподілу хімічних мас земної кори. Техногенез є наслідком геохімічного впливу людської промисловості».

**Техногенез** – сукупність геохімічних і геофізичних процесів, пов'язаних з діяльністю людства, які вже значно змінили і продовжують змінювати геохімічні умови в біосфері.



Олександр Євгенович Ферсман  
(1883–1945)



В. Вернадський і О. Ферсман

У біогеохімічному аспекті техногенез передбачає:

1) видобування (вилуговування) хімічних елементів з природного середовища (літосфери, атмосфери, гідросфери) та їхню концентрацію;

2) перегрупування хімічних елементів, зміна хімічного складу сполук, до складу яких ці елементи входять, а також створення нових хімічних речовин;

3) антропогенне розсіювання у навколишньому середовищі елементів, що спричинює забруднення природного середовища;

4) тотальне знищення біоценозів та багатьох біологічних видів, що негативно впливає на збереження біологічного і ландшафтного різноманіття.

У 1915 р. В. Вернадський підрахував, що в античну добу використовувалось лише 19 елементів, у XVIII ст. – 28, у XIX – 50, на початку XX – 60. Сьогодні використовуються усі 89 відомих у земній корі хімічних елементів. Продовжується штучне одержання нових елементів (Pu, Np, Cf та ін.) та їх використання.

Кількість видобутку елементів не однакова. Наприклад, світовий щорічний видобуток С вимірюється мільярдами тонн, Fe – сотнями мільйонів, Cu – мільйонами, Hg – тисячами, Pt – десятками тонн. Такі відмінності обумовлені різними причинами, серед яких: 1) практичне значення елемента, технологія його одержання; 2) поширеність елемента та його здатність до концентрації у земній корі – утворення родовищ. Зокрема, цінність Au для людства незаперечна, але видобуток золота ніколи не зрівняється із видобутком Fe, оскільки кларк Au –  $5 \cdot 10^{-7}$ , а Fe – 5,1, тобто у 10 мільйонів разів більший.

Ступінь використання елемента по відношенню до його вмісту в літосфері називають його *технофільністю* (Т) (О. Перельман, 1973). Показник технофільності – відношення маси щорічного видобутку елемента (в тоннах) до його кларку в літосфері. Приклади розрахунків технофільності:

$$T(Fe) = \frac{3,1 \times 10^8}{5,1} = 6,08 \times 10^7; \quad T(Mn) = \frac{6 \times 10^6}{0,10} = 6 \times 10^7;$$

Ці дані свідчать, що людство видобуває з надр Fe і Mn з рівною інтенсивністю, пропорційно їх поширеності (кларкам) у земній корі. Технофільність їх однакова.

Багато хімічних елементів-аналогів з різними кларками і розмірами видобування мають близьку технофільність (Cd і Hg, Ta і Nb, U і Mo, Ti і Zr). Хоча мають місце і відмінності: Cl і F, K і Na, Ca і Mg.

Найвищу технофільність у глобальному масштабі мають C, Cl. Проте цей показник не повністю відображає ступінь залучення хімічних елементів до техногенезу, оскільки не відображає надходження в природне середовище елементів разом із вугіллям, нафтою та іншими горючими копалинами. Окрім того, до техногенезу залучаються хімічні елементи з атмосфери (шляхом фіксації азоту), гідросфери (видобутку солей) та ін.

З кожним століттям стає тіснішою залежність видобування елементів від їхніх кларків. Це пов'язано із тим, що багаті родовища поступово вичерпуються, і з часом, на думку геохіміка Олександра Олександровича Саукова (1902–1964), людство перейде до експлуатації гранітів, базальтів та інших гірських порід, у яких вміст елементів близький до кларків.

Користуються також поняттям «*біофільність елементів*» – це відношення середнього вмісту елементів в живій речовині планети до кларку цього елементу в літосфері (за О. Перельманом). Наприклад, в табл. 3.1 вміст Оксигену в літосфері – 47,2, а в живих організмах – 70. Біофільність Оксигену (O) =  $70/47,2 = 1,48$ . Аналогічно підрахована біофільність інших біогенних елементів.

Чим вища технофільність і менша біофільність хімічного елементу, тим він небезпечніший для живих організмів, тим більша його деструктивна активність на конкретному етапі розвитку техногенної діяльності. Як показник ступеня деструктивності елементу техногенезу використовують відношення суми маси елементу в річному видобутку і надходження його в навколишнє середовище при спалюванні горючих копалин до маси цього елементу в біологічній продукції наземних рослин за рік. За його величиною можна порівняти ступінь небезпеки елементів для живих організмів. Зокрема, ступінь деструктивності хімічних елементів знаходиться у межах: Hg –  $n \cdot 10^3$  –  $n \cdot 10^4$ ; Cd, F –  $n \cdot 10^3$ ; As, Pb, U –  $n \cdot 10^2$ ; Se, Be, B, Sn –  $n \cdot 10^1$ ; для інших елементів цей показник деструктивності становить менше 1.

Кількість елементу яка щорічно виводиться з техногенного потоку в природний називають *техногенним геохімічним тиском*, а його величину на одиницю площі – модулем техногенного геохімічного тиску. На всій

поверхні суші найвищі модулі техногенного тиску властиві Na, Cl, Ca, Fe, а найнижчі – Li, Ag, W, Au, Hg, Tl. В басейнах Чорного та Азовського морів техногенний тиск по K і S вищий за річну величину річкового стоку.

Елементи, деструктивна активність яких у глобальному масштабі незначна, можуть бути небезпечними для регіонів, де їхнє надходження набагато перевищує середній загальний рівень (це стосуються, наприклад, S).

О. Ферсман порівняв між собою природні геохімічні і техногенні процеси, що дало змогу вченому виокремити шість варіантів випадків поведінки технофільних елементів в цих процесах:

1) природа концентрує, людина концентрує (прикладом слугують платинові метали – Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt);

2) природа концентрує, людина розсіює (H, Sn);

3) природа розсіює, людина концентрує (He, Al, Zr, Ag, Au, Ra, Th, U, Ne, Ar);

4) природа розсіює, людина розсіює (B, O, C, F, Na, Mg, Si, P, S, Cl, K, Ca, As, Sr, Ba);

5) природа концентрує, людина спершу концентрує, щоб потім розсіяти (N, Zn);

б) природа розсіює, людина концентрує, щоб потім розсіяти (Li, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Se, Br, Nb, Mo, Cd, Sb, I, Ta, W, Pb, Bi).

У такий спосіб О. Ферсман уперше показав, що лише у двох випадках (першому і четвертому) природні та штучні процеси розсіювання та концентрування хімічних елементів збігаються. У решті випадків людина діє всупереч природі. У цьому полягає один з аспектів ентропійної діяльності людства, – людина «споживає» природну організацію, живе за рахунок неї. Отже, зменшення ентропії (збільшення упорядкованості) в техногенних системах приводить до збільшення ентропії (хаосу) в природі.

Людство «перекачує» з надр і накопичує на земній поверхні найтехнофільніші елементи. Результатом є збагачення (забруднення) природних екосистем Pb, Hg, Cu, Sn, Sb, Cd та іншими елементами. Зокрема, щорічно з надр видобувається більше хімічних елементів, ніж залучається до біологічного кругообігу: Ag більше, ніж у 150 разів, Hg – 110, Pb – 35, F – 15, Cu – 4, Mo – 3 рази. Поряд із цим, при спалюванні вугілля виділяється в

атмосферу більше, ніж залучається в біогенний кругообіг Hg у 8700 разів, U – у 60, Li, Be, Zr – 10, Sn – 3–4 рази.

Крім того, на виробничі і побутові потреби людство сьогодні використовує на рік до  $4 \cdot 10^3$  км<sup>3</sup> води, тобто 10% річкового стоку.

Техногенне розсіювання елементів відбувається у вигляді: викидів техногенних речовин в атмосферу; забруднення ґрунтів і водойм промисловими стоками, твердими побутовими відходами та відходами промислового виробництва; викидів при аварійних ситуаціях; внесення хімічних добрив, отрутохімікатів, зрошення стічними водами і компостами з полів зрошення та ін. Отже, негативна дія техногенезу поєднується із поняттям забруднення навколишнього природного середовища.

Техногенний перерозподіл хімічних елементів створив реальну небезпеку існування екологічної ніші людини. Понад 1/3 населення світу зосереджено на площі, яка становить лише 2,5% усієї території нашої планети. Саме тут виявлені наслідки від забруднення, що набувають найбільшого екологічного змісту.

Для різних геосистем нормальний геохімічний фон й амплітуда його тимчасових змін істотно різняться. Тому важко точно вказати єдиний рівень концентрації тих чи інших техногенних речовин, що викликають ефект забруднення. На запитання «Якими мають бути критерії для зарахування території, що перебуває під впливом техногенних факторів, до категорії забруднених чи незабруднених?» відповідь потрібно шукати у дії біогеохімічного закону В. Вернадського – жива речовина є найважливішим геохімічним фактором розвитку земної кори. Отже, основним критерієм забруднення певної території повинен бути стан і функціонування живих організмів на цій території. У незабруднених біосферних системах межі коливань концентрації техногенних речовин, а також форми їхніх знаходжень повинні відповідати таким умовам:

- 1) не порушується газова, концентраційна та окисно-відновна функції живої речовини системи, що разом забезпечують геохімічне самоочищення системи;

- 2) біохімічний склад первинної і вторинної продукції не перетерпає критичних змін, які спричиняють порушення життєвих функцій як у

ланках трофічних ланцюгів, так і за їхніми межами (при відчужуванні біологічної продукції);

3) не знижується біологічна продуктивність системи;

4) не знижується інформативність системи: зберігається необхідний для існування системи генофонд.

При порушенні перерахованих умов відбувається техногенна трансформація природної системи, а при критичних рівнях техногенного впливу – її руйнування.

### **Біогеохімічна оцінювання техногенних аномалій**

Загальна ландшафтно-біогеохімічна ситуація та геохімічна структура ландшафтів суттєво впливають на хімічні перетворення елементів, посилюють або послаблюють їхню рухливість. Частина елементів техногенного походження накопичується на характерних для певного ландшафту геохімічних бар'єрах. У результаті формуються техногенні геохімічні аномалії – ділянки з підвищеним (або пониженим) порівняно із фоном вмістом хімічних елементів (їхніх сполук) у поверхневому шарі ґрунтів і донних відкладах. Хімічні елементи при цьому можуть перебувати у різних формах (мінеральній, біогенній, колоїдній, сорбованій, ізоморфній), а також у вигляді розчинів та газових сумішей. Простір, зайнятий локальною техногенною аномалією, називають техногенним ареалом розсіювання. Появу техногенної геохімічної аномалії можна розглядати як результуючу між техногенним впливом і геохімічною стійкістю геосистеми до техногенезу.

Існують різні підходи до класифікації техногенних аномалій. За класифікацією техногенних аномалій О. Перельмана розрізняють техногенні аномалії з підвищеним і пониженим геохімічним фоном (надлишком або дефіцитом хімічних елементів). За розмірами техногенні аномалії поділяють на глобальні (наприклад, підвищений вміст  $\text{CO}_2$  в атмосфері), регіональні, локальні.

Залежно від середовища виникнення техногенних аномалій ще диференціюють на:

– літохімічні (техногенний ґрунт, кора вивітрювання); гідрохімічні (водоносний горизонт);



- атмогеохімічні (газовий склад атмосфери);
- біогеохімічні (фіто-, зоо-, антропогеохімічні показники).

Крім того, усі техногенні аномалії можна поділити на два типи: шкідливі (погіршують навколишнє середовище); нейтральні (суттєво не змінюють характер екологічних властивостей навколишнього природного середовища).

Формуються техногенні аномалії внаслідок аварійних разових викидів (наприклад, ЧАЕС); обмеженого у часі, проте інтенсивного техногенного впливу (зокрема, добування корисних копалин); впливу стаціонарних джерел забруднення навколишнього середовища (заводи, ТЕЦ, сільсько-господарські підприємства, мегаполіси).

У межах техногенних аномалій розрізняють зони: найбільшого забруднення у радіусі 2 – 5 км (форма залежить від потужності забруднення і «рози вітрів»); підвищеної концентрації елементів в радіусі 18 – 30 км. Концентрація забруднення зменшується від джерела по експоненті.

Серед методичних прийомів визначення біогеохімічного навантаження на техногенні ландшафтні комплекси, сформовані джерелами забруднення (викидами, стоками, твердими матеріалами, відходами), застосовують обчислення геохімічних коефіцієнтів і показників забруднення. Серед них: кларк концентрації ( $K_K$ ), коефіцієнт концентрації ( $K_C$ ), сумарний показник забруднення ( $Z_C$ ).

Для характеристики локальних техногенних аномалій використовують *коефіцієнт концентрації* ( $K_C$ ) – порівнюють концентрацією елемента в аномалії із фоновим ландшафтом. Сумарний показник забруднення ( $Z_C$ ) конкретної техногенної аномалії дорівнює:  $Z_C = \sum K_C$ .

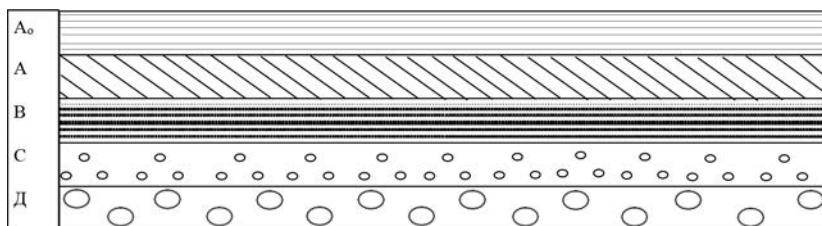
## 5.2. Техногенні системи. Еколого-геохімічний аналіз

Геохімічна класифікація техногенних систем остаточно не розроблена. Їхня ієрархія за рівнем організації може утворювати локальний, регіональний чи глобальний ряд – від техногенного ґрунту, мулу, кори вивітрювання, водоносного горизонту до техногенного (культурного) ландшафту та ще більш великих систем – країн, океану і всієї біосфери у вигляді техносфери. Окреслимо категоріальний апарат:

**Ландшафт** – конкретна територія, однорідна за своїм походженням і неподільна за зональними та азональними ознаками, має єдиний геологічний фундамент, рельєф, загальний клімат, однакове поєднання гідротермічних умов, ґрунтів, біоценозів і певну структуру.

**Ґрунт** – біокосна система, що утворилася внаслідок взаємодії живих організмів та косної речовини; поверхневі шари земної кори (суходолу), видозмінені під впливом живих організмів і відрізняються від гірських порід складом мінеральної маси, значним вмістом специфічних органічних речовин (гумусу) і мають важливу відмінність – родючість, тобто здатність постачати рослинам необхідні для їх росту поживні речовини і воду. Засновником учення про ґрунт вважається В. В. Докучаєв.

Структура природного типу ґрунтів ландшафту досить складна, але у більшості типів вирізняється невелика кількість основних горизонтів (мал. 46).



**Мал. 46.** Схема природного типу ґрунтового профілю з позначенням горизонтів ґрунту:

Ао – підстилка; А – елювіальний або гумусний горизонт, в якому відбувається гуміфікація органічних речовин; В – ілювіальний горизонт, в якому здійснюється накопичення поживних речовин; С – материнська порода, що вивітрилася; Д – незмінена материнська порода (В. Аніщенко, 2011).

*Техногенні ґрунти* – ґрунти, яких не було у біосфері. Найчастіше природний тип ґрунтів зберігається при сільськогосподарській діяльності, тут відбувається лише їх окультурювання за допомогою різноманітних агротехнічних та агрохімічних способів. Унаслідок невдалого окультурювання відбувається погіршення ґрунтів – їхня ерозія, засолення, заболочування та ін. Техногенні мули – мули, відсутні в природних екосистемах. Прикладами техногенних ґрунтів слугують осушені торф'яники, поливні ґрунти оазисів.

Класифікація техногенних ґрунтів має певні особливості. Це пов'язано з тим, що на відміну від природного ґрунтоутворення техногенні ґрунти формує людина після порушення земної поверхні відкритими розробками корисних копалин, добування будівельних матеріалів, під час промислового і цивільного будівництва, меліорації тощо. Проте, до цього часу немає досконалої і консенсусної класифікації техногенних ґрунтів, яка б відповідала генетико-морфологічному ґрунтознавстві, дослідження продовжуються (Р. Панас, М. Маланчук, 2009; О. Германович, 2018; С. Позняк, О. Телегус, 2021).

Парагенні асоціації елементів у техногенних мулах різняться від асоціацій природних мулів (це стосується Pb і Ni, Cu і Sn та ін.). Мули повністю техногенні у ставках на територіях металургійних і хімічних комбінатів; змінені частково – у великих річках і озерах; у морях – змінені тільки у певних районах (портах, проливах та ін.). У багатьох техногенних мулах підвищений вміст бігумів, важких металів, різних нових для живої речовини синтетичних продуктів, що разом суттєво змінює мікробіологічні процеси. Спектр елементів у них достатньо широкий – Ag, Hg, Cd, Pb, Ni, Cu, Zn, Sn, Sr, Bi, Mo, P та ін.

*Техногенні ландшафти* теж антропогенного походження, їх еколого-геохімічну класифікацію визначають:

1) природний ландшафт (тропіки, тундра чи напівпустеля мають власну геохімічну специфіку);

2) особливості водної міграції (спричинюють утворення сірчано-кислих, кислих, кислих глейових, кальцієвих та інших ландшафтів. Наприклад, солоний техногенний ландшафт виникає в районах вторинного засолення в оазисах; кислий глейовий – в лісстоболотяних низовинах тундрової, тайгової та вологої тропічної зон (зокрема, в районах нафтодобування); сірчано-кислі – в районах добування вугілля та сульфідних руд (використовують кислий водовідлив шахт). Ландшафти України поділяють на 12 геохімічних класів (Л. Малишева, 1989), основними з яких є: кислий (Н-клас); кислий-кислий глейовий (Н, Н-Fe); кислий глейовий (Н-Fe); кислий кальцієвий (Н-Ca); кальцієвий (Ca); кальцієво-магнієвий карбонатний (Ca-Mg/CO<sub>3</sub>), кальцієво-натрієвий (Ca-Na), сольові (Ca-Na/Cl, SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> та Ca-Na/Cl-SO<sub>4</sub>), карбонатно-глейовий (Ca-CO<sub>3</sub>/Н-Fe).

3) рельєф, геологічні особливості (розрізняють гори, рівнини, райони вапняків, гранітоїдів та ін.).

Господарська діяльність диференціює техногенні ландшафти як за спеціалізацією (міста, дороги, гірничодобувні, рекреаційні, агроландшафти та ін.), так і за масштабами. Масштаб впливу техногенезу (негативного) на екологічний стан певної території О. Перельман запропонував різнити за рівнями: слабкий (I), помірний (II), сильний (III).

Прикладами III рівня впливу техногенезу (у вигляді надмірного застосування пестицидів, меліорації) можуть бути значні насадження бавовнику у Середній Азії та висока щільність садів і виноградників у Молдавії часів СРСР (агроландшафти 70–80 років ХХ ст.). Зокрема, застосування упродовж багатьох десятиліть мідного купоросу ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) та бордоської рідини ( $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) призвело до того, що у верхніх шарах карбонатних чорноземів центральної Молдови утворилась техногенна геохімічна провінція із концентрацією  $\text{Cu}$  до 1–2% (О. Перельман, 1989).

Біогеохімічні особливості техногенних ландшафтів свідчать, що техногенез є найінтенсивнішою формою міграції, яка охоплює усі форми – механічну, фізико-хімічну та біогенну міграції. Специфіка техногенезу визначається соціально-економічними умовами суспільства. Загальна площа України становить 603700 км<sup>2</sup> (5,7% території Європи, 0,44% території світу). Площа винятково економічної (техногенної) зони України становить майже 13,6% (понад 82000 км<sup>2</sup>).

Особливими різновидами техногенного ландшафту є *ландшафти добування та переробки корисних копалин*. Їх біогеохімічні особливості залежать як від специфіки і масштабів виробництва, так і від природних умов. Зокрема, різняться гумідні (зволожені) і аридні (посушливі) ландшафти, рівнинні та гірські. За Н. Солнцевою (1998), при добуванні вугілля в гумідних районах в ландшафт надходять переважно сульфати важких металів (Fe, Mn, Al, Cd, Hg) та поліциклічні ароматичні вуглеводні (5–7-ядерні бензольні структури), що призводить до забруднення ґрунтів канцерогенними речовинами, до засолення ґрунтів із подальшим виникненням бар'єрів двох типів: латеральних сульфідних (за рахунок відновлення  $\text{SO}_4^{2-}$  у водах) та радіальних (шляхом концентрації гідроксидів Fe).

Специфічність ландшафтів районів нафтодобування Західного Сибіру обумовлена інтенсивним водокористуванням ґрунтових і пластових вод, що призводить до залучення у процеси міграції солених вод глибших горизонтів (їх закачують для підтримання пластового тиску). У підземних водах зменшується вміст Fe, Mn та деяких інших мікроелементів,  $H_2S$ , гумінових речовин, зростає вміст фенолів,  $NH^+$ , низки нафтопродуктів. Тут енергійно відбуваються мікробіологічні процеси, виникають сірководневі та карбонатні бар'єри, формуються солончаки.

Гірничозбагачувальні комбінати, металургійні заводи, теплові та атомні електростанції, автотранспорт є основними джерелами забруднення ландшафтів України. Морфологія техногенного ореолу залежить від «рози вітрів», тому радіус ореолу забруднення важкими металами може коливатися від 5 до 20 км («роза вітрів» – це векторна діаграма, що характеризує режим вітру у певній місцевості за багаторічними спостереженнями).

Необхідною умовою видобутку залізних руд з великих глибин є осушення водоносних горизонтів, оскільки підземні води не дають змоги прокладати шахти на глибинах більше 1300 м, загрожуючи затопленням. Інтенсивне відкачування підземних вод призводить до виникнення потужної (більше 1000 м) депресивної воронки, яка зумовлює появу низки негативних техногенних процесів, таких як стиснення ґрунтів, осідання поверхні тощо.

Забруднюють атмосферу і створюють потужні геохімічні аномалії в ґрунтах також значні пилові викиди, які виникають під час видобутку руд відкритим способом (зокрема, у Криворізькому басейні). Техногенні ґрунти стають багатолітнім депо забруднень (на десятки-сотні років).

**Біогеохімія міст.** Міста розглядають як штучно створені ландшафтно-техногенні – урбанізовані (лат. *urbanus* – міський) системи. Унаслідок складної взаємодії природних і антропогенних компонентів у них формуються специфічні ландшафтно-геохімічні структури та еколого-геохімічні стани. Усі технічні об'єкти і штучні інженерні споруди є техногенними компонентами ландшафтів, а не природними чинниками, що діють на

ландшафт ззовні. Домінуючими типами міських ландшафтів є селитебні, транспортні, промислові, садово-паркові; субдомінуючими – промислово-селитебні, складські, промислово-складські та транспортно-складські, іноді аквальні міські ландшафти.

Дослідження в цій галузі активізуються, оскільки понад 70% населення Землі проживає на 3% площі планети. У містах-мегаполісах (Мехіко, Токіо, Нью-Йорк, Сан-Пауло, Шанхай, Лондон, Делі, Джакарта та ін.) живуть десятки мільйонів людей. До 160 міст-мільйонерів світу належить і Київ. Частка міського населення України висока в Донецькій (90%), Луганській (86%) та Дніпропетровській (83%) областях; низький рівень (менше 50%) характерний для Вінницької, Рівненської, Тернопільської, Івано-Франківської, Чернівецької та Закарпатської областей.

Високий рівень урбанізації в Україні (8,95% території) поєднується з високим рівнем індустріалізації. Причому у містах значна питома вага виробництв «нижчих» поверхів промисловості – енергетичних, гірничо-видобувних і гірничо-збагачувальних, металургійних, коксо-, нафтохімічних і хімічних, важкого машинобудування, промисловості будматеріалів тощо. Саме ці виробництва біогеохімічно найбільш активні, тобто з ними пов'язана основна маса викидів і скидів продуктів техногенезу в довкілля.

На міські ландшафти упродовж їхнього розвитку постійно накладаються функціональні, естетичні та стихійні процеси. У містах вчені досліджують біогеохімічні особливості ґрунтового покриву, повітряного і водного басейнів; біологічний колообіг та різні види міграції елементів; збалансованість автотрофних і гетеротрофних процесів; міські біоценози, можливості біоіндикації, мікроелементарний склад рослин, людського організму (кров, волосся, сеча) та інші характеристики урбанізованого середовища (В. Гуцуляк, Ю. Дмитрук, В. Ковальський, В. Кучерявий, В. Ландсберг, Л. Малишева, Ю. Одум, О. Перельман, М. Реймерс, Ю. Саєт, Ф. Стольберг, Ю. Тютюник, В. Чайка, В. Петлін, О. Міщенко та ін.).

Для великого міста характерне суцільне аномальне біогеохімічне становище складної будови. Американський еколог Юджин Одум (1912–2002) назвав міста «паразитами біосфери», оскільки урбанізовані системи активно вилучають з природних систем біотичну продукцію та інші сировинні ресурси для забезпечення побутових та виробничих потреб людей,



Юджин Одум  
(1912–2002)

що збіднює біологічний колообіг речовин і елементів. Хімічний склад атмосферного повітря, поверхневих вод, ґрунтів, рівень шуму, електромагнітних хвиль, ультрафіолетової радіації та інші еколого-геохімічні фактори у містах різняться. У містах аномально накопичуються переважно халькофіли та елементи групи Fe (Co, Ni). З позицій біогеохімії вплив макро- та мікроелементів продуктів харчування на стан здоров'я населення великих міст нівелюється, оскільки продукти завозять з різних територій. Актуальними

для міст залишаються проблеми оптимізації їхньої території та забруднення навколишнього середовища. У великих містах формується власний мікроклімат: істотно змінюється вологість, аеродинамічні, термічні та радіаційні характеристики, що впливає на здоров'я населення (збільшується кількість респіраторних, серцево-судинних, онкологічних та інших захворювань).

До вказаних особливостей міст В. Петлін, О. Міщенко, (2021) виокремлюють ще такі :

- великі міста споживають більше кисню, ніж продукують (приблизно у 200 разів), водночас вони виділяють масу вуглекислого газу, хоча автотрофний блок не засвоює його й половини;

- у великих містах із їх великою площею горизонтальних і вертикальних штучних поверхонь, які акумулюють сонячну енергію, відчутно проявляється явище ентропії;

- виразно проявляється агресивність міської екосистеми стосовно сусідніх екосистем: лісових, лучних, болотних, а також штучних агроекосистем;

- продуктивність біомаси рослинного покриву в урбоекосистемах у 6–7 разів менша, порівняно з природним рослинним покривом;

Постійне зростання процесу урбанізації призводить до розростання населених місць, і як частина цього процесу іде забудова з використанням різних будівельних матеріалів. Ці матеріали зазвичай мають низьке альbedo (здатність відбивати/розсіювати світло) і мають значне теплове

випромнювання. До того ж діяльність промислових об'єктів та постійне зростання кількості автомобільного транспорту підвищує температуру міського середовища. У таких умовах надзвичайно важливо знизити температурні показники і максимально наблизити їх до комфортних, особливо під час літньої спеки (В. Масальський, 2018). Цьому питанні найважливішим є створення зелених насаджень у населених пунктах. Адже зелені насадження покращують мікроклімат: знижують критичні температури (мал. 47), уповільнюють або створюють рух повітря, знижують рівень шуму, збагачують повітря киснем і фітонцидами, захищають від газу і пилу, іонізують повітря тощо.



**Мал. 47.** Зелені насадження покращують мікроклімат: знижують критичні температури, уповільнюють або створюють рух повітря, знижують рівень шуму, збагачують повітря киснем і фітонцидами, захищають від газу і пилу, іонізують повітря.



При вивченні біогеохімії міст значну увагу приділять детальному ландшафтно-геохімічному картографуванню і районуванню, виникненню біогеохімічних ендемій.

**Агроландшафти.** Масштаби і значення біогеохімічної диференціації сільськогосподарських територій повною мірою не усвідомлені суспільством. Цю проблему сформулював ще у 30-х роках ХХ ст. селекціонер, генетик, ботанік, географ і агроном Микола Іванович Вавілов (1887–1943). Учений наголошував на важливості проведення польових та експериментальних досліджень закономірностей географічної диференціації біохімічних властивостей рослин та показників якості сільськогосподарської продукції. Дані щодо географічної мінливості хімічного складу рослин та сільськогосподарської продукції багато дослідників актуалізують у галузях біохімії та фізіології рослин (особливо в працях з дослідження мікроелементів). В останні десятиліття проблема забруднення сільськогосподарських територій та продукції з них значно розширила сферу досліджень в галузі біогеохімії агроландшафтів.

Науковці виокремлюють три групи процесів, які обумовлюють диференціацію біогеохімічної структури агроландшафтів:

1) агрогенні біогеохімічні перетворення безпосередньо пов'язані із сільськогосподарськими технологіями; це агротехнічна обробка ґрунтів, використання пестицидів, внесення мінеральних добрив та вапнування ґрунтів; водна меліорація, комплекс обробки ґрунтів і рослин у період вегетації та збирання врожаю та ін.;

2) техногенні біогеохімічні перетворення виникли внаслідок загального забруднення кислотними дощами, промисловими та автомобільними викидами, токсичними відходами та ін., а не зумовлені потребами сільськогосподарського виробництва;

3) природна геохімічна диференціація обумовлена типом ґрунтів, кліматом, рельєфом та ін.

Перші дві групи процесів (агрогенні і техногенні перетворення) відбуваються на фоні природної геохімічної диференціації територій.

На агроландшафт активно впливає антропогенна інтенсифікація біологічного колообігу, що дає змогу для його характеристики використовувати такі поняття як «біомаса», «щорічна продукція», «коефіцієнт біологічного

поглинання», «надлишкові та дефіцитні елементи» та ін. Людина в штучних ландшафтах намагається посилити утворення живої речовини шляхом фотосинтезу на свою користь (для добування їжі, волокон, пального тощо), обмежуючи розвиток іншої біоти. У такий спосіб людина порушує екологічний закон використання 1% чистої продукції фотосинтезу в усіх ланках природних трофічних ланцюгів. Перевищення цієї межі ускладнює біотичну регуляцію вмісту CO<sub>2</sub> і O<sub>2</sub> в атмосфері та інші біогеохімічні процеси.

Крім того, підвищення біологічної продуктивності в агроценозах досягає людина шляхом розорювання ґрунтів, хімізації, осушенням боліт та ін. Зокрема, розораність площ України становить 53,9% від загальної площі та 78,1% від сільськогосподарських угідь (площа України складає 60,3 млн га земель, з яких 41,6 млн га є сільськогосподарськими угіддями; з них 32,5 млн га ріллі). В умовах інтенсивного ведення землеробства відбувається деградація ґрунтів, у тому числі дегуміфікація, що спостерігається протягом останніх років, а це призводить до мінералізації гумусу, і як наслідок, до вивільнення діоксиду карбон (О. Германович, 2018).

Застосування мінеральних добрив підвищує врожайність у два-три рази. Агрономи активно використовують «тріаду родючості» – N, P, K, які вносять разом із добривами. Важливе значення мають й інші елементи (Ca, B, Cu, Mo, Mn та ін.). Однак надмірне використання добрив спричинює нові проблеми. Наприклад, у вигляді порушення балансу N у продуктах харчування людини і сільськогосподарських тварин (проблема нітратів, нітрітів). Осушення боліт посилює окиснювальні процеси в ґрунтах.

Розв'язанню агроекологічних проблем допоможе використання методичних принципів біогеохімії. Т. Єгорова (2017) сформулювала п'ять основних методичних принципів біогеохімічних досліджень сучасної агросфери:

1. Регіональні особливості біогеохімічних харчових ланцюгів визначати за кларками і фоновими значеннями поживних хімічних елементів у агроландшафтах та порівняльною захворюваністю біоценозів.

2. Агроекологічне біогеохімічне оцінювання харчових ланцюгів однорідних природно-антропогенних систем (біогеохімічні зони і провінції, агроландшафти).

3. Агрохімічна паспортизація і Державний моніторинг земель сільськогосподарського призначення із застосуванням біогеохімічних параметрів

і критеріїв: біомаса, продуктивність, зольність, вміст елементів-біофілів. Для оцінювання та прогнозування агроекологічних процесів розраховувати коефіцієнти біогенної і фізико-хімічної міграції поживних хімічних елементів – коефіцієнти їх біогенної акумуляції, кларки концентрації, коефіцієнти водної рухомості.

4. Біогеохімічне картування і районування земель сільськогосподарського призначення. Це пов'язане з тим, що взаємодія природних і антропогенних процесів функціонування агросфери в нинішніх умовах значною мірою нівелює зональні агрокліматичні, агрохімічні і біогеохімічні особливості земель. Методика біогеохімічного районування дає змогу оцінити та спрогнозувати наслідки екологічної небезпеки більшості хімічних елементів для живих організмів.

5. Медико-екологічний аналіз біогеохімічних харчових ланцюгів. Результати порівняльного аналізу біогеохімічного дисбалансу есенційних (поширених у живій речовині біоценозів) хімічних елементів у агроландшафтах із поширеністю відповідних фітопатологій і ендемічних захворювань населення є вагомим критерієм для формування територіальних перспектив розвитку харчової промисловості.

**Техногенез в океані.** Світовий океан виконує еколого-біогеохімічні функції біосферного масштабу. Океан – головний ланцюг колообігу води у природі; регулятор глобальних кліматичних процесів (поглинає величезні кількості теплової енергії і повільно їх віддає, оскільки теплоємність води набагато більша за теплоємність повітря); постачальник кисню водоростями і біомаси живої речовини; депо і джерело багатьох хімічних елементів та ін. Океан діє як планетарний насос – у полярних широтах він поглинає своїми холодними водами  $\text{CO}_2$ , а в екваторіальних і тропічних зонах, де вода тепла, віддає його в атмосферу. У такому процесі обміну між атмосферою й океаном беруть участь щороку 100 млрд тонн  $\text{CO}_2$ .

Науковці зосереджені на таких аспектах проблеми техногенезу у світовому океані: біологічний колообіг, мінеральна сировина, забруднення. Ці аспекти взаємопов'язані, оскільки в океан надходить величезна кількість техногенних забруднюючих речовин, що порушують його біологічний колообіг; океан є важливим джерелом хімічних елементів; шляхи техно-

генної міграції в океані різноманітні. Об'єктом для детального вивчення є взаємодії в системах «земля-океан-повітря» (Bashkin V., 2002).

Бурінням на шельфах сьогодні у світі добувають приблизно 20% нафти. За допомогою опріснювачів морської води у деяких зонах одержують воду, що придатна для вживання.

З океанської води добувають Mg, Na, K, Cl, Br,  $^2\text{H}$  (Дейтерій), планують добувати U та деякі інші елементи. Їхні запаси практично необмежені, а технології добування простіші за звичайні. Прибережно-морські розсипи містять алмази, Au, касситерит, ільменіт, рутил, циркон, монацит та інші цінні мінерали. Вивчають можливість добування на шельфах фосфоритів та глауконітових пісків. Розроблено методи добування залізо-марганцевих мінералів або руд з конкрецій (Fe, Mn, Ni, Co, Si) океанічного дна. Відкриття металовмісних розсолів у западинах Червоного моря поставило питання про можливість добування з них різних металів.

У зв'язку із зростанням використання ресурсів Світового океану виникає небезпека його забруднення. За даними ЮНЕСКО, ріки щорічно приносять у Світовий океан мільйони тонн техногенних відходів. Серед них пестициди різних класів, поліфосфати, мінеральні добрива та інші речовини; хімічних елементи (Fe, Pb, Mn, Hg, Cd, Zn, Cr, As, P та ін.), радіонукліди ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  та ін.).

Космічний моніторинг засвідчив, що майже 20% поверхні океану містить нафтопродукти. Моноплівка розлитої нафти ускладнює випаровування та проникнення кисню у воду, загрожує колообігу води, змінює клімат, знижує біологічну продуктивність океанічної екосистеми, яка має певну межу, що забезпечується біорізноманіттям усіх її трофічних ланцюгів. Людству необхідно здійснювати певні заходи по збереженню фізико-хімічних показників середовища існування живої речовини в океані.

Еколого-біогеохімічний стан техносфери емерджентно узагальнює проблеми техногенних систем біосфери усіх рівнів ієрархії (ґрунтів, мулів, кори вивітрювання, водоносних горизонтів, техногенних та сільськогосподарських ландшафтів, міст, країн, річок, морів та Світового океану).

### **Ознаки техносфери:**

1) наявність великої кількості вільної енергії за рахунок необмеженого використання природних ресурсів та енергії колишніх біосфер (вугілля,

нафти, газу та ін.), а не тільки енергії Сонця, що стає причиною енергетичної кризи та часткової зміни клімату;

2) забрудненість хімічними, фізичними та біологічними забруднювачами; наявність багатьох хімічних речовин, яких ніколи не було у біосфері, що у комплексі стають причиною погіршення здоров'я населення планети, виникнення нових захворювань;

3) скорочення площі лісів і орних земель, збільшення площ пустель;

4) порушений біологічний колообіг елементів за рахунок добування, транспортування, антропогенного розсіювання речовин та хімічних елементів у навколишнє природне середовище (шляхом спалювання, випадання кислотних дощів, перенесення техногенного пилу; з причин аварій на атомних станціях, техногенних катастроф, вивезенням твердих побутових відходів та ін.). У геохімічному контексті техносферу можна умовно порівняти із катастрофічним впливом на біосферу сотень тисяч вулканів.

На проблему усвідомлення феномену техносфери можна поглянути з іншого боку. Сучасна техніка стає самостійним середовищем – техносферою, що організована відповідно до своєї внутрішньої логіки. Це середовище не є органічною частиною природи, але воно вже починає віддалятися і від світу людини. Техносфера проникає в обох напрямках: у світ людини і світ природи. При цьому з одного боку – погіршується навколишнє природне середовище (екологічна криза), з іншого – настає соціально-гуманітарна криза відношень між людиною і технікою (техніка – підручне, людина – керівник міняються місцями).

Філософи, екологи, геохіміки та соціологи активно обговорюють концептуальні та методологічні основи теорії техносфери (М. Бердяєв, Т. Гардашук, М. Голубець, М. Кисильов, В. Ковальський, В. Корсак, В. Крисаченко, В. Кучерявий, Л. Малишева, М. Моїсєєв, Я. Мовчан, С. Мороз, О. Павлов, О. Перельман, М. Реймерс, С. Рудишин, І. Фролов, Ю. Шеляг-Сосонко, К. Ясперс, V. Bashkin та ін.). Відсутність єдності поглядів учених на трактування та змішування понять «техносфера», «соціосфера», «ноосфера» пов'язана із неоднозначним розумінням науково-технічного прогресу цивілізації з двох позицій:

1) сцієнтизму (філософська концепція, що визнає цінними знання, які можна отримати тільки за допомогою точних наук, а знання в галузі

етики і естетики, як і релігійне й богословське пізнання буття, вважає плодом уяви); сцієнтичне мислення може призвести до висновку, – все, що технічно можливе, є допустимим з погляду моралі;

2) біоцентризму (філософська концепція, яка стверджує, що людство має приділяти більше уваги живому, біології екосистем, збереженню біологічного і ландшафтного різноманіття). Біоцентризм передбачає рівноцінність усіх форм живих істот, він не визнає їхнього поділу на корисні й некорисні.

Сьогодення свідчить, що для комфортності власного життя людство створило і постійно підтримує відносно відокремлену від природних негативних впливів сферу штучного середовища. У перспективі – людина може вибудувати оптимальну модель ідеї ноосфери за В. Вернадським – Т. де Шарденом.

### **5.3. Особливості біогеохімічного районування ландшафтів, біогеохімічні провінції та ендемії**

Наукові основи біогеохімічного напрямку ландшафтознавства закладено в працях О. Гумбольдта, В. Докучаєва, В. Вернадського, О. Ферсмана, О. Перельмана, Б. Полинова, М. Глазовської.

Теорію морфологічної структури ландшафтів – поділ на фації (елементарні ландшафти) та урочища – розробили В. Полинов, М. Солнцев. Значний внесок у розвиток еколого-геохімічних досліджень антропогенних ландшафтних комплексів здійснили російські вчені О. Перельман, М. Глазовська, В. Добровольський, а також вітчизняні О. Адаменко, І. Волошин, Ф. Вольвач, В. Гетьман, В. Гринецький, В. Гуцуляк, Г. Денисик, В. Кучерявий, Л. Малишева, Б. Міцкевич, В. Некос, В. Петлін, П. Погребняк, В. Присакар, Л. Руденко, І. Смолянинова, Ю. Сущик, Ю. Тютюник, Л. Шевченко, та ін.

Людство є значною геохімічною силою, яку нині за потужністю та сумарним ефектом дії можна порівнювати із силами природи. Якщо в природі денудація (руйнування) гранітних скель відбувається зі швидкістю 1 м за 6 тисяч років, то людина за допомогою спрямованих вибухів і сучасної техніки змінює рельєф миттєво. Щорічно людство добуває

приблизно 100 млрд т мінеральної сировини, переміщує при гірничих і будівельних роботах майже 1 км<sup>3</sup> гірських порід, що сумірне денудаційній роботі річок планети по перенесенню продуктів руйнування гірських порід. Екстенсивний розвиток промисловості, починаючи з другої половини ХХ ст., слугує причиною інтенсивного накопичення у верхньому шарі літосфери хімічних елементів в концентраціях, які не властиві середовищу існування живих організмів.

У біосфері з'являється все більше антропогенно трансформованих ландшафтів, що істотно змінюють фізико-хімічні показники атмосфери (склад і температура повітря, його рух, вологість, прозорість, кислотні опади), ґрунту (природну морфологічну структуру в ході забудови й конструювання штучних субстратів, видовий склад мікрофлори, вміст гумусу та ін.), поверхневих і підземних вод (вміст кисню, рН, перевищення вмісту поверхнево-активних речовин, поліфосфатів та ін.). Усе це негативно впливає на біогеохімічний колообіг речовин і хімічних елементів.

Ландшафтно-геохімічний аналіз й оцінювання екологічного стану територій ґрунтуються на ландшафтному, геохімічному, біогеохімічному та медико-географічному підходах (Л. Малишева, 1989): за ландшафтним підходом, визначається просторова та часова організація геосистем територій, структура зв'язків; за *геохімічним* – хімічні параметри актуального та фонового стану геосистем, забрудненості території, умови міграції, сорбції, накопичення, самоочищення; за *біогеохімічним (екогеохімічним)* – реакція живих організмів на зміну геохімічного середовища за схемою «доза – ефект – наслідки»; за *медико-географічним* – реакція людини на зміну стану навколишнього природного середовища теж за схемою «доза – ефект – наслідки».

В. Вернадський вказав на залежність хімічного складу живих організмів від вмісту хімічних елементів у земній корі. За Олександром Павловичем Виноградовим (1895–1975) (учень і найближчий соратник В. Вернадського), хімічний склад ґрунтів і поверхневих вод є еволюційним чинником підбору, розподілу та мінливості живих організмів; елементарний склад організму зберігає ознаки свого походження. Під керівництвом О. Виногорова досліджені зміни хімічного складу організмів у процесі еволюції (зокрема, вміст в організмах рідкісних та розсіяних елементів).

Він запровадив у науку поняття «біогеохімічні провінції» (1938), описав пов'язані з ними біогеохімічні ендемії рослин і тварин, розвинув біогеохімічний метод пошуку корисних копалин.

Основою ландшафтно-геохімічного районування стала ідея Бориса Борисовича Полинова (1877–1952) про те, що взаємозв'язок між природними компонентами – гірськими породами (з відповідними формами рельєфу), повітрям (з його кліматичними особливостями), поверхневими та підземними водами, ґрунтом, рослинами, тваринами і мікроорганізмами здійснюється через різні форми міграції речовин і хімічних елементів (механічну, фізико-хімічну, біогенну та техногенну). На основі цього було виокремлено на поверхні планети біогеохімічні провінції.

**Біогеохімічні провінції** – області на поверхні Землі, які різняться вмістом (в ґрунтах, водах) хімічних елементів (сполук), що визначає певну біологічну реакцію місцевої флори і фауни.

Вміст елементів може бути вищим чи нижчим за біологічний оптимум. Межі поширеності специфічної флори і фауни часто збігаються із межами розвитку певних гірських порід чи геологічних формацій. Науці відома ендемічна рослинність, яка присутня на серпентинітах (метаморфічних гірських породах), вапняках, пісках, безстічних засолених ґрунтах та ін. Наприклад, буковим екосистемам і організмам, що їх заселяють, відповідає материнська порода, багата на карбонати; засоленим територіям притаманна галофітна рослинність. Розрізняють два генетично різні типи біогеохімічних провінцій (за О. Виноградовим): зональні (у межах однієї ґрунтово-кліматичної зони); інтразональні (можуть зустрічатися повсюдно).

У межах біогеохімічних провінцій спостерігається дефіцит чи надлишок тих чи інших макро- чи мікроелементів, що спричинює утворення хвороб – біогеохімічних ендемії рослин, тварин, людей.

Виявлення біогеохімічних провінцій передбачає проведення досліджень, а саме: ретельне вивчення їхніх геологічних і ґрунтово-кліматичних особливостей; з'ясування надмірного або недостатнього вмісту мікроелементів у ґрунті, воді, в кормах тварин і харчових продуктах; встановлення ступеня розповсюдження ендемічних захворювань рослин, тварин і населення; з'ясування загального вмісту і рухомих форм хіміч-



них елементів в ґрунтах, закономірностей їхнього розподілу за ґрунтовим профілем, вивчення умов і шляхів міграції. Чим більша рухливість мікроелемента, тим більша вірогідність за інших рівних умов його зв'язку із виникненням хвороби.

На основі уявлень про біогеохімічні провінції геохімік Віктор Владиславович Ковальський (1899–1984) розробив систему біогеохімічного районування територій (ландшафтів) з метою встановлення загальних закономірностей прояву біологічних реакцій усієї біоти (мікроорганізмів, рослин, грибів, тварин, людини) на таких територіях. Науковий підхід до біогеохімічного районування В. Ковальського ґрунтується на концепції єдності геохімічного середовища (порід, природних вод, ґрунтів) із фізіологічними та біохімічними особливостями організмів. Розробляючи принципи біогеохімічного районування ландшафтів біосфери (тундри, тайги, степів, пустиль та ін.), вчений виходив з таких положень:

1) існують біогеохімічні провінції – певні території геохімічної неоднорідності (мозаїчності) біосфери щодо вмісту хімічних елементів;

2) організми мають пристосовуватися до умов надлишку чи дефіциту елементів в цих регіонах; хімічний склад організмів змінюватиметься в біогеохімічних провінціях;

3) хімічна неоднорідність живого в різних біогеохімічних умовах проявляється на різних рівнях організації: біоценозу, популяції, організму, органу, тканини, клітини, молекули.

Понижений чи підвищений вміст окремих елементів в біогеохімічних провінціях може бути пов'язаний із такими чинниками:

– особливостями складу ґрунтоутворюючих порід;

– інтенсивними проявами *елювіальних процесів* – процесів руйнування або перетворення ґрунтового матеріалу водами, внаслідок чого горизонт збіднений на одні сполуки і відносно збагачений на інші (вони залишаються на місці);

– розташуванням рудних покладів; особливостями районів *аккумулятивних ландшафтів* – територій накопичення мінерального матеріалу та органічних решток (ними можуть бути підніжжя схилів, долини, впадини тектонічного походження та інші форми рельєфу різного розміру). На дні океанів, морів, озер акумуляція є важливим екзогенним процесом.

Господарська діяльність може привести до утворення антропогенних, біогеохімічних провінцій (наприклад, території з аномальним вмістом нітратів у криничній воді; території забруднення радіонуклідами після аварії на ЧАЕС).

## Принципи біогеохімічного районування ландшафтів

Основною одиницею фізико-географічного районування є ландшафт.

**Ландшафт** – конкретна територія, однорідна за своїм походженням і неподільна за зональними та азональними ознаками, має єдиний геологічний фундамент, рельєф, загальний клімат, однакове поєднання гідротермічних умов, ґрунтів, біоценозів і певну структуру.

Залежно від походження розрізняють такі типи ландшафтів: елементарний, геохімічний, антропогенний, географічний, болотний та ін.

Найменшою одиницею біогеохімічного районування є *елементарний ландшафт* (морфологічна фація) – ділянка суходолу визначеної форми рельєфу з однорідною геологічною будовою, зайнята однотипними ґрунтами та рослинними угрупованнями (наприклад, окремих схил гори, тераса річки і т. д.) (термін запровадив Б. Полинов у 1915 р.). За наявності біотичного компонента елементарний ландшафт можна прирівняти до біогеоценозу. У свою чергу, елементарний ландшафт поділяють на типи:

1) геохімічно автономний – розташований на підвищених ділянках рельєфу, тому масообмін між його компонентами відбувається відносно незалежно від сусідніх елементарних ландшафтів. Такий ландшафт елювіальний – приурочений до вододільних місцевостей, ґрунтові води залягають глибоко, речовина та енергія надходять тільки з атмосфери. Переважають процеси виносу речовин у розчиненому стані та шляхом механічного перемішування внаслідок гравітації;

2) геохімічно підпорядкований – систематично одержує з водним стоком додаткові кількості хімічних елементів. Такий ландшафт супераквальний, формується на схилах вододілів, ґрунтові води залягають неглибоко;

3) геохімічно спряжений – забезпечує зв'язок масопотоків ландшафтів, що перебувають на різних рівнях рельєфу. Такий ландшафт субаквальний займає від'ємні форми рельєфу, де переважають процеси накопичення матеріалу з двох перших типів елементарних ландшафтів.

Елементарний ландшафт володіє вихідним запасом (вмістом) хімічних елементів, що міститься у ґрунтоутворюючій породі –  $K_K$ . Цей показник для будь-якого хімічного елемента оцінюється за формулою:

$$K_K = A/K,$$

де  $A$  – кларк елемента в гірській породі, мінералі, руді і т. д.;  $K$  – кларк цього хімічного елемента в земній корі.

Для елементарного ландшафту виділяють дві основні групи індикаторних хімічних елементів, які сприяють геохімічному спряженню: елементи, що належать до першої групи, найінтенсивніше захоплюються в біологічний колообіг; до другої – у водну міграцію. Виокремлюють також типоморфні елементи, які розчиняються у поверхневих і ґрунтових водах, зумовлюють кислотно-лужні умови.

*Геохімічний ландшафт* (термін Б. Полинова, 1956) – ділянка земної поверхні, що характеризується єдністю складу, кількістю хімічних елементів та сполук. Можна вважати, що геохімічний ландшафт – це закономірно поєднані елементарні ландшафти, між якими існує певний тип міграції елементів і сполук. О. Перельман (1982, 1989) зарахував його до найменшої просторово-територіальної одиниці з метою геохімічного районування і дав таксономічну назву «план». Просторово-територіально близькі плани створюють геохімічний район, сума яких утворює *геохімічний округ*, а вони об'єднуються в *геохімічні провінції*. Отже, принципи геохімічного районування можна у першому наближенні використовувати також для біогеохімічного районування, але необхідно врахувати приріст органіки та зважати на роль і місце хімічних елементів живої речовини.

При біогеохімічному районуванні вчені виокремлюють ознаки, за якими воно буде проводитися. В. Ковальський виокремлює три ряди елементів, що відіграють різну роль в обміні речовин (т. зв. ряди Ковальського):

1) Ca, Mg, P, Fe, Cu, Co, Zn, Mo, Mn, Sr, I, F, Se – важливі для забезпечення життєдіяльності (провідні елементи);

2) Ni, V, As, Li – входять до складу організмів, але їхня роль не встановлена;

3) Ge, Ru, Hg, Pb, Ti, Ga, Bi, Sr – містяться не в усіх організмах (другорядні). Важливо дослідити співвідношення між провідними і другорядними.

В. Ковальський склав картограми різних рівнів організації біосфери, у т. ч. карту біогеохімічних провінцій території колишнього СРСР. На ній він виокремив райони поширення деяких захворювань людини і тварин, що обумовлені геохімічними властивостями ґрунтів і вод. Всього науковець виокремив чотири зони із відповідними провінціями, які характеризуються єдністю зональності ґрунтоутворення, клімату, міграції елементів і типом біологічних реакцій організмів на геохімічні фактори середовища:

1) тайгово-лісова нечорноземна зона: реакції біоти загалом обумовлені дефіцитом Ca, P, Co (на 73% усіх ґрунтів), Cu (70%), I (80%), Mo (53%), B (50%), Zn (49%); оптимумом вмісту Mn (72%); відносним надлишком, особливо у заплавах річок, Sr (15%);






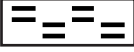


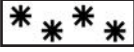





2) лісостепова і степова чорноземна зона: характерується оптимальним вмістом в ґрунтах Ca і Co (на 96% сірих лісних та 77% чорноземах), Cu (72–75%), Mn (71–75%); вміст I, Zn і Mo збалансований з іншими елементами. Іноді спостерігається дефіцит рухомого Mn;

3) сухостепова, напівпустельна та пустельна зона: підвищені рівні вмісту сульфатів, B (88%), Zn (76%), часто Sr (47%), Mo (40%), низький вміст Cu (40%), іноді Co (52%);

4) гірська зона: співвідношення і концентрації мікроелементів в гірських ґрунтах змінюються у широких межах, тому можливі різноманітні реакції організмів. Часто виявляється дефіцит I, Co, Cu, Zn, хоча можливі варіанти надлишку Cu, Zn, Co, Mo, Sr та інших елементів.

У межах кожної зони виокремлено провінції. Великі біогеохімічні зони В. Ковальський розділив на біогеохімічні провінції двох видів: *зональні провінції*, що відповідають загальним зональним характеристикам, але різняться одна від одної концентраціями та співвідношенням хімічних елементів; *азональні провінції* – їх ознаки не відповідають загальній характеристиці зони, зазвичай це геохімічні аномалії, пов'язані з добуванням руд чи техногенним забрудненням.

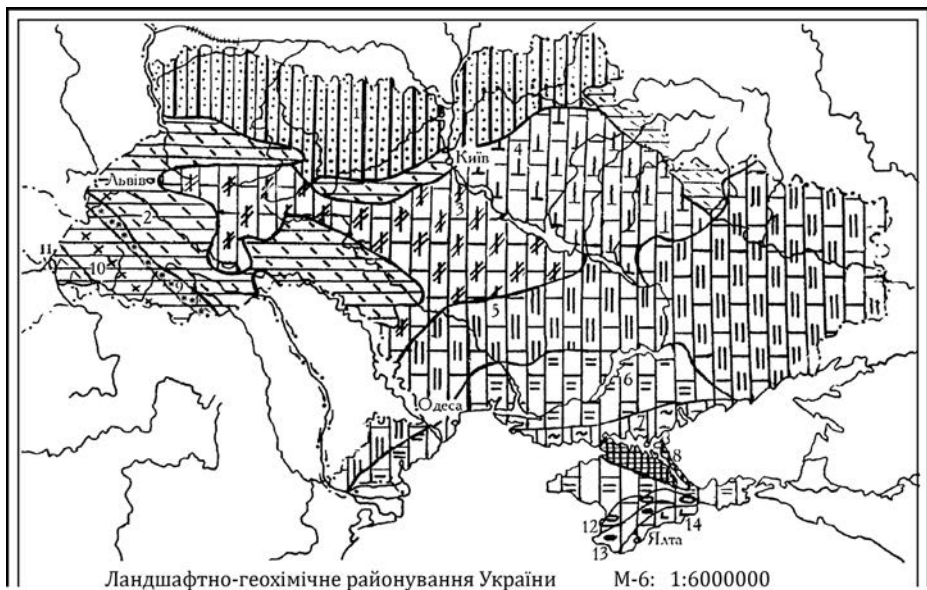
## Геохімічні ландшафти України

<b>Рівнинні ландшафти</b>		
<b>Лісові</b>		
1.		Поліські мішанолісові Н, Н – Fe O, N, P, K, Ca, Mg, Na, Co, Cu, J, F, H <sub>2</sub> O
<b>Лісостепові ландшафти</b>		
2.		Широколисто-лісостепові Н – Ca N, P, K, F
3.		Правобережно-лісостепові Ca H <sub>2</sub> O, N, P, K
4.		Лівобережно-лісостепові Ca H <sub>2</sub> O, N, P, K
<b>Степові ландшафти</b>		
5.		Звичайно-чорноземні різнотравно-злакові Ca H <sub>2</sub> O, N, P, K, Al, Fe, Mn
<b>Південностепові</b>		
6.		Південно-чорноземні тимчаково-ковилкові Ca H <sub>2</sub> O, N, P, K, Al, Fe, Mn
<b>Сухостепові</b>		
7.		Приморські темно-каштанові поливно-злакові Ca – Na H <sub>2</sub> O, N, P, Al, Fe, Mn
8.		Кримсько-Присивашські солончакові Na, Cl, SO <sub>4</sub> O, N, P, Al, Fe, Mn, Cl, SO <sub>4</sub> , Na
<b>Гірські ландшафти</b>		
<b>Карпатські</b>		
9.		Передкарпатські Н – Ca N, P, K, Ca, J
10.		Карпатські складчасті і вулканічні Н – Ca N, P, K, Ca, J, F
11.		Закарпатські Н – Ca N, P, K, Ca, J
<b>Кримські</b>		
12.		Передгірські Криму Ca H <sub>2</sub> O, N, P, K
13.		Кримські Головної гряди Ca N, P, K
14.		Субсередземноморські субтропічні ландшафти Південного берега Криму Ca H <sub>2</sub> O, N, P

Мал. 48. Типи і підтипи геохімічних ландшафтів України (за В. І. Гетьманом)

Біогенну міграцію речовин і хімічних елементів правомірно вважати одним із критеріїв типологічної класифікації геохімічних ландшафтів, що покладено в основу побудови карти геохімічних ландшафтів України (мал. 48, 49). Типи геохімічних ландшафтів України переважно відповідають зональним типам ґрунтів і рослинності (наприклад, лісові, лісостепові, степові та ін. ландшафти), але різняться особливостями рельєфу, водного і теплового балансів, біогенної міграції речовин та хімічних елементів. Зокрема, відмінності лісових і степових геохімічних ландшафтів полягають у характері умов, які створює життєдіяльність їхньої біоти. У лісах набагато більша функціональна і структурна роль рослинності у формуванні мікроклімату. Під кронами дерев лісу створюються умови меншої освітленості відносно стабільних температур вдень і вночі, слабкого вітру; збільшується вміст  $\text{CO}_2$ , водяної пари і фітонцидів у складі атмосферного повітря. Усе у комплексі позначається на перебігу біогенної міграції речовин і хімічних елементів.

У степах значна частина річної біопродукції після закінчення вегетації відмирає, а в лісах відбувається процес її накопичення у стовбурах і гілках дерев.



Мал. 49. Ландшафтно-геохімічне районування України (за В. І. Гетьманом)

Відповідно хімічні елементи (С, N, P, Ca, S та ін.) депонуються на десятки і сотні років в живій речовині.

Майже в усіх типах і підтипах геохімічних ландшафтів України для нормального продуктивного розвитку сільськогосподарських культур бракує N, P, K, що потребує внесення відповідних добрив (азотних, фосфорних, калійних). Крім того, у певних регіонах (Полісся, Карпати) дефіцитними є інші елементи (Co, F, I), що створюють можливість виникнення біогеохімічної ендемії (недокрів'я, карієс зубів, гіпотеріоз щитоподібної залози та ін.).

Натепер, коли природні і техногенні потоки речовин утворюють єдиний біогеохімічний потік, існують підстави об'єднати техногенні та природні геохімічні аномалії у *техно-біогеохімічні провінції*. Разом із промисловими відходами (викидами в повітря) і сучасними добривами в ґрунт, водні об'єкти, повітря надходять F, As, Pb, Cu, Zn, Hg, Mn, Mg, Ni, Sn, Cr та ін. хімічні елементи, які змінюють природний хімічний склад ґрунту, поверхневих і підземних вод. Отже, нині важливо враховувати вплив промислової і сільськогосподарської діяльності людини на елементний склад навколишнього середовища.

Розвиваючи цей напрям досліджень, В. Ковальський створив *геохімічну екологію* – наукову галузь на стику біогеохімії та екології, що вивчає взаємодію організмів та їх угруповань між собою та з геохімічним середовищем.

На основі дослідження проблем геохімічної екології біогеохімічних провінцій для боротьби із відповідними ендеміями широко використовують хімічні елементи (I, B, Cu, Mn, Co та ін.) в якості мікродобрив для рослин та додаткового підживлення тварин, людини.

Учені відрізняють два види концентрування організмами хімічних елементів у межах біогеохімічної провінції:

1) груповий, коли усі види рослин у даній місцевості тією чи іншою мірою накопичують певний хімічний елемент;

2) селективний, характерний для організмів-концентраторів конкретного елемента; може не залежати від рівня вмісту цього елемента у середовищі. Відомі види рослин, які концентрують певні елементи і можуть піддаватися при цьому модифікаційній мінливості (з'являються фізіологічні раси, морфи, варіації), а іноді й мутаційній мінливості (відбувається

зміна кількості хромосом). До них належать специфічна галмейна флора (активно концентрує Zn), астрагали (накопичують Se), галофітна, серпенітова та ін. На основі вивчення вмісту хімічних елементів в ґрунтах і рослинах було створено біогеохімічний метод пошуку корисних копалин.

Отже, завданням біогеохімічного районування є виявлення територій, що характеризуються нагромадженням хімічних елементів в біогеоценозах (ландшафтах) або їх розсіюванням. При районуванні основною одиницею вважають біогеохімічну провінцію.

## **Біогеохімічні ендемії**

За генезисом виокремлюють два типи біогеохімічних провінцій, саме з якими пов'язані біогеохімічні ендемії – захворювання рослин, тварин і людей:

1) біогеохімічні провінції конкретних ґрунтових зон у вигляді окремих плям чи областей, які характеризуються дефіцитом певного хімічного елемента в середовищі. Наприклад, для зон підзолистих та дерново-підзолистих ґрунтів Північної та Південної півкулі характерні біогеохімічні провінції із дефіцитом I, Ca, Co, Cu та ін. Це, у свою чергу, обумовлює супутні для цих територій ендемії (зоб, акабальтоз, крихкість кісток у тварин та ін.), які не зустрічаються на сусідній зоні чорноземів. Причина полягає у значній рухливості йонів  $I^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  та ін., які легко вимиваються з підзолистих ґрунтів;

2) біогеохімічні провінції та ендемії, що трапляються у будь-якій зоні мають інтразональний характер і виникають на фоні первинних або вторинних ореолів розсіяння речовин рудних родовищ, солених покладів, вулканогенних еманцій та ін. Наприклад, борні біогеохімічні провінції та ендемії серед флори і фауни виявлені у безстічних областях; флюороз (плямистість емалі зубів) людини і тварин – в регіонах підвищеного вмісту F (недавно діючих вулканів, родовищ флюориту і фторапатиту); молібденозис тварин – у межах родовищ Mo тощо.

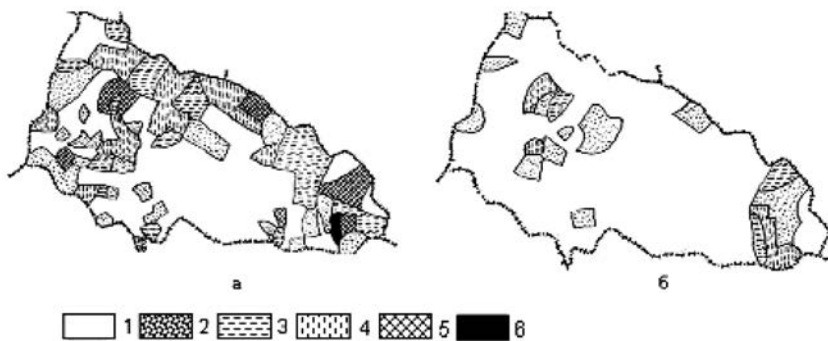
Відомо майже 30 хімічних елементів (Li, Be, B, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ca, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Se, Mo, I та ін.), з якими пов'язано виникнення біогеохімічних ендемії та діяльність організмів-концентраторів. Біота



місцевостей, де спостерігається надлишок або нестача певних елементів, разом із їжею, водою і повітрям (пилом, газоподібними речовинами) вживає надлишок (або недостатньо) макро- чи мікроелементів, що супроводжується відхиленням від норми їхнього вмісту в організмі. Це суттєво впливає на розвиток рослин, стан і функції організму людини та тварин.

Наприклад, при дефіциті Йоду (I) в їжі і питній воді виникає простий зоб у тварин і людей (мал. 50); при надлишку Se в ґрунтах – спостерігаються поява отруйної селенової флори та інші ендемії. Такий підхід дав змогу виявити нові види ендемій, спричинені як надлишком елементів (В – ентерити, Мо – подагри, Pb – невралгії, Ni – захворювання ектодермальних утворень), так і їх нестачею (Со – гіповітаміноз та авітаміноз B<sub>12</sub>). Було з'ясовано також причини т. зв. уровської (Кашина – Бека) хвороби (нестача Са при надлишку Sr), крайового ендемічного зоба (дефіцит I при одночасному дефіциті Со).

При екологічному вивченні ендемічних хвороб людини доцільно зважати не тільки на причинову залежність від природних геохімічних факторів, а й від техногенних. Зокрема, гігієністи і токсикологи, лікарі і геохіміки Львівщини досліджували вплив підвищеного вмісту Pb, Cu, Mo, Zn, Be, Ba, V у зовнішньому середовищі на стан здоров'я дітей Червоноградської промислової зони. Вивчали розподіл цих металів у ґрунтах тих населених пунктів, де було виявлено підвищену захворюваність дітей на гіпоплазію, аналізували характер накопичення цих елементів у продуктах харчування



**Мал. 50.** Біогеохімічні провінції Закарпаття за захворюваністю на ендемічний зоб. Захворюваність ендемічним зобом, %: 1 – 5–10; 2 – 10–20; 3 – 20–30; 4 – 30–40; 5 – 40–60; 6 – 60–8 (Н. Крюченко, 2009)

і біологічних середовищах (волосі, зубах, крові, м'язах, кістках). Установлено, що гірничодобувне виробництво сприяло утворенню на території Львівського вугільного басейну складної геохімічної системи, у межах якої водночас існують два різноспрямовані процеси: накопичення металів у ґрунтах та їхній винос. Отримані дані свідчать про високий ступінь забруднення токсичними металами геологічного середовища Червоноградської промислової зони, що не могло не позначитися на здоров'ї населення.

Біологічна роль хімічних елементів в організмі багатогранна. Макроелементи переважно відіграють роль пластичного матеріалу у побудові тіла, підтриманні осмотичного тиску, рН середовища, йонної рівноваги, кислотно-лужного балансу, стану колоїдів та ін. Мікроелементи разом із біологічно активними речовинами (ферментами, вітамінами, гормонами та ін.) беруть участь у процесах розмноження, росту, обміну білків, ліпідів та ін.

Біологічні функції хімічних елементів в живому організмі пов'язані здебільшого з процесами комплексоутворення між біологічними лігандами та йонами відповідних металів. Зокрема, йон металу може входити в структуру ферменту як утворювач комплексу (метал-активатор) або зв'язувати систему фермент-субстрат. Відомо приблизно 200 ферментів, до складу яких входять йони металів як комплексоутворювачі та активатори. Одночасно деякі хімічні елементи здатні блокувати активні центри ферментів (це стосується важких металів).

Вчення про біогеохімічні провінції та ендемічні захворювання дало змогу застосувати до деяких з них раціональні заходи боротьби, успішно запобігати їх виникненню та розповсюдженню. Зокрема, використовують мікродобрива (з В, Мн, Со, І та ін.) для сільськогосподарських рослин та мікродобавки для підживлення тварин і оптимізації харчування людини.

## **Важкі метали як екотоксиканти**

Поняття «важкі метали» (ВМ) має різні тлумачення. Критеріями належності до ВМ є: атомна маса (більша за Fe, 56 а. о. м.); густина (більша за 5 г/см<sup>3</sup>); токсичність; здатність до біоаккумуляції. Важких металів понад

40, серед яких особливо небезпечні – Mn, Ni, Cr, Zn, As, Cd, Pb, Hg, Cu, V. Багато мікроелементів (Fe, Mn, Si, Co, Mo, Zn) за атомною вагою належать до ВМ, але лише їхні підвищені концентрації у ґрунтах і рослинах є токсичними.

Отже, поняття «мікроелементи» і «важкі метали» взаємопов'язані. Немає отруйних ВМ, а є отруйні їх кількості. Шкідливість (або корисність) металу для біоти зумовлюють його доза (концентрація) і форма. Зокрема, токсична дія низки ВМ для гідробіонтів спостерігається вже при концентраціях 0,02–0,004 мг/л (Cu, Pb, Ag). Встановлена життєва необхідність у ВМ (у дозах мікроелементів) для ґрунтових мікроорганізмів (*Aspergillus niger* та ін.), а також конкуренція між рослинами і мікроорганізмами за деякі з них.

Недотримання гранично допустимих концентрацій (ГДК) застосування хімічних речовин в об'єктах зовнішнього середовища (табл. 5.1), ігнорування встановлених норм, неправильне зберігання і транспортування, дефіцит індивідуальних засобів захисту – усе це на практиці призводить до згубних наслідків.

Таблиця 5.1

**Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у ґрунтах (ГОСТ 3034-84, 3210-85, 42-128-4433-87)**

Речовина	мг/кг	Речовина	мг/кг
Pb	20,0	Бенз[о]пірен	0,02
Cr <sup>+6</sup>	0,05	Бензол, толуол	0,3
Hg	2,1	Карбофос	2,0
Cu	3,0	Хлорофос	0,5
Ni	4,0	Метафос	0,1
Zn	23,0	Гексахлоран	1,0
Mn	1500,0	Бромфос	0,4
V	150,0	Атразин	0,01
Cd	1,0	Фтор F <sub>2</sub>	10,0
Нітрати	130,0	Гідрогенсульфур (сірководень) H <sub>2</sub> S	0,5

Джерелами забруднення середовища ВМ (Mn, Ni, Cr, Zn, As, Hg, Cd, Pb, Fe, Cu та ін.) є стоки гальванічних цехів, підприємств гірничодобувної промисловості, чорної та кольорової металургії, машинобудівних заводів, транспорт (автомобільний, авіаційний, водний), ТЕЦ, стічні води

від господарсько-побутової діяльності. Зокрема, автомобіль з двигуном внутрішнього згоряння за свій життєвий цикл утворює масу відходів у 10 разів більше маси самого автомобіля. Якщо при цьому врахувати застосовану воду (система охолодження та мийка), то маса відходів перевищить масу автомобіля у 100 разів (О. Є. Пахомов на ін., 2014, с. 420).

Важкі метали належать до складу добрив, пестицидів і можуть надходити у водойми разом зі стоком із сільськогосподарських угідь. Зокрема, у сільському господарстві широко застосовують хлорорганічні пестициди, фосфорорганічні сполуки, препарати, що містять Cu (мідний купорос, бордоську рідину та ін.).

Присутність ВМ у довкіллі не можна пояснити лише антропогенним впливом. Зокрема, першоджерелом Hg в природному середовищі вважається глибинна мантія (В. Костік, 2019). У концентрованому вигляді Hg існує у формі мінералів – сульфідів (кіновар  $HgS$ ), хлоридів (каломель  $Hg_2Cl_2$ ), оксихлоридів ( $Hg_2ClO$ ) і ін. В Україні знаходиться одне з найбільших в світі скупчення ртутних руд в районі міста Горлівка, біля станції Микитівка – Микитівське родовище ртуті. Наявність металів у водному середовищі природно пов'язана з їхнім кларковим вмістом у конкретній біогеохімічній провінції, розчинністю їхніх солей, фізико-географічними та геологічними особливостями формування стоку, біологічною продуктивністю екосистем.

Крім того, вміст ВМ у природних водах залежить від внутрішніх гідробіологічних процесів у водосховищах, які зазвичай сприяють зниженню їхньої концентрації літом за рахунок асиміляції водною рослинністю, накопиченню восени та зимою за рахунок деструкції органічних решток. Річ у тім, що ВМ є необхідною біохімічною складовою життєдіяльності гідробіонтів – каталізаторами процесів дихання, фотосинтезу, розмноження, росту тощо.

Більшість ВМ та їхні солі – прості неорганічні з'єднання, токсичність яких обумовлена аніонами, катіонами або фізико-хімічними властивостями солі. Залежно від умов середовища (величини рН, окисно-відновного потенціалу Eh та ін.) йони ВМ можуть існувати в різних ступенях окиснення і належати до складу різноманітних неорганічних та

органічних сполук у розчиненому, колоїдно-дисперсному або завислому станах.

ВМ мають здатність до акумуляції у донних відкладах та біоті водойм, а далі мігрувати за харчовими ланцюгами екосистеми (мал. 51):



Мал. 51. Міграція важких металів харчовим ланцюгом водної екосистеми.

Якщо охарактеризувати донні відклади деяких річок України щодо вмісту в них ВМ, то науковці розташовують за числовими показниками елементи у такий послідовний ряд (О. Бедункова, 2006):

$$\text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Co}$$

У фіто-, зоопланктоні та зообентосі вміст ВМ представляє ряд:

$$\text{Zn, Mn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd},$$

а за величиною накопичення:

$$\text{зообентос} > \text{зоопланктон} > \text{фітопланктон}.$$

Концентрації ВМ у представників іхтіофауни розташовані у вигляді рядів:

1) за числовим виразом:  $\text{Mn, Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Co}$ ;

2) за величиною накопичення у тканинах організму:

$$\text{хребетна кістка} > \text{шкіра} > \text{зябра} > \text{печінка} > \text{луска} > \text{м'язи};$$

3) за величиною накопичення різними видами риб:

$$\text{щука} > \text{окунь} > \text{краснопірка} > \text{лящ} > \text{плітка}.$$

Підвищення концентрації ВМ у природних водах часто пов'язане також з іншими видами забруднення, наприклад із закисленням. Кислотні опади сприяють зниженню рН і переходу металів із сорбованого (на мінеральних та органічних речовинах) стану у вільний.

Навіть у незначних концентраціях ВМ здатні передаватися по трофічних ланцюгах і накопичуватися у гідробіонтах. Якщо концентрація ВМ перевищує життєво необхідні значення, то проявляється гальмуюча / токсична дія. Це становить потенційну небезпеку для людини, яка спо-

живає в їжу гідробіонтів (рибу, раки) з «отруєних водойм». Критерієм біологічної норми водойми слугує збереження біорізноманіття або конкретного виду гідробіонту.

**Поняття «токсичність хімічного елементу».** Хімічні елементи умовно поділяють на токсичні й нетоксичні. Токсичні елементи мають негативну дію на живі организми, яка виявляється тільки при досягненні певної концентрації, що визначається природою організму. Найтоксичніші метали розташовані у таблиці Д. Менделєєва компактно у такий спосіб (табл. 5.2).

Таблиця 5.2

**Розташування токсичних для біоти хімічних елементів у періодичній системі Д. І. Менделєєва**

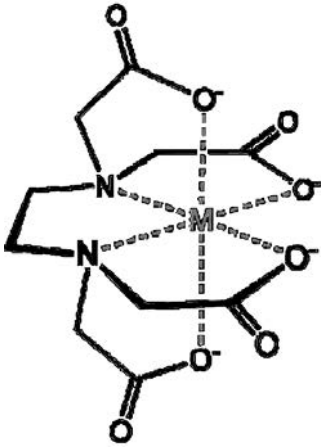
Період	Групи							
	ІВ	ІІВ	ІІІВ	ІІА	ІІІА	ІІІІА	ІVА	ІVІА
ІІ	-	-	-	Be	-	-	-	-
ІV	Cu	Zn	Ni	-	-	-	As	Se
V	Ag	Cd	Pd	-	-	Sn	Sb	Fe
VI	Au	Hg	Pt	-	-	Pb	Bi	-

Простежується закономірність – зі збільшенням заряду ядра атома збільшується токсичність елементів групи. Характеристика токсичних характеристик деяких ВМ та їхній вплив на організм людини наведено в табл.5.3.

За винятком Be, ці елементи утворюють стійкі сульфідні сполуки. Причину токсичної дії ВМ пов'язують із блокуванням ними певних функціональних груп білків (зокрема, сульфгідрильних груп) або із заміщенням у деяких ферментах іонів металів. Особливою токсичністю і поширеністю виокремлюються Hg, Pb, Be, Cd, Cr, Ni, що конкурують у процесах комплексоутворення з біофільними металами (Ca, Mg, Fe та ін.) і здатні витіснити їх з біологічно активних молекул.

### Характеристика токсичної дії деяких хімічних елементів на організм людини

Елемент	Основне джерело надходження у середовище	Шлях надходження в організм	Вплив на здоров'я людини
Fe	Промислове виробництво	З водою, їжею	Цироз печінки, захворювання кровоносної системи
Cd	Виплавлення кольорових металів, арматура, пластмаса пофарбовани сполуками Cd	З водою, їжею, повітрям	Хвороби нирок, хвороба «ітай-ітай»(анемія, остеопороз (ламкість кісток), канцерогенна дія
Mn	Виплавлення металів, добрива, рідке паливо, лінолеум, сірники, піротехнічні вироби	З повітрям	Прогресуюче ураження ц.н.с., синдром Паркінсона, пневмонія.
Cu	Промислове виробництво, спалювання вугілля, добрива, засоби захисту рослин, барвники	З водою, їжею	Гепатити, ураження легень
As	Кольорова металургія, пестициди, лікарські препарати для лікування тварин	З водою, їжею	Рак легень та шкіри, порушення функції шлунка, гонадотропна дія, інтоксикація
Ni	Промислове виробництво, нікелювання виробів	З їжею, повітрям	Бронхіальний рак, дерматити (екзема), інтоксикація, алергія
Hg	Стоки хімічних підприємств, виробництво пестицидів, спалювання кам'яного вугілля	З водою, їжею, повітрям	Інтоксикація, хвороба Мінамата, паралічі та психічна неповноцінність новонароджених
Pb	Виплавлення металів, пестициди, двигуни внутрішнього згорання, дорожній пил, ґрунт навколо підприємств	З водою, їжею, повітрям	Ураження ЦНС, печінки, нирок, мозку, статевих органів
Cr	Промислове виробництво, сплави, барвники, вогнетривка цегла	З їжею, повітрям	Бронхіальний рак
Se	Збагачення руд, спалювання вугілля	З повітрям	Депресії, запаморочення, механічна жовтуха, носові кровотечі



**Мал. 52.** Хелати (хелатні сполуки) – клешнеподібні комплексні сполуки, які утворюються при взаємодії іонів металів з полідентатними (тобто мають кілька донорних центрів) лігандами.

Небезпечні аномальні ефекти відбуваються найчастіше на клітинному та молекулярному рівнях (у вигляді порушення мітозу, гальмування дії ферментів, незворотних конформаційних змін макромолекул), що призводить до зміни швидкості метаболізму, виникнення мутацій. Токсичність дози ВМ має п'ять якісних категорій (за ступенем зростання ефекту на людський організм): без помітного ефекту, ефект стимуляції, терапевтичний ефект, токсичний ефект, летальний результат. Максимальну токсичність виявляють найактивніші хімічні частинки – координаційно ненасичені йони ВМ у вільному стані.

Хелатування вільних йонів металу різними лігандами (мал. 52) перетворює їх на стійкіші малотоксичні координаційно насичені частинки, які стають проникливими для мембран, здатними до транспортування та виведення з організму.

Зокрема, значну частку засобів сучасної фармакотерапії займають потенційні ліганди (комплекси), що зв'язують певний метал і утворюють металоферменти. Ліганди (зокрема, ліпоєва, аскорбінова кислоти та ін.) та елементи-метали можуть бути як активаторами, так й інгібіторами ферментів, що обумовлює їх суттєву роль у ензимотерапії різних захворювань. У сучасній медицині металолігандні комплекси використовують як самостійні терапевтичні агенти – необхідні компоненти раціонального харчування.

Ґрунт – важлива складова біосфери. Він виконує роль природної буферної системи, що контролює перенесення речовин і хімічних елементів в атмосферу, гідросферу та рослини. Після потрапляння у ґрунт ВМ здатні мігрувати горизонтально і вертикально, що спричинює забруднення ґрунтових і поверхневих вод. Звичайно, ВМ міцно зв'язуються у верхньому



шарі глибиною до 20 см. Проте за сильного забруднення вони можуть проникати на глибину до 160 см. Небезпека такого становища полягає в тому, що виникає загроза надходження водорозчинних форм токсичних металів у ґрунтові води. Міграція ВМ по профілю та їхнє потрапляння в ґрунтові води можлива у разі промивного режиму та кислої реакції розчинів, що фільтруються. Найбільшу міграційну здатність мають Hg і Zn, які рівномірно розподіляються в шарі ґрунту на глибині 0–20 см. Pb частіше накопичується в поверхневому шарі (0–2,5 см). Cd займає проміжне становище між ними. Міграцію ВМ обмежують процеси їхнього осадження на геохімічних бар'єрах.

Обумовлюють фіксацію ВМ у ґрунті такі процеси:

- 1) сорбція;
- 2) оклюзія (поглинання речовин із газового середовища усім об'ємом поглиначи; процес подібний до абсорбції) та спільне осадження;
- 3) утворення органічних хелатів та комплексоутворення;
- 4) мікробіологічна фіксація.

Провідну роль у фазовому розподілі ВМ у ґрунтах відіграють хімічні сполуки, які утворюють комплекси з органічною речовиною або такі, що містяться в обмінно-сорбованому вигляді у колоїдах. Вони становлять основу процесів мінерального живлення рослин, які, в свою чергу, залежать від типу ґрунтів та ландшафтно-геохімічних умов. Частка пов'язаних з гумусом важких металів значна і коливається у межах від 30 до 40%. На дерново-слабопідзолистих супіщаних ґрунтах вміст ВМ можна розташувати у такій послідовності (у напрямку зменшення):



Частка рухомих форм ВМ становить 0,2–14% від загального їх вмісту у ґрунтах. При цьому вони розташовуються у такій ряд:



Доступність ВМ для їхнього засвоєння залежить від виду рослини, ґрунтових та кліматичних умов. У деяких видів рослин концентрація ВМ може змінюватися у різних органах, а також залежить від віку рослини.

До ґрунтових факторів, які суттєво впливають на доступність ВМ для рослин, належать такі: гранулометричний склад, рН середовища, вміст органічної речовини, катіонообмінна здатність, дренаж.

Забруднення рослинної продукції важкими металами визначається як концентрацією їх рухомих форм у ґрунтовому покриві, так й інтенсивністю акумуляції кореневою системою та надземними органами рослин. Таким чином, при дослідженні забруднення ґрунту необхідно враховувати не тільки актуальні концентрації елементів, а й фізико-хімічні властивості середовища, що прямо чи опосередковано впливають на процес транслокації полютантів. Одним з таких показників є кислотність яку визначають за величиною водневого показника – рН, що відображає активність іонів водню у розчині. Кислотність ґрунту поділяють на актуальну і потенційну. Актуальна кислотність відображає міру активності  $H^+$  у ґрунтовому розчині; потенційна – кількість компонентів, які можуть у перспективі перейти з твердої фази до ґрунтового розчину.

Оскільки ВМ здатні утворювати складні комплексні сполуки з органічними речовинами ґрунту, то в ґрунтах із високим вмістом гумусу ВМ менш доступні для рослин. Обмінна ємність катіонів залежить від вмісту мінералів і складу глинистої частини ґрунту, вмісту в ньому органіки. Чим вища обмінна ємність катіонів, тим більша утримуюча здатність ґрунту щодо ВМ.

На міграцію ВМ в ґрунтах впливають такі основні чинники: наявність сполук Fe, Al, Mn; наявність алюмосилікатів і глин; наявність органічних речовин; величина рН – Eh; здатність ґрунтових мінералів зв'язувати ВМ.

Роль комплексних сполук в міграції елементів демонструє табл. 5.4.

Таблиця 5.4

#### Участь комплексних сполук металів в міграції елементів

Комплексні сполуки металів	Участь у процесах	Щорічна міграція	
		Елемент	Кількість, т
Фотосинтез			
Fe	Відновлення вуглекислоти	C	$1,4 \cdot 10^{11}$
Fe	Відновлення водню, води	H	$4,6 \cdot 10^{10}$
Fe, Mo, Co, Ti, V, Cu	Відновлення сполук Нітрогену	N	$5,0 \cdot 10^9$
Fe	Відновлення сполук Сульфуру	S	$8,3 \cdot 10^8$
Mg, Mn	Окиснення Оксигену води	O	$3,7 \cdot 10^{11}$
Процеси аеробного та анаеробного етапів дихання			
Fe, Mg, Zn, Ni, Al, Cr, Cu	Окиснення органічних речовин	C	$1,36 \cdot 10^{11}$

Для кількісного оцінювання надходження ВМ із ґрунту в рослини найчастіше використовують коефіцієнт біологічного накопичення (КБН), який визначається співвідношенням вмісту металу в одиниці маси акцептора (рослини в перерахунку на її золу) і донора (ґрунту):

$$\text{КБН} = \frac{\text{концентрація металу в акцепторі}}{\text{концентрація металу в донорі}}$$

За величиною КБН хімічних елементів види рослин значно різняться між собою. Але залежно від умов вегетації КБН для рослин одного виду також є змінною величиною. Для усіх культурних рослин КБН  $\text{Mo}$ ,  $\text{Zn} > 1$ , а  $\text{Ti}$  і  $\text{V} < 1$ .

Загальний вміст мікроелементів в рослинах обумовлений наявністю їхніх рухомих форм у ґрунтах (водорозчинних, обмінносорбованих). Тому науковці значну увагу надають не лише валовому вмісту, а й вивченню форм знаходження мікроелементів у живильному субстраті. Ряди інтенсивності накопичення деякими рослинами ВМ щодо їхнього валового вмісту в ґрунті можна розташувати у такій послідовності:

сосна –  $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr}$ ;

осика –  $\text{Pb}, \text{Ni} > \text{Zn}, \text{Cr} > \text{Cu}$ ;

хвощ –  $\text{Cu} > \text{Zn}, \text{Cr}, \text{Pb} > \text{Ni}$ .

Існує генетично обумовлена спеціалізація рослин щодо акумуляції не одного, а кількох елементів. Виокремлюють такі рослини: тонконіг лучний (*Poa pratensis* L.) – накопичує у максимальній кількості  $\text{Fe}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Pb}$  і  $\text{Zn}$ ; перстач сріблястий (*Potentilla argentea* L.) –  $\text{Mn}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Ni}$  і  $\text{Zr}$ ; пирій повзучий (*Agropyron repens* L.) –  $\text{Cu}$ ; любка дволиста (*Platanthera bifolia* L.) –  $\text{Ba}$ .

ВМ, що потрапляють у навколишнє природне середовище внаслідок діяльності людини (промисловість, транспорт та ін.), є небезпечними забруднювачами біосфери. Зокрема, значне накопичення  $\text{Pb}$  і  $\text{Zn}$  відбувається в зонах інтенсивного руху автотранспорту, вздовж автострад та в індустриальних центрах. Ґрунти у сільській місцевості містять у 10–20 разів менше  $\text{Pb}$ , ніж ґрунти міст.

Важливе значення має процес самоочищення ґрунтів, який пов'язаний з процесами сорбції, тобто акумуляції ВМ в ґрунті. При цьому ВМ

стають відносно недоступними рослинам. Для зменшення токсичного впливу важких металів на ріст і розвиток сільськогосподарських рослин на забруднених ґрунтах вносять різні меліоранти (цеоліт, торф, вапняк). Ці меліоранти у кислому середовищі (рН у межах 5,0) обмежують рухливість у ґрунті йонів  $\text{Cd}^{2+}$  і  $\text{Pb}^{2+}$ , переводять їх у зв'язані та менш доступні для рослин форми.

Уявити логіку оцінювання забруднення довкілля конкретним важким металом дає змогу такий приклад. Розбитий термометр, у якому було 20,5 г ртуті, викинули в ставок. Минуло чотири місяці, і внаслідок складних біогеохімічних процесів приблизно 5% цього небезпечного металу перейшло в розчин у вигляді солей Меркурію (II)  $\text{Hg}^{2+}$ . Визначте масу катіонів Меркурію (II) у ставку. Чи є небезпечною ставкова вода, якщо об'єм води в ставку 80 м<sup>3</sup>, а санітарна норма передбачає вміст не більше 0,01 г  $\text{Hg}^{2+}$  в 1 м<sup>3</sup>?

$m(\text{Hg}) = 20,5 \text{ г}$	20,5 г	$\longrightarrow$	$\text{Hg}^{2+}$
$w(\text{Hg}^{2+}) = 5\%$	$\text{Hg}$		
$v(\text{Hg}^{2+}) - ?$	201 г / моль		
$m(\text{Hg}^{2+}) - ?$	$m(\text{Hg}^{2+}) = 20,5 \times 0,05 = 1,025 \text{ г}$		
		$80 \text{ м}^3 - 1,025 \text{ г } \text{Hg}^{2+}$	
		$1 \text{ м}^3 - X$	
		$X = 1 \times 1,025 / 80 = 0,013 \text{ г / м}^3$ .	

**Відповідь:** вода небезпечна для здоров'я, оскільки вміст йонів Меркурію становить 0,013 г / м<sup>3</sup> і перевищує норму 0,01 г / м<sup>3</sup>.

Отже, шкідливість (або корисність), будь-якого металу для живих організмів зумовлюють його концентрація і форма знаходження у воді, ґрунті, їжі.

## 5.4. Біоіндикація

У рості і розвитку навколишнього середовища видового складу живих організмів у біогеоценозі (ландшафті) відображаються кліматичні, едафічні та інші екологічні чинники (зволоження, кислотність та аерація

грунту, термоклімат, оптимальний склад та доступність елементів живлення, освітленість, тривалість дня і ночі, місце у трофічному ланцюгу, присутність забруднювачів та ін.). Зокрема, між хімічним складом рослин і хімічним складом середовища їхнього існування (грунту, повітря, поверхневих і підземних вод) існує пряма чи опосередкована залежність, яка проявляється у вигляді: зміни видового складу, посилення або пригнічення розвитку, появи морфологічних особливостей, біоаккумуляції тих чи інших хімічних елементів.

**Біоіндикація** – оцінювання якості навколишнього природного середовища за станом її біоти.

Біоіндикація базується на спостереженні за складом та чисельністю видів-індикаторів.

*Біоіндикатори* – це група особин одного виду або угруповання організмів (рослин, грибів, тварин, мікроорганізмів), інтенсивність та кількісні характеристики розвитку яких є показником еколого-геохімічних процесів та умов середовища існування.

На користь різнопланової перспективності комплексу універсальних показників адаптивних реакцій живих організмів, визначення рівня забруднення свідчить напрям біоіндикації навколишнього середовища (для рослин – фітоіндикації).

Стенотопні види, звичайно, є кращими індикаторами, ніж евритопи. Відомі такі рівні біоіндикації екосистем:

- 1) біохімічні і фізіологічні реакції (гальмування або уповільнення процесів фотосинтезу, дихання, накопичення певних токсикантів та ін.);
- 2) анатомічні, морфологічні, біоритмічні чи поведінкові реакції (зміна забарвлення рослин або тварин; дефоліація, дефлорація – опадіння листя чи квітів; некроз – відмирання обмежених частин тканин та ін.);
- 3) біоценотичні та ландшафтні зміни (видового складу та ін.).

Зокрема, гарантом чистої води в екосистемах України можуть бути такі біоіндикатори (Г. Федорова, 2007): рослини (латаття біле і жовте, вільха чорна, верба, водокрас, тілоріз); риби (окунь, йорж, судак, щука, головень, підуст, жерех); безхребетні (личинки волохокрильця, беззубки і перлівниці).

Поширеним, доступним та ефективним методом оцінки екологічного стану атмосферного повітря є метод ліхеноіндикації в основу якого покладена властивість лишайників реагувати на ступінь забрудненості повітря. На відміну від лабораторного аналізу проб повітря, цей метод не потребує спеціального обладнання і лабораторій, та базується на візуальних та статистичних дослідженнях. Слань лишайників може бути забарвлена у такі кольори: сірий, білий, рожевий, жовтогарячий, червоний, оливковий, коричневий, чорний. Під дією  $\text{SO}_2$  слань лишайників змінює свій колір. Крім того, спостерігається деструкція, і організм через певний час відмирає. Чим більший показник ступеня покриття стовбура дерев лишайниками (ближчий до 100 %), тим чистіше повітря у районі дослідження.

Біоіндикація дає змогу отримати об'єктивну інформацію про інтенсивність процесів техногенезу в міських екосистемах, виявити пріоритетні забруднювачі середовища та їх основні міграційні потоки, а також намітити можливі шляхи оптимізації екосистем. Зокрема, лишайники використовують як рослини-індикатори для оцінювання вмісту в повітрі токсичних домішок оксидів Сульфуру і Нітрогену. Нині у межах великого міста практично неможливо зустріти ці епіфітні рослини.

Дефіцит тих чи інших елементів мінерального живлення певною мірою відображаються у зміні будови та забарвлення листків. Наприклад, в одного і того самого виду рослин Ні знебарвлює квіти, Mn надає червонуватих тонів, а Cu – блакитних. Жовті листки із зеленими прожилками – ознака надлишку Cr; при надлишку Co або Ni на листках з'являються білі плями.

П. Гнатів (2008, 2020) довів, що можна використовувати візуальне оцінювання стану листкового апарата деревних рослин скверів і парків Львова та вмісту в них зольних елементів для діагностики специфічних екологічних умов цього міста. Автор з'ясував, що зольність сухої маси листків дерев істотно зростає в умовах міста. При цьому нагромадження зольних елементів зростає у середніх і молодих листках.

На основі вивчення вмісту хімічних елементів в ґрунтах і рослинах було розроблено біогеохімічний метод пошуків корисних копалин, осно-

ваний на дослідженні хімічного складу золи організмів, видового складу, морфологічних особливостей рослинності. Дослідження О. Виноградова, Б. Полинова, О. Ковалевського, О. Саукова, Д. Малюги, Н. Петруніної та інших підтвердили наявність біогеохімічних аномалій у хімічному складі золи домінуючих видів рослин, що зростали на покладах Cu, Zn, Pb, U, Mo, Ni, B, Au (табл. 5.5).

Аналітичний спектр складу золи рослин достовірно характеризує геохімічні умови їхнього живлення і життєдіяльності, а у деяких випадках слугує індикатором місця розташування рудних аномалій, інтенсивних джерел техногенних емісій окремих елементів або екологічного стану конкретної урбоекосистеми. Зокрема, деякі види мохів чітко вказують на надлишок Cu в ґрунті (у Швеції у такий спосіб було знайдено три райони покладів цього металу). Галмейна фіалка (*Viola lutea var. calaminaria*) поширена у Європі на ґрунтах із підвищеним вмістом Zn. Смолівка кобальтова (*Silena cobalticola*) росте у Центральній Африці тільки на мідних родовищах. В Австралії (у Квінсленді) шукачі золота весною робили розвідку місцевості за наявністю білих квіток жимолості, оскільки ця рослина дає перевагу ґрунтам із підвищеним вмістом Au, Ag. Наявність у поверхневих шарах земної кори деяких груп мікроорганізмів може свідчити про присутність у надрах газів чи нафти.

Біогеохімічний метод пошуків рудних покладів доцільний у випадках, коли метод має переваги перед літохімічним методом пошуків за вторинними ореолами розсіювання. Біогеохімічний метод ефективний для застосування у таких ландшафтно-геохімічних та кліматичних зонах:

1) гумідній зоні за уповільненої денудації, де широкого розвитку набули процеси вилуговування елементів-індикаторів з елювіально-делювіальних відкладів і кір вивітрювання

2) гумідній та помірно вологій зонах, якщо вторинні літохімічні ореоли перекриті перенесеними відкладами потужністю до 40 – 80 м;

3) пустель і напівпустель аридної зони, якщо вторинні літохімічні ореоли або безпосередньо рудні зони перекриті перенесеними відкладами потужністю до 20 – 40 м;

4) заболочених рівнин і торф'яників за умов неглибокого (2 – 10 м) залягання потенційно рудовмісних корінних порід;

5) на ділянках, вкритих суцільним моховим покривом, де відбір літохімічних проб ускладнений і пов'язаний зі значними витратами;

6) на ділянках, вкритих рослинним покривом, із «сліпими» літохімічними ореолами розсіювання, верхня межа яких знаходиться на глибині не менш 1 м від поверхні;

7) на болотах (за умови їх промерзання і можливості відбору проб зимою).

Залежно від поставлених завдань біогеохімічні дослідження поділяють на регіональні (1:200000–1:100000), пошукові (1:50000–1:25000) та детальні (1:10000).

Накопичення хімічних елементів рослинами на територіях рудних покладів суттєво залежить від таких факторів (О. Ковалевський):

1) вмісту хімічного елемента у навколишньому середовищі;

2) форм перебування елемента у середовищі, що визначає його доступність для поглинання рослинами;

3) видової специфічності рослин щодо прямого, лінійно-пропорційного (безбар'єрного, концентруючого) або бар'єрного типів накопичення хімічних елементів в органах і тканинах. Однак навіть за умов високого вмісту хімічного елемента в ґрунті його накопичення в рослинах обмежується певним рівнем (бар'єрний тип накопичення встановлено для 76 хімічних елементів);

4) кількісних характеристик ступеня контакту коренів рослин з локальними джерелами надходження хімічного елемента.

Решту факторів (рН, вплив супутніх хімічних елементів та ін.) можна вважати чинниками другого і третього порядку значущості. Вплив цих факторів може бути суттєвим за умов стабільності названих вище чотирьох, що характерно для рослин поза межами територій рудних покладів. Отже, закономірності, встановлені для умов звичайного, низького вмісту мікроелементів у зовнішньому середовищі, не можуть бути поширені на умови росту і розвитку рослин за високих концентрацій, і навпаки.



**Порівняння вмісту хімічних елементів у золі рослин,  
які ростуть над родовищами, % (О. Сауков, 1963)**

Хімічні елементи	Рослини, де немає родовищ	Рослини над родовищами	Ступінь концентрації
Ванадій	$5 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-2}$	~ 100
Хром	$5 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-2}$	~ 100
Манган	$1 \cdot 10^{-2}$	10	1 000
Кобальт	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	~ 10
Нікель	$1 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-2}$	10
Мідь	$5 \cdot 10^{-3}$	$n \cdot 10^{-1}$	~ 100
Цинк	$1 \cdot 10^{-2}$	1,0	100
Молибден	$5 \cdot 10^{-4}$	$n \cdot 10^{-2}$	~ 100
Свинець	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$	100
Уран	$n \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-2}$	1 000

Науковці виокремлюють *кількісні бар'єрні характеристики* (КБХ) – константні біогеохімічні параметри видів і частин рослин щодо накопичення різноманітних руд елементів-індикаторів: Li, Rb, Cs, Si, Ag, Au, Be, Sr, Ba, Ra, Zn, Cd, U, V, Pb, As, Bi, Mo, W, Mn, F, Co, Fe. Найбільше накопичується елементів у таких анатомічних частинах рослин: корені, зовнішніх шарів корка чи кірки стовбурів дерев і чагарників, нижчих вузлах стебел злаків та ін.

Біологічні об'єкти (лишайники, мохи), які накопичують конкретний комплекс елементів за безбар'єрним типом (у 100 разів і більше за фон), рекомендовано для використання у біогеохімічних пошуках рудних покладів. Найінтенсивніше рослини поглинають доступні для надземних частин і коренів хімічні елементи (C, O, N, S, F та ін.) у формі газоподібних сполук; менш доступні форми рідкої фази. Із найменшою інтенсивністю рослини поглинають елементи, що перебувають у твердій фазі ґрунтів і гірських порід. Інтенсивність накопичення хімічних елементів із газоподібної, рідкої і твердої фаз зовнішнього середовища співвідносяться між собою як числа 300000 : 3000 : 1 (інтенсивність накопичення з твердої фази приймають за одиницю).

Отже, біоіндикаційний метод діагностики стану довкілля має низку переваг, серед яких висока чутливість і відносна дешевизна

## ЗАПИТАННЯ. ЗАВДАННЯ

---

1. Запропонуйте визначення понять «техногенез», «ландшафт», «технофільність».
2. Укажіть критерії зарахування елементів до важких металів.
3. Чому важкі метали вважають екотоксикантами?
4. Розгляньте біогеохімічні аспекти проблеми забруднення навколишнього природного середовища.
5. У працях яких вчених було закладено наукові основи еколого-геохімічного напрямку ландшафтознавства?
6. Укажіть характерні ознаки техногенних ґрунтів, техногенних мулів. Наведіть приклади.
7. Назвіть чинники, які визначають еколого-геохімічну класифікацію техногенних ландшафтів.
8. Які еколого-біогеохімічні особливості характерні для ландшафтів добування та переробки корисних копалин?
9. Назвіть типи і підтипи геохімічних ландшафтів України.
10. Охарактеризуйте проблеми біогеохімії міст.
11. Укажіть, що характерно для агроландшафтів із позицій біогеохімії.
12. Висвітліть проблему «техногенез і Світовий океан».
13. Розкрийте сутність понять «техносфера», «біогеохімічна провінція», «біогеохімічна ендемія».
14. Розкрийте сутність та принципи біогеохімічного районування територій.
15. Назвіть принципи геохімічного районування ландшафтів за О. Перельманом.
16. Висвітліть сучасне розуміння поняття «біоіндикація».

## 6. МЕТОДОЛОГІЯ ПОДОЛАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ КРИЗИ

Ще у 1809 р. біолог Жан – Батіст Ламарк писав: «Можна, мабуть, сказати, що призначення людини ніби полягає в тому, щоб знищити свій рід, попередньо зробивши земну кулю непридатною для проживання». Таке висловлювання Ж. – Б. Ламарка підтверджує сучасна статистика, яка відзначає, що щорічно в світі (В. Костік, 2019):

- втрачається  $3 \cdot 10^{10}$  т родючої землі,
- знищується  $1 \cdot 10^5$  км<sup>2</sup> лісу,
- відбувається засолення  $6 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup> орних земель,
- виробляється  $3 \cdot 10^6$  т. токсичних хімічних речовин,
- викидається в атмосферу  $3 \cdot 10^{10}$  т шкідливих речовин.

Ми живемо в епоху трьох «Е»: економіка, енергетика, екологія. При цьому екологія як наука і стиль мислення привертає все більш пильну увагу людей. Господарська діяльність людства в останнє сторіччя призвела до серйозного забруднення нашої планети різноманітними поллютантами. Повітряний басейн, природні води і ґрунт в районах великих промислових центрів часто містять токсичні речовини, концентрації яких значно перевищують ГДК. Оскільки випадки перевищення ГДК досить часті і спостерігається зростання захворюваності, пов'язане із забрудненням природного середовища, в останні десятиліття фахівці, а слідом за ними і населення стали вживати термін «екологічна криза».

### 6.1. Екологічна криза як загроза людству

З появою сучасної людини 210–200 тис. років тому почався процес соціальної еволюції на планеті, який нині виявляється як екологічна криза.

**Екологічна криза** – глибоке порушення природної динамічної рівноваги та напружений стан зв'язків людини та природи, що зумовлено невідповідністю виробничих сил і виробничих відносин у суспільстві з ресурсними можливостями біосфери. Криза є оборотним станом системи, в ході якого вона може як повернутися в нормальний стан, так і перейти в інший.

Історія цивілізації є свідченням людського бажання змінити біосферу, тобто контролювати те, що людині не належить. Потужна біогеохімічна роль людини полягає у добуванні копалин, спалюванні палива, меліорації, виснажливому для ґрунтів веденні сільського господарства, штучному транспортуванні речовин і хімічних елементів на значні відстані, створенні неприродних урболандшафтів, знищенні біорізноманіття тощо. Зокрема, нині в Україні налічується до 20 тис. родовищ 111 видів корисних копалин. Промислове значення мають 96 видів корисних копалин, серед яких: родовищ нафти і газу метану – 984, вугільних родовищ – 127, вугілля – 766, торфу – 1568, сапропелю – 274, металічних корисних копалин – 358, неметалічних – 3907, підземних вод – 1067.

З погляду характеру відносин у системі «людина– природа» людина виступає як «розумно-нерозумний паразит» (М. Реймерс): якщо брати до уваги перебіг процесу глобального руйнування середовища існування, то людина – нерозумна істота, але за декларованим намаганням збереження цього середовища – вона є розумною.

Антропогенні впливи на довкілля деструктивні, оскільки руйнують природні системи і «замінюють» біогенну еволюцію. Людство упродовж тисячоліть постійно здійснює заміну видового різноманіття природних ценозів на монокультурні агроценози (поля, рисові чеки, сади, виноградники). За таких умов темп еволюції диктує трансформована природа, а не перебіг природних явищ. Зокрема, за годину на планеті зникає два три види. Якщо не зупинити цієї тенденції, то біосфера до кінця ХХІ ст. втратить 50% видового складу флори і фауни, що спричинить руйнацію природних екосистем, докорінну зміну біологічного колообігу речовин і хімічних елементів. Такі процеси відбуваються вже сьогодні як масове розмноження окремих видів організмів, що спричиняють деградацію усталених біогеоценозів. Традиційні хвороби і паразити людини вже не стримуються природними антагоністами, а їхнє розмноження постійно вимагає нових поколінь антибіотиків та інших лікарських засобів.

Суспільству важливо встигнути усвідомити, що скорочення природного ландшафтного і біологічного різноманіття до граничного значення позбавляє стійкості середовище існування, яке не може бути відновлене

тільки шляхом створення очисних споруд чи переходу до маловідходного виробництва. Відходи утворюються в будь-якому господарському циклі і викликають прямі чи опосередковані ефекти, які не усуваються, а лише переводяться з однієї фізико-хімічної форми в іншу або переміщуються у просторі. Якби існувала реальна можливість позбутися відходів, то це було б порушенням термодинамічних законів збереження маси та енергії.

Інтенсивність споживання людством енергії та матеріальних ресурсів зростає пропорційно чисельності населення і навіть випереджає його приріст. Швидкість людської популяції можна схарактеризувати як аномальну. Загальна чисельність людей на планеті перевищує допустиму в шість разів (з погляду продуктивності біосфери та її здатності до саморегуляції гомеостазу). Така цифра визначається не біологічними потребами людини в їжі, а тиском на середовище при намаганні забезпечити якість життя. Біосфера спроможна термодинамічно виправдано прогодувати тільки один мільярд людей і при цьому безболісно для себе відновитися. Факт ХХІ ст. – природні ресурси планети є джерелом достатку лише для країн «золотого мільярда», що ускладнює шлях до ноосфери В. Вернадського.

## **6.2. Основні причини деградаційних процесів екосистем України**

Економічний розвиток України часів СРСР ґрунтувався на інтенсивно-му тривалому використанні мінерально-сировинних ресурсів, що призвело до таких наслідків: відбулося поступове виснаження надр у межах економічно виправданих глибин видобування; структура економіки зміщена у бік важкої промисловості; негативні екологічні наслідки поступово накопичилися і набули тривалого характеру.

Серед основних причин деградаційних процесів екосистем сучасної України вчені називають такі (Я. Мовчан, 2008; А. Запольський, 2004; С. Рудишин, 2013):

– зміни просторових характеристик, а саме: зменшення упродовж історичного періоду площі лісів з 50% до 17%, катастрофічно високий рівень розораності земель (55% суходолу держави), сучасне зменшення площ лісосмуг (на чверть);

- структурно-функціональні зміни екосистем. Зокрема, знищено степ як біом (збереглося в дуже фрагментованому вигляді лише 4% первинних площ), порушено та значною мірою знищено заплавні екосистеми, осушено близько 80% боліт, зазнали деградації малі річки і джерела;
- спорудження дамб і гребель на річках, що призвело до суттєвого порушення міграційних шляхів риб і знищення нерестовищ;
- надексплуатація морських ресурсів та інтродукція видів-чужинців зумовили зменшення вилову риби удесятеро за двадцять років (70-ті – 90-ті роки ХХ ст.); порушення запасів мисливських видів тварин та природних рослинних ресурсів;
- інтенсивне хімічне забруднення довкілля і формування нових біогеохімічних провінцій;
- зміни ландшафтної сфери (масштабні «іригації» степових ділянок з подальшим розвитком процесів підтоплення та засолення, розбудова гігантських промислових та енергетичних об'єктів), що прогностично пов'язано зі збідненням біорізноманіття;
- високий рівень концентрації промислових об'єктів у деяких регіонах;
- недостатність ефективних природоохоронних технологій (зворотніх систем водозабезпечення, очисних споруд, сміттєпереробних заводів тощо);
- недостатність правового й економічного механізмів, які спряють використанню екологічно безпечних технологічних процесів

Екологічні негаразди в Україні не є унікальними. Цивілізація має вчасно зрозуміти: якщо людство збереже біологічне і ландшафтне різноманіття, тим воно збереже себе. Тобто біосфері для відновлення і збалансованого розвитку системи «біосфера – суспільство» важливішими є природні біоми тайги, джунглів, степів, боліт, океану тощо, ніж урбоекосистеми (мегаполіси, сотні тисяч кілометрів автотрас тощо) та штучні агроландшафти сільськогосподарських культур.

### **6.3. Керована коеволюція як стратегія подолання глобальної екологічної кризи**

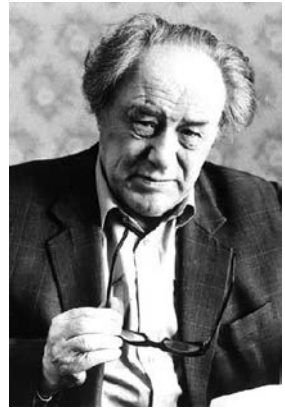
У сучасній екології часто послуговуються терміном «коеволюція» на позначення спільного розвитку людства і біосфери, який не виводить

параметри біосфери зі стану гомеостазу (динамічної рівноваги), зберігає здатність біосфери до самоорганізації і самовідновлення. Інакше кажучи, коеволуція цивілізації і біосфери забезпечує збереження людського роду як біопсихосоціального виду за умов збереження природної глобальної екосистеми – біосфери – в усьому ландшафтному і біологічному різноманітті. Ідея коеволуції обґрунтовує необхідність перебудови пріоритетів людини, тісної їх узгодженості з можливостями природи.

Коеволюційну проблематику розробляв академік М. Моїсєєв, сформулював і ввів у науковий обіг поняття «*екологічний імператив*», позначив є «... ту межу допустимої активності людини, яку вона не має права переступати ні за яких обставин».

Вчений зазначив: «Вчиняй так, як на твоєму місці могла б вчинити будь-яка інша жива істота (не завдавай шкоди природі). У ставленні до будь-кого, навіть до безвідповідальних і невдячних об'єктів, ніколи не обмежуйся прагматичним підходом, пам'ятай, що будь-яке життя – самоцінне і розвивається за власними внутрішніми закономірностями». Поняття введено за аналогією з Кантовим категоричним імперативом і в юридичному сенсі означає заборону або вимогу дотримуватися правил охорони довкілля, комплексу пріоритетних та обов'язкових до виконання обмежень діяльності людини. Вчений писав: «І я не бачу будь-яких непереборних труднощів у розроблення «кодексу взаємин виду *Homo sapiens* із рештою частиною планетарного біоценозу», точніше системи заборон, що спрямовують людську активність у певне русло» (М. Моїсєєв, 1994, с. 132). На цій основі автор сформулював стратегію керованого коеволуційного виживання людства XXI ст.

За останні десятиліття евристичні можливості концепції керованої коеволуції знайшли своє відображення у дослідженнях вітчизняних філософів і методологів екології (М. Голубець, Т. Гардашук, Д. Гродзинський, М. Кисельов, В. Крисаченко, К. Корсак, С. Рудишин, В. Шестопалов та ін.).



М.М. Моїсєєв  
(1917 – 2000) рр.

Керовану коеволюційну стратегію можна вважати теоретико-методологічним обґрунтуванням можливості існування людства в екологічно безпечному світі, оскільки стратегія формує нові принципи розвитку основних сфер життя людства XXI ст., а саме (В. Шестоपालов; С. Рудишин) :

– екологізація економіки, виробництва, політичного й управлінського життя.

Зокрема, Африканським союзом розроблено і реалізовується проєкт «Велика зелена стіна» / *Great Green Wall*. Проєкт спрямований на боротьбу з опустелюванням – створення смуги деревної рослинності, здатної стримати розширення Сахари, що покращить мікроклімат регіону. Смуга від Сенегалу до Джибуті (тобто, від Атлантики до Червоного моря довжиною 7775 км; шириною 15 км). У проєкті беруть участь 11 африканських держав; завершення 2030 рік.

– збереження біологічного та ландшафтного різноманіття;

– суттєве розширення площ лісів, скорочення орних площ шляхом впровадженню ефективних агротехнологій, нових сортів високопродуктивних рослин і тварин, розроблення автотрофного способу споживання;



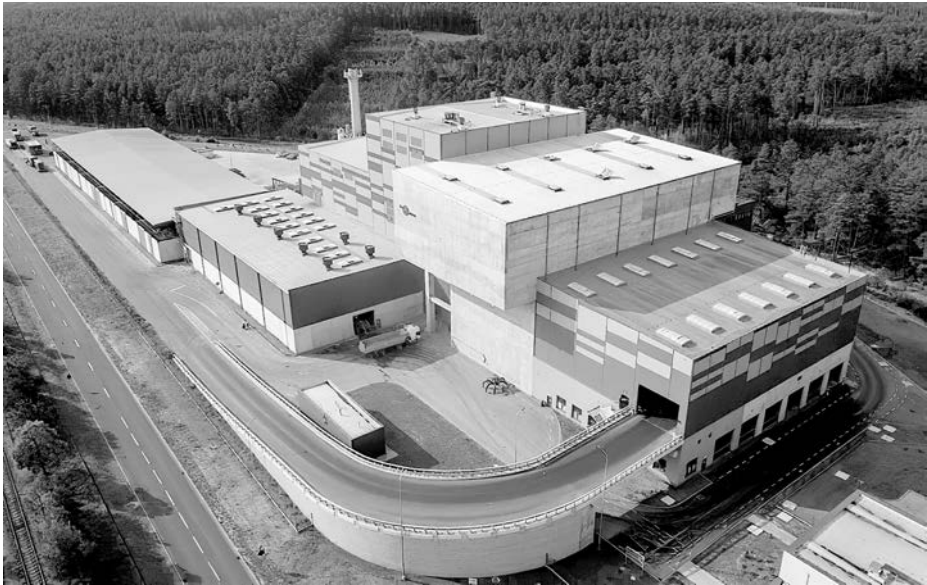
«Велика зелена стіна» / *Great Green Wall*. Африка



– створення кращих умов для подальшого пріоритетного прискорення розвитку і максимально широкого впровадження технологій, здатних мінімізувати негативний багатосторонній техногенний вплив на довкілля. Зокрема, у 2023 році на Житомирщині запрацював перший сміттєпереробний завод в Україні. Його проектна потужність – 85 тис. тонн відходів на рік. На підприємстві відбувається сортування сміття, відходи не будуть спалюватись (мал. 52). Глибина переробки – 85-95%: на виході завод отримує вторинну сировину, альтернативне RDF-паливо (*Refuse-derived fuel* – пластик, картон, гофровані матеріали) для цементних заводів і компост із органічної фракції.

– поступовий перехід від оцінювання впливу людини на навколишнє середовище і мінімізації її негативного впливу до обов’язкового покращення екологічного стану техногенно зміненої території засобами екологічно обгрунтованої реабілітації;

– організація, комплектування й розвиток природничих і гуманітарних наук на основі активного пізнання законів взаємодії біосфери і людини, постійної екологізації гуманітарних наук;



Мал. 52. Сміттєпереробний завод. Житомир

– виховання екологічно моральної, освіченої і відповідальної людини, здатної творчо змінити прагматичну шкалу цінностей сучасного життя на природовідповідну, адекватну потребам виживання і подальшого ефективного розвитку;

– введення економічних важелів для поступового розвитку системи менеджменту на засадах сталого розвитку з метою комплексного переходу всіх ланок життя на екологічні засади.

Реалізація вказаних та інших завдань потребує екологічних та біо-геохімічних знань для ефективної координації і управління процесом екологізації життя у нашому спільному домі – біосфері. Доказова наукова база еколого-геохімічних розрахунків і прогнозів ґрунтується на таких міркуваннях: біосфера негентропійна і здатна до самоорганізації; основними ознаками біосфери з позицій синергетики є неможливість установлення людством жорсткого контролю за системою та нав'язування їй шляхів розвитку і наявність систем, що самоорганізуються.

Здійснити наукове прогнозування регуляторних можливостей біосфери у підтримуванні власного гомеостазу можна за допомогою таких розрахунків:

1. Вік «зрілої» біосфери – прибіл. 200 млн років, хоча феномен життя існує на Землі майже 3,8 млрд років; рослини вийшли на суходіл 500 млн років, що поклато початок утворюванню покладів вугілля зокрема.

2. Вік цивілізації – у межах 10 тис. років (Вавилон, Трипілля). Отже, за один рік людство використовує речовину, енергію та генетичну інформацію, яку біосфера накопичила за 20 тис. років. Якщо враховувати надінтенсивний техногенез упродовж останніх 200 років, то за один рік людство спалює, знищує, необоротно трансформує і забруднює стільки, скільки жива речовина створила майже за 1 млн років. Такий шалений темп буде збільшуватися, оскільки населення планети у 2025 р. передбачається на рівні 8,5 – 9 млрд.

Будівництво майбутнього цивілізації за рахунок традиційних способів отримання продуктів харчування з суходолу та водних ресурсів викликає сумнів, оскільки споживчий кошик планети термодинамічно розрахований природою на один мільярд людей, що узагальнено в документах Міжнародної конференції ООН з проблем довкілля (Ріо-де-Жанейро, 1992). У

майбутньому тваринництво і рибальство не зможуть повністю забезпечити людство їжею (насамперед, білком) з об'єктивних причин: існує екологічне правило Ліндемана (тільки 10% енергії переходить з одного рівня трофічної піраміди на вищий, що є наслідком другого закону термодинаміки); площа океану майже у 2,5 рази більша за площу суші, проте морські екосистеми фіксують сумарну сонячну енергію удвічі менш ефективно, ніж суходіл.

Людство має перейти до автотрофності. Нині це вирощування адаптованих до несприятливих умов середовища рослин, одержання з них калорійних, з високим вмістом протеїну продуктів. Та головне – людина приречена спускатися вниз харчовим ланцюгом, зокрема до споживання білків сої, а не втрачати 90% енергії їжі на годівлю тварин.

Кожне з викладених положень потребує критичного аналізу, наукового обґрунтування і конкретизації. Але головна ідея – поступове досягнення дедалі гармонійнішого керованого узгодженого розвитку людини і біосфери, де людині належить активна природовідповідна роль.

## **6.4. Екомережа як оптимальна соціально-природна система**

Теорія і практика створення екомережі ґрунтується на здатності природних екосистем до саморегуляції, адаптивного самовідновлення та розвитку, що в сукупності підтримує гомеостаз екосистеми. Це забезпечує виключно автотрофний блок системи, який здатний виробляти органічну речовину для біорізноманіття консументів усіх інших рівнів (у т. ч. людини).

**Екомережа** – система біотопів (ділянок з біоценозами), що пов'язані у просторі на місцевому, регіональному чи інших рівнях, має правовий статус і відновлює біогеоценотичний покрив території.

Загальною тенденцією у концептуальному підході до екомережі є намагання створити оптимальну соціально-природну систему, яка розв'язувала б проблеми збереження існуючих таксонів біоти і водночас надавала б комплекс послуг населенню (соціальних, економічних, естетичних, оздоровчих та ін.).

У біогеоценотичному плані формування екомережі сприяє поліпшенню екологічного стану регіону, що виявляється у стабілізації гідрологічного режиму ґрунтів, збереженні відновлюваних ресурсів, підтримці балансу природних процесів. Фундаментальність ідеї екомережі, як і ролі біорізноманіття, полягає у забезпеченні чи відновленні біогеохімічних циклів на рівні біогеоценозів, біомів і біосфери. Річ у тім, що природний каркас території підтримують компоненти біогеоценотичного покриву, які забезпечують трансформацію сонячної енергії в енергію хімічних зв'язків органічних сполук, стабільність колообігів біогенних елементів та їх сполук, гомеостаз біосфери та її ієрархічних елементів.

Національна екологічна мережа (НЕМ) є частиною всеєвропейської природоохоронної системи і єдиною територією з ділянками заповідної та малозмінені природи, що підлягають особливій охороні, створюють передумови для раціонального природокористування та оздоровлення території (мал. 53).



Мал. 53. Національна екологічна мережа.

Головні нитки екомережі – *екокоридори* – відносно нерозривні смуги та масиви природних біотопів (збережених чи ренатуралізованих). Такі «нитки» (природні коридори), «ядра» і «вузли» (місця перетину природних коридорів) мають бути захищені буферними ділянками (існуючими, відновленими чи створеними). Ширина екокоридору залежить від статусу екомережі і може бути від десятків метрів (на локальному рівні) до кілометрів (на національному чи загальноєвропейському). Основними широтними екокоридорами, що забезпечують природні зв'язки в екологічній мережі України, є: Поліський (лісовий), Галицько-Слобожанський (лісостеповий), Південноукраїнський (степовий), а також меридіональні природні коридори, які співпадають з долинами великих річок – Дніпра, Дністра, Південного Бугу, Сіверського Дінця. Останні об'єднують водні та заплавні ландшафти – шляхи міграції численних видів рослин і тварин. Окремий природний коридор, що має міжнародне значення, формує ланцюг прибережно-морських природних ландшафтів Азовського та Чорного морів, який оточує територію України з півдня.

Робота зі створення НЕМ розпочалася ще на початку 2000-х років. Науковці розробили загальнодержавну програму формування національної екологічної мережі України, яка схвалена законом (Закон України від 21.09.2000 р. № 1989-III). Програма передбачає доведення загальної площі земель екомережі до 41,68% (25164,5 тис. га) від загальної площі території України, а площі природно-заповідного фонду – до 10,4% (6275 тис. га).

До загальної схеми екомережі України мають входити (Я. Мовчан):

1) природні регіони, в яких зосереджено існуючі чи буде створено нові об'єкти природно-заповідного фонду (Азовський, Донецько-Приазовський, Західно-Поліський, Карпатський, Кримський гірський, Нижньодністровський, Нижньодунайський, Подільський, Придонецький, Середньодніпровський, Східний Поліський, Таврійський, Центральний Поліський, Черноморський);

2) основні комунікаційні елементи національної екомережі, серед яких: а) екокоридори за географічною широтою (забезпечують природні зв'язки зонального характеру) – Поліський (зона лісів), Галицько-Слобожанський (зона лісостепу), Південноукраїнський (зона степів), Прибережно-морський (прибережна морська смуга Азовського і Чорного морів); б) меридіанальні

природні коридори (об'єднують водні та заплавні ландшафти у просторі долин великих річок) – Дніпровський (долина річки Дніпра), Дністровський (долина річки Дністер), Бузький (долини річок Західного і Південного Бугу), Сіверсько-Донецький (долина річки Сіверський Донець).

При формуванні екомережі чільне місце належить її ядру – заповідним об'єктам, що мають різне значення і статус. Найвищий статус мають *транскордонні біосферні резервати (ТБР)*, які за програмою ЮНЕСКО «Людина і біосфера» отримують сертифікат заповідника або парку (національного чи регіонального) із відповідним режимом охорони і правовим захистом.

Натепер в Україні існує шість біосферних резерватів, з яких п'ять розташовані на кордоні з іншими державами і є основою для створення ТБР. Обмін досвідом та співпраця дає можливість ефективніше розв'язувати адміністративно-організаційні, наукові, соціально-економічні та культурно-туристичні проблеми. Зокрема, на основі двох біосферних заповідників (українського і румунського) в дельті р. Дунай у 1991 р. створено ТБР «Дельта Дунаю», що має вирішальне значення для збереження водно-болотної екосистеми з унікальним складом біорізноманіття. На базі Польсько-Словацького біосферного резервату у 1998 р. за участі України було організовано трilaterальний ТБР «Східні Карпати», що займає площу 213,2 тис. га. Цінність цього об'єкта полягає у збереженні лісових екосистем, зокрема букових та ялицевих пралісів, трав'янистих типів угруповань та ін. Трilaterальний ТБР «Західне Полісся» створено на території України, Польщі та Білорусі. Цінність цього резервату полягає у збереженні ландшафтів регіону та системи карстових озер, серед яких найглибше – Світязь. Ще кілька ТБР планується створити на межі Україна–Росія, Україна–Білорусь, Україна–Молдова.

Формування екомережі реально поліпшить стан біогеоценозів України за рахунок: стабілізації гідрологічного режиму (захисту поверхневих і підземних вод), припинення ерозії, поліпшення ґрунтів, збереження відновлюваних ресурсів, підтримки балансу природних процесів, забезпечення природних шляхів міграції та поширення видів біоти, зменшення забруднення приземного шару атмосфери. Водночас можна очікувати на позитивні соціально-економічного характеру зміни: збереження історичної



спадщини та розвитку традиційно невиснажливих форм господарювання (бджільництво, риборозведення, натуральне пасовищне скотарство, садівництво); оптимізацію співвідношення площ різного використання та їх територіального розміщення в екологічному контексті; створення комфортних для здоров'я умов проживання.

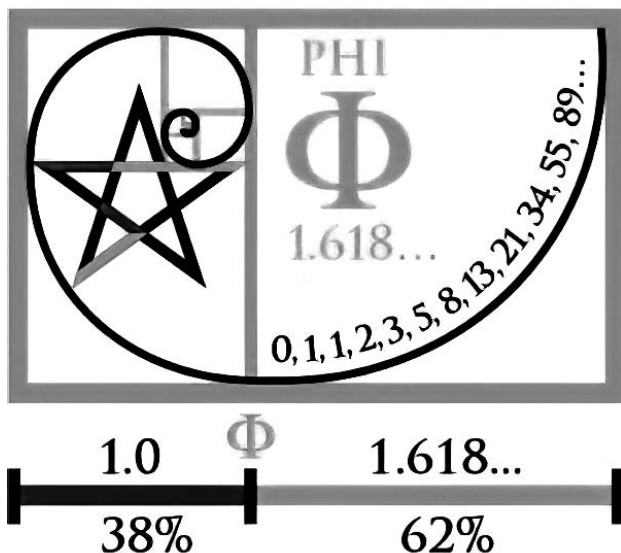
### **Принцип планування природних і культурних ландшафтів з дотриманням співвідношення «золотої пропорції»**

В останні десятиліття вчені активно обговорюють різні погляди на подолання екологічної кризи. Один із них – ідея біологічної стабілізації навколишнього середовища – за умови збереження біологічного і ландшафтного різноманіття планети в достатньому для забезпечення стабільності природи обсязі можливо повернути біосфері її стабільність. Підставою для життєздатності ідеї є твердження про те, що на Землі ще збереглися екосистеми, які не зазнали антропогенного тиску: в Канаді приблизно 65% території, Росії – 41%, Австралії – 33%, Бразилії – 28%, Китаї – 20%, в Алжирі – 64%. Тобто біота має резерви для збереження та самовідтворення. Тож завдання цивілізації – за будь-яких обставин не допустити руйнації таких центрів стабільності біосфери; зберігати біологічне та ландшафтне різноманіття шляхом формування екомережі, розвитку заповідної справи, а також переходу на викори стання переважно відновлюваних ресурсів (енергії Сонця, вітру, хвиль, тепла Землі тощо).

При плануванні співвідношення між культурними і природними ландшафтами науковці пропонують дотримуватися *концепції природної «золотої пропорції» / «золотого перетину»* (лат. *sectio aurea*, англ. *golden ratio*). – найвищого прояву структурної і функціональної досконалості цілого і його частин у природі (М. Григорук, 2017; В. Слюсаренко, 2008; І. Шевелєв, 2009; Г. Денисик, 2011; С. Рудишин, 2013; S. Rudyshyn, 2015, 2021).

«Золотий перетин» – це співвідношення між двома числами, що дорівнює приблизно 1,618 (мал. 54). Позначається грецькою літерою  $\phi$  (фі) на честь античного скульптора Фідія (сер.V ст. до н.е. – 431 до н.е.), який керував будівництвом знаменитого Парфенону і використовував золоту

## THE GOLDEN RATIO ICON™



**Мал. 54.** «Золота пропорція» рекомендує обов'язкове співвідношення між культурними й натуральними ландшафтами на планеті на рівні 62% і 38% відповідно (Г. Денисик, 2011; С. Рудишин, 2013, S. Rudyshyn, 2021). Фактично  $62 : 38 = 1,618$ .

пропорцію у своїх скульптурах. «Золота пропорція» асоціюється з послідовністю Фібоначчі, де кожне число додається до попереднього. Числа ряду Фібоначчі – 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987 і так далі, при цьому співвідношення кожного числа із попереднім поступово наближається до значення ірраціонального числа  $1,618034\dots$ . Так,  $55 : 34 = 1,617$ ;  $89 : 55 = 1,618$ .

Зокрема, молекула ДНК складається з двох вертикально переплетених між собою спіралей. Довжина кожної становить 34 А (ангстрема), ширина 21 А (1 ангстрем  $10^{-10}$  м). 21 і 34 – це цифри, наступні одна за одною у послідовності чисел ряду Фібоначчі, тобто співвідношення довжини і ширини логарифмічної спіралі молекули ДНК несе в собі формулу «золотого перетину» – 1,618.

Отже, є підстави трактувати всю сукупність генофонду біорізноманіття (т.з. генопласт) у межах біосфери як кібернетичну пам'ять і регу-



ляторний механізм підтримання гомеостазу цієї глобальної екосистеми. Стабільність екосистеми доцільно розуміти як закладену в генетичній пам'яті біорізноманіття системи здатність неухильно реалізовувати свою життєву програму, – бути стійкими до впливу зовнішніх чинників, адаптуватися до них, повертатися до нормального (стійкого) стану. Т.ч., чим більше екосистема втрачає генофонд біорізноманіття, тим більше вона втрачає здатність природного регулювання гомеостазу, «забуває» як це робиться. На нашу думку, доцільно притримуватися «золотої середини» в реалізації коеволуційної парадигми соціально-економічного розвитку існування системи «суспільство-біосфера», яка передбачає обов'язкове співвідношення між культурними й натуральними ландшафтами на рівні 62% і 38% відповідно. Це означає – на 38% планети створити біосферні резервати біотичного і ландшафтного різноманіття (зони реанімації біосфери), а на 62% – здійснювати збалансоване природокористування на штучно створених агро- та урбоекосистемах.

Відношення фактичної площі природно-заповідного фонду до площі держави («показник заповідності» України) становить 7% (2023 р.).

Для контролю за станом «реанімації» біосфери необхідно створити Міжнародний центр моніторингу, світові мережі моніторингових станцій, полігонів, регіональних і національних центрів моніторингу, міжнародних стандартних індикаторів стану довкілля і сталого розвитку.

Інший підхід – ідея «входження» людства у природні колообіги. Підставою є протилежне твердження, що біота планети вже не має резервів, усі екосистеми прямо або опосередковано деградовані (зменшене біологічне і ландшафтне різноманіття, змінений видовий склад екосистем, кліматичні умови тощо). Людству слід раціонально споживати природні ресурси з метою продовження терміну їх використання, виховання в підростаючого покоління бережливого ставлення до природного середовища.

Отже, доцільна не глобальна перебудова біосфери в ноосферу, як вважав В. Вернадський та його послідовники, а адаптація процесу ноосферогенезу в біосферу як сутності земної стратегії розвитку сфери розуму.

## 6.5. Ідея ноосфери: від зародження концепції до стратегії сталого (збалансованого) розвитку

### Ноосфера: генеза, концептуальні положення ідеї

Специфіка концепції ноосфери визначається тим, що в ній тісно переплелися природничо-наукові знання з філософськими, соціально-гуманітарними і навіть політичними ідеями.

Якщо біосфера є оболонкою Землі, яка заселена живими організмами (тобто ділянкою існування живої речовини), то під поняттям «ноосфера» (грец. νόος – «розум» і σφαῖρα – «сфера») розуміють біосферу, організовану розумною діяльністю, сферу активної взаємодії неорганічного, живого, соціального і духовного складників планети.

**Ноосфера** – частина Землі й навколопланетного простору, в якому виявляється вплив людини

Генеза провідних положень концепції ноосфери починається з античної філософії Плотіна (його ідея Ум – Розум – Дух – Нус є первісним аналогом сфери розуму), ідей німецьких філософів Г. Фехнера, Ф. Шеллінга (щодо єдності матеріального і духовного), напрацювань плеяди науковців – Ч. Шухерта, Ж. Бюффона, Л. Агассіса, О. Павлова, С. Подолінського, П. Флоренського, школи фізіократів і продовжується узагальненнями А. Бергсона, Е. Леруа, П. Тейяра де Шардена, В. Вернадського та сучасними дослідженнями Т. Гардашук, М. Голубця, В. Данилова-Данильяна, М. Кисельова, К. Корсака, В. Крисаченко, К. Лосєва, М. Моїсєєва, В. Надурака, Ф. Яншиної, Ю. Трусова та ін.

Уперше термін «ноосфера» трапляється в праці французького філософа Едуарда Леруа «Ідеалістична вимога та факт еволюції» (1927). Суть його поглядів зводиться до того, що з появою людини біологічна еволюція фактично вичерпала себе, тому за біосферою іде ноосфера. Тобто подальша еволюція може здійснюватися суто духовними засобами ми – через промисловість, суспільство, мову, інтелект тощо. Саме так, на думку Е. Леруа, біосфера переходить у ноосферу.

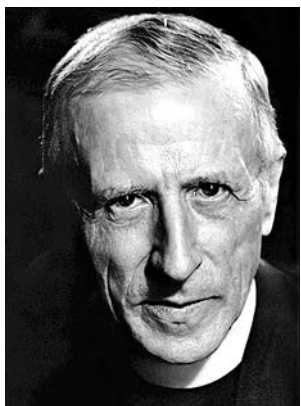
Французький філософ, учений (палеонтолог, антрополог, археолог) і католицький теолог П'єр Тейяр де Шарден (*Pierre Teilhard de Chardin*) (1881–1954) засвідчив ключове значення соціального чинника в розвитку сфери розуму. Об'єднання суспільних утворень в один світовий організм він визначав як необхідну умову, етап у становленні ноосфери. Актуальним є зауваження, що, незважаючи на дуже тісне географічне і психологічне взаємне проникнення народів, люди продовжують залишатися ворожими один одному або принаймні відособленими один від одного. Причина криється у відсутності єднання на глибшому, духовному рівні. Через це, по суті, маємо: «Людський мільйон, стандартизований на заводі... Кристал замість клітини. Мурашник замість братерства. Замість очікуваного стрибка свідомості – механізація, яка ніби неминуче впливає з тоталізації...» – писав П. Тейяр де Шарден у праці «Феномен людини» (1956). Це є порушенням правил ноогенезу. Якщо велика «машина людства» породжує тільки матерію, значить вона працює на зворотному ході. Вона має продукувати дух. Вихід учений вбачав у любові, яка за своєю суттю здатна скріпити нову єдність.

У достатньо чіткому і глибоко аргументованому вигляді висновки про особливу роль людської діяльності загалом та розуму зокрема викладено в паризьких лекціях В. Вернадського («Нариси з біогеохімії», 1934). Він наголошував, що в нашу геологічну епоху, у психозойну еру – еру розуму, з'являється новий геохімічний чинник першорядного значення. Упродовж останніх двох десятків тисяч років геохімічний вплив свідомості й колективного розуму людства, що охопив з розвитком землеробства зелену живу речовину, став надзвичайно інтенсивним та різноманітним. Людина ввела в структуру планети нову форму дії живої речовини на обмін атомами між живою речовиною і неживою матерією. Якщо раніше організми впливали на історію тільки тих атомів, які були потрібні для їх росту, розмноження, харчування, дихання, то людина розширила це коло, впливаючи на елементи, необхідні для техніки і створення цивілізованих форм життя. Рівновагу в міграції елементів, яка встановилася за геологічні часи, порушує розум і діяльність людства.

Саме під впливом цих лекцій-роздумів В. Вернадського вчені Е. Леруа та П. Тейяр де Шарден розбудували власні концепції ноосфери. Так,

П. Тейяр де Шарден передбачав можливість розростання ноосфери до розмірів Всесвіту. Та безсумнівним він вважав, що врештешт настане етап, коли свідомість (ноосфера) відокремитися від своєї матеріальної матриці, щоб, як пише автор, «мати можливість усією своєю силою перебувати в Богові-Омезі». У цьому й полягатиме «кінець світу», передбачений пророками та переосмислений ученим і теологом П. Тейяром де Шарденом.

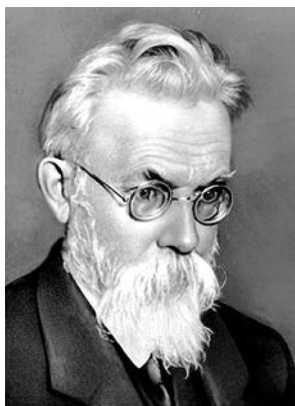
### Фундатори ідеї ноосфери



П. Тейяр де Шарден  
(1881 – 1954)



Е. Леруа  
(1870 – 1954)



В. Вернадський  
(1863 – 1945)

Погляди на біосферу і перетворення її на ноосферу набули значення концепції в 60-ті роки ХХ ст. і пов'язані з ім'ям В. Вернадського. Утім публікації багатьох вітчизняних дослідників наукової спадщини вченого часто були некоректними або мали багато неточностей. М. Голубець зазначає, що майже кожен дослідник намагався дати власне тлумачення поняття «ноосфера» або взагалі замість наукового аналізу використовував «модний» термін для осучаснення публікації. Терміном «ноосфера» часто називали все, що стосується до розуму, розумової діяльності, охопленою ним сфери і навіть до суспільно-політичних формацій.

Ідеї, думки та емпіричні висновки, які дали змогу В. Вернадському сформулювати уявлення про ноосферу, він опрацював ще змолоду, проте термін «ноосфера» вперше вжив у 1936 р., посиляючись на ідею Е. Леруа:

«Він глибше розвинув мою біосферу. Ноосфера утворилася в постплеоценову епоху – людська думка охопила біосферу і змінює всі процеси по-новому, в результаті чого активна енергія біосфери збільшується».

Жива речовина біосфери, за В. Вернадським, є творцем і носієм т. зв. біогеохімічної енергії, яка в такій кількості не існує в жодній іншій оболонці Землі. Розвиваючи це положення у праці «Наукова думка як планетне явище», він зазначав: «У межах живої речовини в останнє десятитисячоліття знову створюється і швидко зростає у своєму значенні нова форма цієї енергії, ще більша за інтенсивністю». Тому В. Вернадський назвав її «енергією людської культури», або «культурною біогеохімічною енергією», зазначаючи, що саме вона сприяє еволюції біосфери в ноосферу.

*Передумови становлення ноосфери (за В. Вернадським).* Становлення сфери розуму потребує, на думку вченого, певних передумов: 1) повного заселення планети; 2) глобального об'єднання населення; 3) свободи наукової думки, пошуку й зростання наукового знання, яке супроводжується моральною досконалістю, та перетворення цього знання на могутню геологічну силу.

Вже немає місця на земній кулі, де не ступала б нога людини; за рахунок штучно створеного середовища та використання додаткової енергії ойкуменою стала вся планета і навколопланетний простір. Згідно із законом конкурентного витіснення Г. Гаузе, конкуренція між видами на одній території тим сильніша, чим види ближче за потребами у споживанні кормових ресурсів та просторі проживання. Заради свого існування людина усуває або знищує всіх біологічних конкурентів за природні ресурси, називаючи при цьому їх «ворогами». Проте зауважимо, що до появи людини на Землі не було шкідливих жуків, бур'янів чи некорисних копалин. Вони існують тільки в уяві людини.

Об'єднання населення планети в один дієвий світовий організм почалося ще на зламі XIX–XX ст., а нині цей процес триває у вигляді глобалізації. Поряд з усіма «плюсами» глобалізації щодо створення єдиного інформаційно-економічного простору є й «мінуси»: поглиблення прірви між розвинутими країнами «золотого мільярду» та рештою світу, культурна уніфікація, культивування в міжлюдських відносинах необмеженого індивідуалізму, егоїзму тощо. Крім того, сцієнтичне мислення стає дедалі

більше екологічно небезпечним, оскільки не передбачає приборкання матеріальних запитів, стверджує у свідомості перевагу матеріального над духовним.

Концепція ноосфери В. Вернадського не позбавлена суперечностей, зокрема твердження про більшу цінність освоєної, окультуреної природи над природою незайманою (людина чомусь називає її «дикою природою»). У процесі створення ноосфери, коли починає переважати геологічна роль людини, замість первісної природи виникають нові форми культурних рослин і тварин, а колишні мешканці суходолу зникають. Цей процес В. Вернадський визначив як одну з ознак переходу біосфери в ноосферу й оцінив позитивно: «Культурні види рослин і тварин мають для нас той самий і, мабуть, навіть більший інтерес, аніж дика жива природа». Центральною ідеєю представників «глибинної екології» (А. Нейс, Д. Сессінс, Б. Діввал) є право кожної форми життя на нормальне функціонування в екосистемі. Український природоохоронець В. Борейко на користь самоцінності об'єктів дикої природи і визнання її прав висуває декілька доказів: теологічний, утилітарний і деонтологічний, згідно з яким дика природа існує сама для себе, має внутрішню цінність, а отже, і моральний статус, що є підставою для володіння природними правами. В умовах сучасної екологічної кризи суперечливість висновків В. Вернадського про дику природу очевидна.

В. Вернадський доводив неминучість створення сфери розуму. Критикуючи поширені думки про можливість загибелі цивілізації, він зазначав, що вони є наслідком недостатньо глибокого проникнення в сутність планетарних процесів, які формувалися упродовж мільярдів років і не можуть бути зупинені людською історією. Біосфера обов'язково перейде в ноосферу, цей геологічний процес надзвичайно глибокий у своїй основі. З огляду на це В. Вернадський дійшов висновку, що цивілізація «культурного людства» не може перерватися і знищитися, оскільки вона постає формою організації нової геологічної сили, що утворилася в біосфері. Отже, ноосфера передбачає кращі умови життя. Сучасний стан природи (антропогенне забруднення біосфери, озонові «діри», знищення біорізноманіття тощо) свідчить про суперечливість цього висновку.

Уявна суперечливість долається у світлі синергетичної парадигми, при розгляді біосфери як самоорганізуючої системи, яка у своєму становленні

позбавлена цілеспрямованості. Академік М. Моїсеєв у книзі «Універсум. Інформація. Суспільство» пояснює, що механізми саморозвитку неминуче призводять до криз динамічні системи, тобто до біфуркацій, які змінюють характер розвитку, або по-іншому – змінюють «канал еволюції». Передбачити, в якому напрямку надалі розвиватиметься система, пройшовши точку біфуркації, неможливо. Очевидно, що саме в такій точці перебуває сучасна біосфера, тому існують декілька варіантів її подальшого розвитку. Один із них – шлях до розвиненої ноосфери, коли розум людства, суспільство гармонійно взаємодіятимуть з біосферою; інший – екологічна катастрофа, загибель цивілізації, що так само є цілком природним явищем.

М. Моїсеєв зазначав, що людство вже неодноразово стикалося з важкими кризами, але механізми самоорганізації завжди допомагали йому знайти вихід та зберегти себе в складі біосфери. Проте сутність процесів, які відбувалися, людство не усвідомлювало. Для біосфери загалом вихід із кризи буде знайдено – вона надалі розвиватиметься, але для людства це може стати кінцем історії. Гіпотетично можна припустити, що природою від початку закладений такий принцип: якщо еволюція йтиме шляхом, що загрожує їй деградацією, то автоматично вступає в дію механізм знищення фактора збурення цих негативних процесів (зокрема людини) та перехід в інше русло.

За концепцією В. Вернадського, в умовах розвиненої ноосфери людський розум за допомоги науки здобуде могутність, аби керувати всіма планетними процесами і природою в т. ч. М. Моїсеєв зазначає, що управління такою складноорганізованою системою, як «суспільство–природа», навіть суто технічно, неможливе. Розум не здатен зробити світовий процес керованим, підпорядкованим єдиній, всеосяжній ідеї. Його завданням може бути не керування, а спрямування природних процесів самоорганізації в бажане русло розвитку. М. Моїсеєв назвав такий процес «принципом керманіча»: прагнучи досягти необхідної гавані, керманіч (лоцман) не може розраховувати лишень на власні сили, він забор'язаний максимально використовувати сили природи (течії, вітру тощо) і, звичайно, не спрямовувати корабель усупереч потоку. В суспільному житті діє аналогічний принцип: насамперед слід зрозуміти природні тенденції розвитку, тільки за допомогою цього знання, заради самозбереження і життя на планеті

можна подолати труднощі розвитку. Людині варто вести мову не про керування планетарними процесами і біосферою, а про спрямування свого розвитку відповідно до природних законів, при цьому не порушуючи їх.

Отже, в концепції ноосфери з часом виявилися деякі суперечності, що спонукало до її подальшого розвитку науковцями. Натепер існує різноорієнтований спектр тлумачення ноосферних ідей – від ноосфери-утопії до ноосфери як руйнівної техносфери і аж до найвищого її апофеозу – ери майбутнього людства.

Концепція ноосфери припускає, що замість сформованої за 3,5 млрд років найскладнішої кібернетичної системи – біосфери, впроваджуватиметься система, розроблена людиною. Для цього потрібно вивчити і знати природні закони побудови та еволюції біосфери, інакше братися за глобальне перетворення безглуздо і є злочином проти Природи.

Системна екологічна криза, що охоплює всі аспекти буття людини і природного середовища, пов'язана з різким прискоренням процесу перетворення біосфери на перехідну біосферно-ноосферну цілісність – початкову стадію становлення ноосфери. На цій стадії на перший план виступають нові сутності організованості – інформаційні взаємодії і процеси керування. У коло таких фундаментальних проблем переходить найактуальніша – проблема біогеохімічної циклічності. Побудова нових форм ноосферної організованості потребує управління природно-антропогенними біогеохімічними потоками речовини, енергії та інформації.

Доцільно розрізнити трактування ноосфери як утопії та її реальний стан. Особливістю утопій як ідей узагалі є те, що в міру наближення до втілення в них виявляються приховані суперечності. Виникає необхідність подолання утопії, насамперед через розмежування бажаного і сушого в ній, ціннісних і онтологічних уявлень про реальність. Саме це, на думку І. Резанова, стосується вчення про ноосферу в тій його частині, де воно утопічне. До того ж В. Вернадський ніде й ніколи не називав свою гіпотезу ноосфери вченням. Отже, існує вчення про біосферу і гіпотеза (ідея) ноосфери.

Ноосфера у В. Вернадського постає не тільки певним етапом еволюції біосфери в її взаємодії з розумом, а й своєрідним гуманістичним ідеалом, етапом історії людства, коли реально почнуть реалізовуватися певні мо-



ральні цінності, які закладені в більшості відомих етичних учень і донині вважалися неосяжними. Від часів В. Вернадського наука здійснила прорив людини в космос, створила комп'ютери, трансгенні організми, нанотехнології та ін. Ці та інші досягнення внесли свої корективи в розуміння світу та оцінку того, що відбувається на Землі. Зазначимо, що В. Вернадський у своїх висновках виходив з результатів глибокого теоретичного дослідження наявного на той час матеріалу, явищ дійсності, тому його узагальнення щодо ноосфери слід оцінювати виважено.

Отже, біосфера є матеріальною базою для формування ноосфери. Розум, віра та діяльність людини – це канал, через який відбувається еволюція біосфери в ноосферу, що потребує появи типу людини якісно нового рівня відповідальності за перебіг планетарних біогеохімічних процесів, людини з новими параметрами духовності. Для успішного керування штучними екосистемами людині доцільно задіяти наукові, освітні, етнічні, культурні надбання цивілізації. Зміни в людині є не наслідком творення ноосфери, а її визначальною передумовою, без якої сфера Розуму ніколи не реалізується.

Нині серед педагогів і психологів поширена думка про можливість заміни антропоцентричного мислення на екоцентричне шляхом навчання і виховання молоді. Такі наміри потребують чіткого категоріального філософського і природничо-наукового окреслення антропоцентризму і екоцентризму.

В усіх фахових підручниках екологічні фактори поділяють на біотичні, абіотичні та антропогенні. Отже, передбачається, що біотичні і антропогенні чинники мають різну природу. Наукове ядро всіх біологічних знань – принцип «ДНК-мітоз». Людина неспроможна знищити феномен життя, оскільки не вона започаткувала матричний принцип збереження і передачі генетичної інформації; проте людина спроможна на вбивство іншої людини (це внутрішньовидова боротьба, яка заперечує виживання виду); використання вогню, зброї, технічних засобів (це відокремлення від природи, а не адаптація); утворення сміття після своєї життєдіяльності і знищення власної екологічної ніші (цього не робить жодна тварина). Тільки людина здатна робити щось біологічно безглузде, наприклад конкурс зачісок, голосування за визнання мови рідною чи побудову АЕС. Отже, усі

гасла змінити антропоцентризм на екоцентризм – благі наміри, оскільки потрібно позбавитися всієї духовної і матеріальної культури.

Біосфері не потрібен людський захист (вона завжди термодинамічно знаходила і знайде вихід з кризового чи катастрофічного стану), але екологічна ніша людства потребує її заступництва. Зокрема, *екологічна катастрофа на планеті вже була* – це поява кисню в атмосфері, що привело до розподілу організмів на аеробів і анаеробів, розмежування аеробного й анаеробного типів дихання навіть у межах цілого організму.

Людина за визначенням антиекологічна, але вихід є, оскільки вона здатна це усвідомити. Це дає підстави для сподівань на позитивний результат при спрямуванні навчально-виховного процесу на формування у молоді елементів екологічно доцільної поведінки у вигляді активної діяльності зі збереження і збалансованого відтворення природи. Таким чином, ідеал ноосфери П. Теяра де Шардена – В. Вернадського конструктивний, оскільки надає людству надію і заперечує ідеологію «кінця історії», але нині можна говорити лише про побудову техносфери і стверджувати про можливість трансформувати ідею ноосфери в концепцію сталого (збалансованого, *sustainable development*) розвитку.

## **Сталий розвиток (sustainable development): стратегія, цілі**

У 50–60-х рр. ХХ ст. розвиток цивілізації пов'язували лише з економічним прогресом та зростанням економічної ефективності. На початку 70-х рр. у зв'язку з незбалансованим розподілом прибутків та зі зростанням кількості бідних у країнах, що розвиваються, питання соціальної справедливості були визнані такими ж важливими, як і питання зростання економічної ефективності. Крім того, зростаюче споживання природних ресурсів призвело до деградації довкілля, екологічної кризи, що негативно вплинуло на здоров'я людей. Реальною загрозою стала проблема «меж зростання» (*The Limits to Growth*), на яку у 1972 році звернув увагу Римський клуб. Завдяки цьому була проведена принципова різниця між поняттями «зростання» (*growth*) та «розвиток» (*development*).

Термін «сталий розвиток» з'явився у 1980 році, коли була опублікована «Всесвітня стратегія охорони природи» (ВСОП), підготовлена Міжнародною спілкою охорони природи (МСОП). Ця стратегія висунула принципово нове положення: збереження природи нерозривно пов'язане з питаннями розвитку. Розвиток суспільства має відбуватися за умови збереження природи. Поняття «сталий розвиток» почали широко застосовувати після публікації у 1987 році звіту Міжнародної комісії з довкілля та розвитку «Наше спільне майбутнє», підготовленого під керівництвом Г. Х. Брундтланд. Концепція сталого розвитку набула провідного статусу після Конференції ООН з довкілля та розвитку (1992, м. Ріо-де-Жанейро) і була відображена в прийнятому на конференції Порядку денному на XXI століття.

Словосполучення сталий розвиток є перекладом з англійської – *sustainable development* – означає «розвиток, який підтримується», «збалансований розвиток». Згідно зі стратегією сталого розвитку, політика життя цивілізації повинна розроблятися так, щоб вона враховувала економічний, екологічний та соціальний аспекти, а досягнення цілей в одній із сфер не стримувало прогресу в іншій. Отже, основою сталого розвитку є економічні та екологічні інтереси суспільства. Порушення рівноваги між ними впливає на погіршення якості життя (мал. 55).



Мал.55. Сталий розвиток має три складові: екологічну, економічну та соціальну.

25 вересня 2015 року 193 держави-члени ООН на Саміті зі сталого розвитку в Нью-Йорку одностайно прийняли глобальну програму сталого розвитку, що *містить 17 цілей*, яких світ має досягнути до 2030 року (мал. 56): 1. Подолання бідності. 2. Подолання голоду, розвиток сільського господарства. 3. Міцне здоров'я і благополуччя. 4. Якісна освіта. 5. Гендерна рівність. 6. Чиста вода та належні санітарні умови. 7. Доступна та чиста енергія. 8. Гідна праця та економічне зростання. 9. Промисловість, інновації та інфраструктура. 10. Скорочення нерівності. 11. Сталий розвиток міст і громад. 12. Відповідальне споживання і виробництво. 13. Пом'якшення наслідків зміни клімату. 14. Збереження морських ресурсів. 15. Захист відновлення екосистем суші. 16. Мир, справедливість та сильні інститути. 17. Партнерство заради сталого розвитку.

**Сталий розвиток** (*sustainable development*) – керований розвиток суспільства, коли економічне зростання, матеріальне виробництво і споживання відбуваються в межах, які дозволяють екосистемам відновлюватися, поглинати забруднення і підтримувати життєдіяльність теперішніх та майбутніх поколінь.

## ЦІЛІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ 2030



Мал. 56. Цілі сталого розвитку (ЦСР).

Визначення сталого розвитку дає підстави для окреслення чотирьох ключових елементів цього терміну: 1) необхідності враховувати потреби нинішнього та майбутніх поколінь; 2) необхідності встановлення обмежень на використання природних ресурсів; 3) необхідності справедливого розподілу прав та обов'язків між нинішнім та майбутніми поколіннями; 4) комплексний підхід до питань навколишнього середовища та соціально-економічного розвитку. При цьому вимога охорони навколишнього природного середовища є ключовим елементом у концепції сталого розвитку.



Україна, як і інші країни-члени ООН, приєдналася до глобального процесу забезпечення сталого розвитку. встановлення стратегічних рамок національного розвитку України на період до 2030 року започатковано процес адаптації Цілей сталого розвитку. Кожну глобальну ціль розглядають з урахуванням специфіки розвитку як держави, так і конкретного регіону.

*«Мислити – глобально, діяти – локально»* – девіз сьогодношньої історії. Національні ЦСР слугуватимуть основою для інтеграції зусиль, спрямованих на забезпечення економічного зростання, соціальної справедливості та раціонального природокористування. До процесу визначення національних ЦСР долучилося фахівці за напрямками, що відповідають тематичним сферам ЦСР, – науковці, урядовці, дипломати, економісти, демографи, медичні працівники, екологи, освітяни, лідери недержавних організацій та інші представники громадянського суспільства.

З урахуванням причинно-наслідкових зв'язків генеральною метою стратегії сталого розвитку є збереження людства, а генеральним завданням – збереження умов, при яких може існувати і розвиватися людство, тобто збереження біосфери та локальних екосистем.

Сьогодні немає альтернативи концепції сталого розвитку.

## Роль і місце знань з екології та біогеохімії в реалізації стратегії сталого (збалансованого) розвитку

Екологічні проблеми – проблема людства, а не біосфери. Людина – розумна за визначенням (*Homo sapiens L.*), Природа – мудра, знає краще (закон екології). Біосфера – наш дім, хазяїн-годувальник, ми – розумні консументи. Обираємо природовідповідну поведінку на основі системних екологічних знань.

Екологічні знання є видом наукових знань і способом перетворення дійсності, що визначає наступні головні завдання сучасної екології в біогеохімічному дискурсі:

1. *Формування наукового світогляду* на основі біоекологічних знань, які відображають природничо-наукову картину світу. Таке завдання обумовлено тим, що свобода світогляду й віросповідання в процесі демократизації суспільства породила хвилю звернення людей до містики, астрології та інших псевдонаукових проявів культури. Умовою формування наукового світогляду є перетворення біоекологічних знань у погляди, а поглядів – на переконання. В результаті вивчення біогеохімії формуються переконання в тому, що: жива й нежива природа мають єдину матеріальну основу – хімічні елементи; між живою й неживою природою існує постійний взаємозв'язок у вигляді біогеохімічного колообігу, обміну речовини, енергії та інформації; для живої природи характерна складна підпорядкованість рівнів організації її систем (молекулярний – клітинний – організмівий – популяційно-видовий – екосистемний – біосферний); тільки біологічні системи (на відміну від неживої природи) здатні до саморегуляції, обміну речовин й самовідтворення за матричним принципом (нуклеїнова кислота – білок – ознака).

2. *Формування біоекологічного мислення.* Людству XXI століття доцільно усвідомити – абсолютна цінність природи полягає не тільки в її корисності, а у тому, що без неї неможливе існування людини як біологічного виду *Homo sapiens L.* Природа має існувати заради неї самої. Біосфера – наш хазяїн, захисник і годувальник, функціонує за власними законами, а ми – розумний консумент, здатні це усвідомити і коеволюціонувати природо відповідно.

Для розуміння взаємозв'язків у природі необхідні ґрунтовні екологічні знання. Важливість біогеохімічної складової екологічних знань для сталого розвитку людства не потребує окремого доведення, оскільки життєдіяльність людини можлива лише в певному вузькому діапазоні параметрів довкілля, які відповідають тільки біологічним особливостям організму (а не соціальним, культурним чи релігійним). Людина помре через 3 хвилини без кисню повітря, без води – через 5–7 діб, без їжі – через більш тривалий час. Кисень і їжу дають людині і тваринам тільки рослини, які мають десь рости. Відмерлі рештки організмів розкладаються (мінералізуються) бактеріями та грибами, і атоми знову включаються в біогеохімічний колообіг. Отже, біоекологічний аспект стає визначальним при вирішенні найважливіших науково-політичних проблем існування людства – продовольство і екологічна безпека.

3. *Вивчення ландшафтного і біологічного різноманіття.* На думку науковців на Землі існують від 5 до 30 млн видів живих організмів, але поки описано близько 1,7 млн. Звідси, дотичне завдання – запобігання скороченню біологічного і ландшафтного різноманіття під впливом людської діяльності шляхом створення об'єктів природно-заповідного фонду (національних природних парків, біосферних резерватів, заповідників, ботанічних садів, зоологічних парків та ін.), а також переходу на використання переважно відновлювальних ресурсів (енергії Сонця, вітру, хвиль, тепла Землі). Різноманітність живих організмів підтримує гомеостаз (динамічну сталість) сучасного стану біосфери. Збереження біологічного і ландшафтного різноманіття є обов'язковою умовою сталого розвитку. Висуваємо екологічне *гасло для сталого розвитку*:

***«Збережемо біологічне і ландшафтне  
різноманіття, то воно збереже й нас!»***

4. *Теоретичне і практичне завдання біоекології* – забезпечення людства продовольством, ліквідація голоду, покращення якості і безпечності харчування, стимулювання сталого органічного сільського господарства.

Таке завдання обґрунтовується тим, що біоекологічні знання є науковою базою усіх програм досліджень і технологій екобезпечного виробництва продуктів харчування (зокрема, на частково забруднених радіонуклідами територіях, при визначенні можливостей, ризиків використання пестицидів і мінеральних добрив, вивчення продуктивності фотосинтезу, азотфіксації).

З цими головними завданням безпосередньо пов'язані конкретні, зокрема.

5. Вивчення угруповань мікроорганізмів, які здійснюють біогеохімічні цикли в біосфері, з метою зрозуміти реагування екосистем на поточні зміни клімату. У цьому контексті визначити порогові значення, за яких втрата мікробного біорізноманіття погіршує нормальне функціонування екосистем у природі.

6. Дослідження трансформації властивостей ґрунтів під впливом пірогенних чинників для розробки наукових підходів до відновлення лісових екосистем у після пожежний етап розвитку. Адже після пожеж змінюються поверхневі горизонти ґрунтів, знижується кількість поживних елементів у ґрунті (згорає гумус, відбуваються зміни рН, вміст обмінних катіонів, валових і рухомих форм N), накопичуються важкі метали.

7. Дослідження шляхів забезпечення здоров'я населення; можливостей продовження тривалості життя людей; подолання ендемій в біогеохімічних провінціях; суттєве скорочення кількості смертей та захворювань внаслідок забруднення довкілля небезпечними хімічними та радіоактивними речовинами.

Отже, екологічні знання в біогеохімічному дискурсі набувають нового сенсу, стають філософією і засобом збереження, продовження і розвитку людської цивілізації.

## **ЗАПИТАННЯ. ЗАВДАННЯ**

---

1. Чи може людина знищити життя на Землі? Аргументуйте.
2. Чи є людина вершиною біологічної еволюції? Яка мета еволюції?
3. Чому людину називають біопсихосоціальною істотою?



4. Поясніть поняття «екологічна криза».
5. Вкажіть основні причини деградаційних процесів екосистем України.
6. Охарактеризуйте сучасні погляди на шляхи виходу з екологічної кризи.
7. Як Ви розумієте поняття «коеволюція біосфери і суспільства»?
8. Чому потрібно зберігати біотичне і ландшафтне різноманіття для забезпечення якісного існування людини на планеті?
9. Поясніть принцип планування природних в культурних ландшафтів з дотриманням співвідношення «золотої пропорції» 62:38.
10. Доробок яких учених XIX та XX ст. сприяв розвитку ідеї ноосфери?
11. У чому сутність ідеї нарощування площі екомережі в Україні?
12. Чи існують суперечливі моменти в концепції ноосфери В. Вернадського?
13. Концепція сталого розвитку. Цілі. Коротка характеристика
14. Роль і місце екологічних знань в реалізації стратегії сталого розвитку.
15. Поясніть девіз сталого розвитку «Мислити – глобально, діяти – локально».

## ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Термін «біосфера» вперше згадано у працях:

- а) В. Вернадського;
- б) Е. Зюсса;
- в) Е. Геккеля.
- г) Ж. Ламарка;
- д) О. Гумбольдта.

2. Поняття «біокосна речовина» означає:

- а) речовину, що утворилася внаслідок взаємодії живої і неживої речовини;
- б) речовину, що є продуктом життєдіяльності організмів;
- в) речовину, в утворенні якої живі організми не брали участі;
- г) радіоактивну речовину.

3. Умови для появи життя на Землі сформувалися приблизно (млрд років тому):

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4;
- д) 5.

4. Скільки відсотків поверхні земної кулі займає Світовий океан:

- а) 31;
- б) 41;
- в) 51;
- г) 71;
- д) 81.

5. Укажіть вміст кисню в тропосферному повітрі (%об.):

- а) 21;
- б) 19;
- в) 18;
- г) 78.

6. Найменшою кількістю атмосферних опадів характеризуються області суходолу:

- а) аридні;
- б) семіаридні;
- в) гумідні;
- г) екстрагумідні.

7. Найбільшою кількістю атмосферних опадів характеризуються області суходолу:

- а) аридні;
- б) семіаридні;
- в) гумідні;
- г) екстрагумідні.

8. Укажіть, які з перелічених речень описують синергетичні закони функціонування природних екосистем:

- а) системам не можна нав'язувати шлях розвитку, для них існує декілька альтернативних шляхів розвитку;
- б) різноманітність системи є передумовою початку створення чогось нового;
- в) в особливих станах нестійкого середовища (точках біфуркації) антропогенні дії можуть впливати на природні процеси;
- г) майбутній стан системи організує, формує, змінює сучасний її стан;
- д) усі є синергетичними постулатами.

9. Взаємозумовлений комплекс живих та біокосних компонентів, що пов'язані між собою обміном речовини, енергії та інформації, називають:

- а) симбіозом;
- б) фотосинтезом;
- в) біогеоценозом;
- г) гомеостазом;
- д) трофічним ланцюгом.

10. Здатність екосистеми протистояти змінам середовища і зберігати стан динамічної рівноваги – це:

- а) сукцесія;
- б) гомеостаз;
- в) алелопатія;
- г) пристосування.

11. Укажіть чинники, що належать до едафічних:

- а) кліматичні умови;
- б) водний режим;
- в) ґрунтові умови;
- г) повітряний режим.

12. Відношення середнього вмісту елемента в даній системі до його середнього вмісту в земній корі називають:

- а) геохімічним показником;
- б) бар'єрною функцією;
- в) кларком концентрації;
- г) коефіцієнтом розсіювання;
- д) поглинальною здатністю.

13. Кларки макроелементів менші ніж (% від маси тіла):

- а) 1;
- б)  $10^{-2}$ ;
- в)  $10^{-6}$ ;
- г)  $10^{-3}$ .

14. Укажіть межі кларків мікроелементів (% від маси тіла):

- а) 1; г) від  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$ ;  
б) від 1 до  $10^{-1}$ ; д) від  $10^{-6}$  до  $10^{-9}$ .  
в) від  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$ ;

15. До органогенних елементів належать:

- а) Al; г) Fe;  
б) Si; д) H.  
в) K;

16. Укажіть елементи-органогени, що становлять майже 98% загального хімічного складу живих організмів:

- а) O, Si, N, P; г) O, S, N, H;  
б) O, Si, N, H; д) O, Si, Al, Fe.  
в) O, C, N, H;

17. Укажіть чотири елементи, що становлять основу загального хімічного складу земної кори:

- а) O, Si, N, P; г) O, S, N, H;  
б) O, Si, N, H; д) O, Si, Al, Fe.  
в) O, C, N, H;

18. Кларки рідкісних елементів у земній корі становлять:

- а)  $10^{-8} \leftrightarrow 10^{-6}$ ; г) 0,01  $\leftrightarrow$  0,1;  
б)  $10^{-6} \leftrightarrow 10^{-4}$ ; д) 0,1  $\leftrightarrow$  1.  
в)  $10^{-4} \leftrightarrow 10^{-2}$ ;

19. Організми поглинають переважно:

- а) більш важкі ізотопи;  
б) більш легкі ізотопи;  
в) усі разом.

20. Відношення кларка елемента в живій речовині до його кларка в літосфері називають:

- а) біофільністю елемента;  
б) коефіцієнтом біологічного поглинання (КБП);  
в) біоаккумуляційною здатністю;  
г) коефіцієнтом біологічного накопичення (КБН).

21. Важкими металами прийнято називати елементи, що мають атомну масу вище:

- а) 26;
- б) 36;
- в) 46;
- г) 56;
- д) 76.

22. Приблизно 80% запасів азоту зосереджено у:

- а) земній корі;
- б) океані;
- в) живій речовині;
- г) атмосфері.

23. Найбільше біолітів кремнезему утримує:

- а) листя дерев;
- б) хвоя;
- в) кора;
- г) плоди;
- д) гілля.

24. Блакитний колір крові у деяких видів безхребетних зумовлений наявністю в її складі:

- а) Pb;
- б) Zn;
- в) Cu;
- г) Mn;
- д) Cd.

25. Океанічна вода містить найбільше аніонів:

- а)  $S^{-2}$ ;
- б)  $I^{-}$ ;
- в)  $F^{-}$ ;
- г)  $Cl^{-}$ ;
- д)  $Ca^{-2}$ .

26. В океанічній воді найбільше катіонів:

- а)  $K^{+}$ ;
- б)  $Ca^{2+}$ ;
- в)  $Fe^{2+}$ ;
- г)  $Na^{+}$ ;
- д)  $Al^{3+}$ .

27. Діатомові водорості накопичують у собі:

- а)  $SiO_2$ ;
- б)  $CaCO_3$ ;
- в)  $MnO_2$ ;
- г) S;
- д) P.

28. Радіолярії накопичують у собі:

- а)  $SiO_2$ ;
- б)  $CaCO_3$ ;
- в)  $MnO_2$ ;
- г) S;
- д) P.

29. Найбільший вміст Оксигену у:

- а) земній корі;
- б) морській воді;
- в) живій речовині;
- г) атмосфері.

30. Набільшу біофільність має хімічний елемент:

- а) O;
- б) H;
- в) C;
- г) N.

31. Йонний потенціал Картледжа більше 12 мають елементи:

- а) Fe, Al;
- б) Ca, Mg;
- в) S, N;
- г) K, Na.

32. Йонний потенціал Картледжа 3 ↔ 12 мають елементи:

- а) Fe, Al;
- б) Ca, Mg;
- в) S, N;
- г) K, Na.

33. Укажіть назву різновиду організмів, що має дуже вузький ареал поширення:

- а) гетеротрофи;
- б) автотрофи;
- в) редуценти;
- г) ендеміки;
- д) консументи.

34. Автотрофи – це:

- а) організми, які утворюють органічну речовину з неорганічної;
- б) організми, які споживають готову органічну речовину;
- в) істоти, які живляться за рахунок споживання живої тканини господаря;
- г) організми, які вбивають інші організми і живляться ними.

35. Укажіть визначення гетеротрофів:

- а) організми, які утворюють органічну речовину з неорганічної;
- б) організми, які споживають готову органічну речовину;
- в) істоти, які живляться за рахунок споживання живої тканини господаря;
- г) організми, які вбивають інші організми і живляться ними.

36. Укажіть назву організмів, що живляться живим або мертвим органічним матеріалом:

- а) консументи;
- б) продуценти;
- в) коменсали;
- г) детритофаги.

37. Живі організми, що живляться готовими органічними речовинами і здійснюють їх кінцеву мінералізацію, – це:

- а) консументи;
- б) коменсали;
- в) детритофаги;
- г) редуценти.

38. Область на поверхні Землі, що є відмінною за вмістом хімічних елементів у ґрунті, воді й інших середовищах, називають біогеохімічною:

- а) конгломерацією;
- б) провінцією;
- в) комплексом;
- г) державою;
- д) ландшафтом.

39. Первинну продукцію у біологічному колообігу створюють:

- а) редуценти;
- б) гетеротрофи;
- в) консументи;
- г) автотрофи.

40. Ділянки земної кори, в яких на коротких відстанях відбувається різке зменшення інтенсивності міграції хімічних елементів та їх накопичення, називають геохімічними:

- а) провінціями;
- б) бар'єрами;
- в) зонами;
- г) концентраторами;
- д) акумуляторами.

41. Геохімічна робота живої речовини в біосфері ви являється в:

- а) мобілізації з геосфери біофільних і супутніх хімічних елементів із подальшим їх концентруванням у біосфері;
- б) колообігу хімічних елементів і мінеральних речовин у біосфері;
- в) синтезі (шляхом фотосинтезу і хемосинтезу), накопиченню і трансформації органічної речовини; створенні нових тіл;
- г) усіх зазначених процесах.

42. Укажіть діапазон хвиль фотосинтетично активної радіації (ФАР, нм) сонячного світла, який забезпечує процес фотосинтезу:

- а) 300–600;
- б) 400–700;
- в) 280–750;
- г) 400–500.

43. Зазначте, в якій фазі фотосинтезу виділяється кисень:

- а) світловій;
- б) темновій;
- в) у двох фазах.







59. Найбільш токсичні сполуки дає елемент:

- а) Pb;
- б) Hg;
- в) Cd;
- г) усі зазначені елементи;
- д) жоден із зазначених елементів.

60. Укажіть основну причину виникнення біогеохімічної ендемії:

- а) ультрафіолетове опромінення;
- б) промерзання ґрунту;
- в) посуха;
- г) дефіцит мікроелементів;
- д) збільшення вологості повітря.

61. Ендемічний зуб зазвичай спричинює недостатнє споживання людиною:

- а) Cu;
- б) Zn;
- в) Co;
- г) J;
- д) F.

62. Флюороз у людини може спричинити надлишок у їжі та воді:

- а) Cu;
- б) Zn;
- в) Co;
- г) I;
- д) F.

63. Зменшення товщини озонового екрана позначиться на збільшенні такого захворювання людини, як:

- а) рак гортані;
- б) рак шкіри;
- в) рак органів чуття;
- г) рак крові.

64. Відношення щорічного видобування елемента до його кларку в земній корі називають:

- а) техногенною інтенсивністю експлуатації надр;
- б) геохімічною продуктивністю земної кори;
- в) деструктивною активністю елемента;
- г) технофільністю;
- д) техногенним геохімічним тиском.

65. Якщо в живому організмі середній ваговий вміст певного елемента перевищує його вміст у середовищі більш ніж на 10%, то такий організм вважають:

- а) концентратором цього елемента;
- б) багатим на цей елемент;
- в) накопичувачем елемента;
- г) поглиначем елемента;
- д) споживачем елемента.

66. Зазначте найбільш значущий чинник балансу колообігу Сульфуру:

- а) дегазація земної кори;
- б) антропогенні викиди у вигляді  $\text{SO}_2$ ;
- в) вивітрювання осадових порід;
- г) виділення  $\text{H}_2\text{S}$  бактеріями;
- д) рух сульфатно-содових вод до поверхні ґрунту.

67. Обчисліть, яку технофільність має Ферум, якщо щорічний обсяг його видобутку  $3,1 \cdot 10^8$  т, а кларк у земній корі – 5,1:

- а)  $(1,6 \leftrightarrow 1,7) \cdot 10^{-8}$ ;
- б)  $(1,4 \leftrightarrow 1,5) \cdot 10^{-7}$ ;
- в)  $(6,0 \leftrightarrow 6,2) \cdot 10^{-7}$ ;
- г)  $(6 \leftrightarrow 7) \cdot 10^{-8}$ ;
- д)  $(6 \leftrightarrow 7) \cdot 10^{-9}$ .

68. Еколого-геохімічну класифікацію техногенного ландшафту визначають:

- а) природний ландшафт (тропіки, тундра чи напівпустеля мають свою геохімічну специфіку);
- б) особливості водної міграції;
- в) рельєф, геологічні особливості (гори, рівнини, райони вапняків, гранітоїдів та ін.);
- г) усі зазначені чинники.

69. Укажіть процеси, що зумовлюють фіксацію важких металів у ґрунті:

- а) сорбція;
- б) оклюзія (поглинання речовин з газового середовища усім об'ємом поглинача; процес подібний до абсорбції) та спільне осадження;
- в) утворення органічних хелатів та комплексоутворення;
- г) мікробіологічна фіксація;
- д) усі зазначені процеси.

70. Які хімічні препарати знищують бур'яни:

- а) інсектициди;
- б) ратициди;
- в) фунгіциди;
- г) гербіциди.

71. Укажіть хімічні препарати, які використовують для знищення комах:

- а) інсектициди;
- б) ратициди;
- в) фунгіциди;
- г) гербіциди.

72. Основною причиною випадання кислотних дощів є:

- а) надходження в атмосферу оксидів Феруму;
- б) надходження в атмосферу оксидів Нітрогену та Сульфуру;
- в) надходження в атмосферу оксидів Нікелю;
- г) надходження в атмосферу оксидів Кадмію.

73. Оберіть правильне визначення групи особин одного виду або угруповання організмів (рослин, грибів, тварин, мікроорганізмів), інтенсивність та кількісні характеристики розвитку яких є показником еколого-геохімічних процесів та умов середовища існування:

- а) біорізноманіття;
- б) біоіндикатори;
- в) біорепери;
- г) біологічний індекс.

74. Укажіть тип ландшафту, який практично зник унаслідок антропогенного втручання в екосистеми України:

- а) напівпустелі;
- б) ліси;
- в) лісостеги;
- г) степи.

## ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК

**Абіогенез** (грец. *a* – не, *bios* – життя і *genesis* – походження) – гіпотеза, що життя виникло на Землі з неживої матерії.

**Абісаль** (грец. *abyssos* – бездонний) – екологічна зона (водне середовище та світ живих організмів) на дні Світового океану; характеризується відсутністю сонячного світла, постійною низькою температурою (нижче 2 °С), обмеженістю джерел живлення, бідністю тваринного світу.

**Автотрофи (автотрофні організми)** (грец. *autos* – сам і *trophē* – їжа) – організми, що синтезують органічну речовину з неорганічних сполук шляхом фотосинтезу (за допомогою енергії Сонця – фотоавтотрофи) або хемосинтезу (за рахунок енергії хімічних реакцій – хемоавтотрофи).

**Агроландшафт** (грец. *agros* – поле і нім. *Landschaft* – місцевість) – ландшафт, основу якого становлять сільськогосподарські угіддя та лісові насадження, зокрема лісосуруги та інші захисні насадження.

**Аероби** (грец. *aēr* – повітря і *bios* – життя) – організми, які здатні існувати тільки у кисневому середовищі.

**Алювій** (лат. *alluvio* – нанос) – відклади, перенесені водою.

**Анаероби** (грец. *an* – не, *aēr* – повітря і *bios* – життя) – організми, які здатні існувати і розвиватися в середовищі без кисню.

**Аридна зона** (лат. *aridus* – сухий) – зона пустель і напівпустель. Бактеріальне вилужування – вибіркоче добування хімічних елементів з багатоконпонентних сполук шляхом їх розчинення мікроорганізмами у водному середовищі.

**Біогенна (біологічна) міграція** – міграція (колообіг) хімічних елементів та їхніх сполук, яка здійснюється за участі живої речовини. Біогеохімічна система – об'єкт або сукупність об'єктів, які умовно виокремлюються і піддаються теоретичному або експериментальному вивченню.

**Біогеохімічні провінції** – області на поверхні Землі, які різняться вмістом (в ґрунтах, водах) хімічних елементів (сполук), що визначає певну біологічну реакцію місцевої флори і фауни.

**Біогеохімія** (грец. *bios* – життя, *gē* – земля і хімія) – системна наука, що вивчає хімічний склад живих організмів, участь живої речовини і продуктів її розкладу в процесах міграції, розподілу, розсіювання та накопичення хімічних елементів у земній корі, тобто геохімічні процеси в біосфері за участі живої речовини.

**Біогеоценоз** (грец. *bios* – життя, *gē* – земля і *koinos* – загальний) – сукупність угруповань рослин, грибів, тварин, мікроорганізмів (**біоценозу**) і певної ділянки земної поверхні (**біотопу**), які пов'язані між собою обміном речовин, енергії та інформації; екосистема у межах фітоценозу, яка стійко підтримує біогенний колообіг речовин.

**Біоіндикація** – оцінювання якості навколишнього природного середовища за станом її біоти.

**Біоліти** (грец. *bios* – життя і *lithos* – камінь) – гірські породи і мінерали, утворені з решток організмів, наприклад вапняки (молюскові, форамініферові, коралові тощо), крем'янисті породи (діатоміти, спонголіти, радіолярити), викапне вугілля, торф та ін.

**Біом** (грец. *bios* – життя) – сукупність біогеоценозів конкретної природно-кліматичної зони, яка характеризується типом рослинності, кліматом, ґрунтом, гідрологічними умовами (тундра, тайга, савана, пустеля, океан та ін.).

**Біосфера** (грец. *bios* – життя і *sphaira* – куля) – ділянка поширення життя на Землі, склад, структура та енергетико-інформаційні параметри якої визначаються минулою і сучасною діяльністю живих організмів; охоплює населену організмами верхню частину літосфери, гідросферу і тропосферу.

**Біоценоз** (від грец. *bios* – життя, *koinos* – загальний) – сукупність популяцій різних видів, що населяють той чи інший **біотоп** (ділянку суші або водойми з однотипними умовами існування). Біоценоз разом з біотопом утворюють екосистему (**біогеоценоз**).

**Великий (геологічний) колообіг** – колообіг абіотичного характеру, рушійною силою якого є тектонічні процеси та сонячна енергія.

**Вивітрювання** – процес механічного руйнування та біогеохімічної зміни гірських порід і мінералів під впливом різноманітних агентів (повітря, температури, ґрунтових та поверхневих вод, організмів і продуктів їхньої життєдіяльності).

**Відновлення** – реакція приєднання електронів атомами, молекулами або йонами, що супроводжується зниженням їхнього ступеня окиснення.

**Галіди** – солі галогеновмісних кислот: HF, HCl, HBr, HI.

**Галіт** – 1) NaCl; мінерал класу хлоридів; утворюється при осадженні у замкнутих водоймах, а також як продукт згону на стінках кратерів вулканів; 2) осадова гірська порода, що складається здебільшого з мінералу галіту (інша назва – кам'яна сіль).

**ГДК (гранично допустима концентрація)** – показник безпечного рівня вмісту шкідливих речовин у довкіллі; максимальна кількість шкідливої речовини в одиниці об'єму або маси у водному, повітряному чи ґрунтовому середовищах, що практично не впливає на здоров'я людини.

**Гексахлоран (гексахлороциклогексан)** – токсичний інсектицид контактної, кишкової та фумігантної дії, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>Cl<sub>6</sub>; нині заборонений до виробництва та застосування; належить до «чорної дюжини» найтоксичніших речовин.

**Геохімічна класифікація хімічних елементів** – класифікація елементів на основі спільних закономірностей поведінки в геологічних процесах, тобто за ознакою їх геохімічної подібності.

**Геохімічний бар'єр** – ділянка земної кори, в якій на короткій відстані відбувається різке зменшення інтенсивності міграції хімічних елементів, унаслідок чого вони концентруються. За механізмом формування виділяють три основних типи геохімічних бар'єрів (як природних, так і техногенних): механічні, фізико-хімічні, біогеохімічні.

**Геохімія** (грец. *gē* – земля і *хімія*) – наука, що вивчає поширення, розвиток і процеси міграції хімічних елементів та їхніх стабільних ізотопів на Землі.

**Гербіциди** (грец. *herba* – трава і *caedo* – б'ю) – різновид пестицидів; хімічні препарати (або їх комбінації), які використовують для боротьби з небажаною рослинністю.

**Гідрологічний режим** – характеристика стану розподілу та переміщення води у межах певної ділянки чи всієї Землі.

**Гідросфера** (грец. *hydōr* – вода і *sphaira* – сфера) – переривчаста водна оболонка планети, яка становить сукупність морів, океанів, континентальних вод (у т. ч. підземних), льодовиків; займає 2/3 поверхні земної кулі.

**Гіпергенез** (грец. *hyper* – надміру і *genesis* – походження) – сукупність процесів хімічного і фізичного перетворення мінеральних речовин у верхніх частинах земної кори і на її поверхні (за температури нижче 80 °С) під впливом атмосфери, гідросфери та живих організмів.

**Глобальне радіаційне забруднення** – радіаційне забруднення поверхні Землі і Світового океану, що сформувалося внаслідок радіоактивних випадань за масового випробування атомної зброї, аварій на крупних радіаційних об'єктах, наприклад на Чорнобильський, Фукусіма-1 та інших АЕС.

**Гомеостаз** (грец. *homoios* – подібний і *stasis* – стояння) – стан внутрішньої динамічної рівноваги природної системи (організму, біогеоценозу, біосфери), який забезпечується постійним надходженням речовини і енергії та процесами саморегуляції функцій усіх ланцюгів системи.

**Гранично допустима концентрація (ГДК)** – вміст забруднюючих газів, пилових частинок на інших невластивих речовин у повітрі, воді, ґрунті, які за їх тривалої дії на організм людини не викликають патологічних змін.

**Ґрунт** – біокосна система, що утворилася внаслідок взаємодії живих організмів та косної речовини; поверхневі шари земної кори (суходолу), видозмінені під впливом живих організмів і відрізняються від гірських порід складом мінеральної маси, значним вмістом специфічних органічних речовин (гумусу) і мають важливу відмінність – родючість, тобто здатність постачати рослинам необхідні для їх росту поживні речовини і воду. Засновником учення про ґрунт вважається В. В. Докучаєв.



**Грунтово-вбирний комплекс (ГВК)** – сукупність найдрібніших частинок ґрунту (менше 0,0001 мм), що складаються з нерозчинних у воді алюмосилікатів, органічних гумусових колоїдів і органічних кислот; частинки здатні вбирати з ґрунтових розчинів катіони одних солей і віддавати взамін на йони інших.

**Гуано** (ісп. *guano* – гній) – напластування на поверхні землі екскрементів морських птахів після розкладання в умовах сухого клімату; використовується як добриво.

**Гумідний** (лат. *humidus* – вологий) клімат – вологий клімат, за якого кількість опадів переважає кількість випаровування, а надлишок води видаляється річковим стоком.

**Гуміфікація** (лат. *humus* – ґрунт і лат. *ficatio*, від *ficia* – роблю) – процес мікробіологічного перетворення живих організмів на гумусові речовини; відбувається в ґрунті у вологому середовищі за утрудненого доступу кисню.

**Гумус** (лат. *humus* – ґрунт) – комплекс специфічних темнозбарвлених органічних сполук, які накопичуються у верхньому ґрунтовому горизонті і впливають на його родючість.

**Делювій** (лат. *deluo* – зливаю) – поверхневі відклади, що утворюються на схилах та біля підніжжя височин унаслідок змивання талими і дощовими водами продуктів вивітрювання гірських порід.

**Денітрифікація** (лат. *de* – префікс, що означає усунення, відміну, грец. *nitron* – селітра і лат. *facio* – роблю) – природний процес відновлення денітрифікуючими бактеріями нітратів і нітритів до амоніаку та газоподібного азоту.

**Денудація** (лат. *denudatio* – оголювання) – сукупність процесів руйнування і перенесення (водою, вітром, льодом) продуктів руйнування гірських порід у понижені ділянки земної поверхні, де відбувається їх накопичення.

**Детрит** (лат. *detritus* – стертий) – сукупність завислих у воді та в осаді на дні водойми органо-мінеральних частин (біогенного та абіогенного походження); мають бактеріальний складник; їжа детритофагів.

**Детритний харчовий ланцюг** – харчовий ланцюг, в якому першою ланкою слугує мертва жива речовина.

**Діагенез** (грец. *dia* – префікс, який означає проникнення, завершеність і *genesis* – походження) – сукупність процесів перетворення пухких осадів на осадові гірські породи, що відбувається у верхніх шарах земної кори і полягає у перекристалізації осадів, утворенні мінералів, конкреції, гідратації або дегідратації (зневодненні), цементації осадів та ін.

**Евритопи** (грец. *eury* – широкий і *topos* – місце) (**еврибіонти**) – організми (популяції, види), які здані витримувати широкі коливання еколого-геохімічних факторів без втрати функціонального місця в екосистемі (мають високу екологічну пластичність).

**Евтрофікація водойм** (грец. *eu* – добре і *trophē* – живлення) – «цвітіння» води, підвищення концентрації токсичних речовин, зменшення концентрації кисню внаслідок інтенсивного розмноження анаеробних організмів (синьо-зелених, діатомових водоростей та ін.) і рослин в річках і прісних водоймах через потрапляння в них надлишку поживних речовин (сполук N, P та ін.).

**Екологічна відповідальність** – інтегроване поняття, що поєднує професійну діяльність з духовністю, моральністю та активною природоохоронною позицією.

**Екологічна криза** – глибоке порушення природної динамічної рівноваги та напружений стан зв'язків людини та природи, що зумовлено невідповідністю виробничих сил і виробничих відносин у суспільстві з ресурсними можливостями біосфери.

**Екологічна ніша** – місце конкретної популяції як функціональної одиниці в біогеоценозі, що характеризує ступінь її екологічної спеціалізації. За образним виразом відомого еколога Ю. Одума, місце мешкання (певний простір існування) – це «адреса», а ніша – «професія» (функціональна роль) популяції конкретного виду в екосистемі.

**Екологічна політика** – комплекс заходів, спрямованих на охорону навколишнього середовища, збереження і відновлення природних ресурсів,

екологізацію економіки, запровадження маловідходних, органічних технологій, розвитку природоохоронної освіти і виховання, правова охорона екосистем з метою забезпечення оптимальних умов природокористування.

**Екологічна свідомість** – здатність людей відтворювати проблеми екології у мисленні; вищий рівень психічного відображення цих проблем. Розрізняють такі форми екологічної свідомості: 1) індивідуальну, яка вміщує особистісні цінності і смисли; 2) суспільну – узагальнені ідеї, уявлення, думки різних соціальних груп або суспільства до екологічних явищ і проблем.

**Екологічне виховання** – формування емоційного ставлення до навколишнього природного середовища відповідно до системи цінностей; сприйняття цінностей природи як особисті; здійснюється в системі пізнавального процесу, залежить від змісту і висвітлення навчального матеріалу, методів і форм його викладання.

**Екологічні знання** – система загальних уявлень, понять, суджень, теорій про навколишнє природне середовище, місце і роль людини в ньому; передумова розвитку екологічної свідомості.

**Екологічний світогляд** – система загальних поглядів на відносини між людиною і природою. У структуру екологічного світогляду входять філософські, наукові, соціологічні, моральні, естетичні переконання, що співвідносяться між собою; передбачає визнання самоцінності об'єктів природи і зумовлює ціннісне ставлення особистості до природи та відповідальність за її збереження.

**Екологія** (грец. *oikos* – оселя, середовище і *logos* – учення) – біоцентрична міждисциплінарна наука, що вивчає сукупність живих організмів, які взаємодіють один з одним і утворюють з навколишнім природним середовищем єдність – екосистему, у межах якої відбувається біотичний колообіг речовини, перетворення енергії та інформації.

**Екомережа** – система біотопів (ділянок з біоценозами), що пов'язані у просторі на місцевому, регіональному чи інших рівнях, має правовий статус і відновлює біогеоценотичний покрив території.

**Екосистема** – головна функціональна одиниця в екології; єдиний природний комплекс, утворений сукупністю живих організмів (біоценозом) і місцем їхнього існування (біотопом, неживою частиною), в межах якого здійснюється колообіг речовин, перетворення потоку енергії та передача інформації.

**Елювій** (лат. *eluvie* – вимивати) – продукти вивітрювання гірських порід, що не переносяться агентами вивітрювання, а залишаються на місці утворення і зберігають якості материнської породи, утворюючи кору вивітрювання.

**Емерджентні** (англ. *emergence* – виникнення нового) властивості – нові унікальні властивості системи, що виникають у результаті синергетичної взаємодії її компонентів.

**Ентропія** (грец. *en* – в і *tropē* – поворот, зміна, перетворення) – міра кількості зв'язаної енергії системи, яка недоступна для використання і здійснення будь-якого виду роботи; міра зміни упорядкованості системи (міра хаосу), що відбувається при деградації енергії.

**Еукаріоти** (грец. *eu* – добре і *karyon* – горіх, ядро) – організми, ядра клітин яких мають оболонку, що відокремлює їх від протоплазми (усі вищі рослини і тварини, одно- і багатоклітинні водорості, гриби і найпростіші).

**Ізомерія** (грец. *isos* – однаковий, рівний і *meros* – частина) – явище, за якого різні сполуки, що мають однаковий якісний і кількісний склад, мають різну структуру і тому різняться своїми властивостями.

**Ізоморфізм** (грец. *isos* – однаковий, рівний і *morphē* – форма) – явище заміщення в кристалічній решітці мінералів одних йонів та атомів на інші із близькими розмірами радіусів йонів.

**Іонізуюче випромінювання (ІВ)** – випромінювання, взаємодія якого із середовищем приводить до утворення в цьому середовищі іонів (позитивно або негативно заряджених часток) з нейтральних атомів чи молекул. ІВ може мати корпускулярну чи хвильову природу. Корпускулярний потік може складатися з  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинок, нейтронів, іноді інших елементарних часток. Хвильове випромінювання підрозділяють на  $\gamma$ - і рентгенівське випромінювання.

**Інфільтрація** (грец. *in* – префікс, що означає проникнення в щось і середньолат. *filtration* – проціджування) – процес просочування опадів і поверхневих вод у гірські породи і ґрунт по капілярних порах, тріщинах та інших порожнинах; гравітаційний рух води від поверхні Землі до рівня ґрунтових вод.

**Канцерогени** – реагенти (радіаційні або хімічні), під впливом яких виникає трансформація нормальних клітин у пухлини.

**Кислотні опади** – опади (дощ, сніг) зі значенням рН від 5,5 до 1,5, що виникають унаслідок антропогенних викидів оксидів S, N, які поєднуються з атмосферною вологою, утворюють сульфатну і нітратну кислоти, що здатні дисоціювати на йони  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}^-$ ,  $\text{H}^+$  та ін.

**Коефіцієнт біоаккумуляції** – узагальнений екотоксикологічний показник, що характеризує здатність живих організмів накопичувати шкідливі речовини і виражається як відношення концентрації речовини в організмі до її концентрації у навколишньому середовищі.

**Коефіцієнт біологічного накопичення (КБН)** – відношення кількості накопиченої в організмі речовини (радіонукліда, пестициду, мікроелемента та ін.) до його вмісту у навколишньому середовищі.

**Коефіцієнт біологічного поглинання (КБП)** – відношення вмісту елемента в золі рослин, тварин до його вмісту у ґрунті чи гірській породі; характеризує інтенсивність поглинання елементів організмами.

**Кора вивітрювання (елювій)** – 1) поверхневий пухкий шар Землі; 2) крихкі продукти змін гірських порід, що утворюються під ґрунтом за рахунок процесів вивітрювання; відрізняється від ґрунту відсутністю біогенної акумуляції елементів під впливом рослин.

**Ксерофіти** (грец. *xerox* – сухий і *phyton* – рослина) – фізіологічні форми рослин, що витривалі до посушливих умов існування.

**Ландшафт** (нім. *Landschaft* – місцевість) – конкретна територія, однорідна за своїм походженням і неподільна за зональними та азональними ознаками, має єдиний геологічний фундамент, рельєф, загальний клімат, однакове поєднання гідротермічних умов, ґрунтів, біоценозів і певну структуру.

**Малий (біологічний) колообіг** – сукупність процесів утворення, життєдіяльності, відмирання та розкладання живої речовини в системі «середовище – жива речовина – середовище»; послідовна циркуляція речовин і хімічних елементів у біосфері, яка здійснюється за рахунок життєдіяльності організмів та їхньої взаємодії з абіотичними чинниками.

**Мантія** (грец. *mantion* – плащ) Землі – область земної кулі, розташована між ядром і корою.

**Мероміктне озеро** – озеро, що характеризується розшаруванням маси води на два шари, які не перемішуються один з одним: нижній (монімолімніон) – відрізняється підвищеною мінералізацією, і верхній (міксолімніон), в якому вода перемішується. Ці шари розділені шаром хімічного стрибка – *хемокліном*

Мероміктне озеро виникає в результаті інтенсивного надходження мінеральних солей у водойму, зокрема внаслідок скидів промислово-комунальних стоків.

**Міграція** (лат. *migratio* – переселення) **біогеохімічна** – колообіг хімічних елементів у природі за активної участі живих організмів.

**Моніторинг** – комплексна система спостереження, оцінювання і прогнозування змін стану навколишнього природного середовища під впливом антропогенних чинників.

**Мули** – біокосні системи, які мають аналогію з ґрунтами з тією різницею, що замість атмосферного повітря мули оточені водою, яка просочує їх, чинить на них певний вплив; це тонкодисперсні, землісті відкладення з органічною складовою на дні водойм. Характерні особливості: ріст товщі мулу знизу вгору, вплив вищих рослин і простіших на їх утворення і склад, особливо, для континентальних водойм.

**Нафта** (від тюрк. *neft*) – мінеральна рідка горюча оліїста на дотик речовина, не розчиняється у воді, темно-бурого або чорного кольору зі слабкою флуоресценцією, легша за воду,  $\rho = 0,79-0,97$ . Залягає в осадовій оболонці надрземлі і океанського дна, т. зв. «кишенях»; використовується як паливо, а також як сировина для одержання низки цінних продуктів (гас, бензин, реактивне паливо, мазут та ін.). За хімічним складом – це

складна суміш рідких вуглеводнів з розчинними в них твердими і газуватими; містить 98 % алканів, циклоалканів, аренів різної молекулярної маси та різного співвідношення в залежності від родовищ. Нафта також містить невелику кількість кисневих похідних – це нафтовікислоти, азотисті й сірчисті сполуки гетероциклічної будови; у більшості сортів незначний вміст алкенів, виняток – родовища Канади, що містять суміш алкенів від  $C_6H_{12}$  до  $C_{12}H_{24}$ . У важкій нафті до 20 % смолистих і асфальтових речовин.

**Оглеєння** – процес метаморфічного перетворення мінеральної ґрунтової маси внаслідок постійного або тривалого перезволоження ґрунту, що зумовлює інтенсивний розвиток відновних процесів за обов'язкової участі анаеробних мікроорганізмів та наявності органіки.

**Озоновий шар (екран)** – шар атмосфери (стратосфери) на висоті від 10 до 50 км з максимумом концентрації озону на висоті 20–25 км.

**Ойкумена** (грец. *oikumenē* – вся земля) – заселена людиною частина світу.

**Окиснювально-відновний потенціал (Eh)** – спорідненість атома до електрона, що вимірюється потенціометром на платиновому і каломельному електродах у водному горизонті (водному розчині).

**Опад** – щорічно відмираюча біомаса (листя, плоди, стебла, квіти, відмерлі корені).

**Осадова порода** – порода з органічних і неорганічних частинок, що відклалися після їх транспортування агентами денудації (вітром, водою).

**Освіта для сталого розвитку** – сучасний підхід до організації навчального процесу, який включає інформування членів суспільства про основні проблеми сталого розвитку, формування світогляду, що базується на засадах сталості, переорієнтацію навчання з передачі знань на налагодження діалогу, орієнтацію на порушення та практичне розв'язання локальних проблем.

**Парникові гази** – газуваті складники атмосфери як природного, так і антропогенного походження, які поглинають і відбивають інфрачервоне випромінювання сонячного спектра:  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_6H_6$ , ХФВ (хлорофлуорвуглеці) та ін.

**Поверхнево-активні речовини (ПАР)** – група хімічних сполук, що знижують поверхневий натяг на границі «водяний розчин – повітря». Широко використовуються як миючі засоби – детергенти. Негативно впливають на якісний перебіг життєвих процесів у водоймах.

**Природокористування** – сукупність усіх форм експлуатації ресурсів природних для задоволення екологічних, економічних, культурно-оздоровчих потреб теперішнього і майбутніх поколінь з урахуванням близьких і віддалених наслідків змін довкілля під впливом господарської діяльності й росту населення.

**Редуценти (деструктори)** – організми (бактерії, гриби, копрофаги, некрофаги та ін.), які розкладають мертву органічну речовину і мінералізують її (перетворюють на неорганічну).

**Розсоли** – води, у яких вміст солей перевищує 300–350 г/л.

**Світовий океан** – неперервна водна оболонка Землі, що оточує сушу (материки і острови) і має загальний сольовий склад; займає приблизно 71% земної поверхні.

**Селібітна зона** – жила зона, район населеного пункту, призначений винятково для житла, де немає промислових підприємств.

**Симбіоз** – (грец. *symbiosis*– співмешкання) – сумісне існування двох і більше видів, яке необхідне і зазвичай корисне партнерам (симбіонтам).

**Смог** – небезпечне забруднення атмосферного повітря, що характеризується поєднанням частинок пилу, диму, газових відходів промислових підприємств, автомобільного транспорту і крапель туману; утворюється здебільшого при інверсіях температур.

**Сонячна стала** – кількість сонячної енергії, що падає на верхню границю біосфери (25–30 км від поверхні Землі); дорівнює 1,369 кВт/м<sup>2</sup>; визначає константу біомаси біосфери (85–100 млрд т сухої речовини).

**Стабільність біосфери (буферна ємність біосфери)** – здатність біосфери протистояти зовнішнім (космічним) і внутрішнім збуренням, у т. ч. антропогенному впливу.



**Сталий розвиток** (*sustainable development*) – керований розвиток суспільства, коли економічне зростання, матеріальне виробництво і споживання відбуваються в межах, які дозволяють екосистемам відновлюватися, поглинати забруднення і підтримувати життєдіяльність теперішніх та майбутніх поколінь.

**Стенотопні** (грец. *stenos* – вузький, обмежений і *topos* – місце) організми – організми, що мешкають лише у специфічних, дуже обмежених, відносно постійних умовах середовища; зазвичай такі організми ендемічні.

**Стічні води** – води, що відводяться після використання у побутовій та промисловій діяльності людини; піддаються різним видам забруднень.

**Сукцесія** (лат. *succesio* – наступність) – послідовна необоротна й закономірна зміна складу та структури біогеоценозу іншим, що спричинюється зовнішніми або внутрішніми факторами. Класичний приклад сукцесії – заростання озера й перетворення його на болото.

**Тектонічні процеси** (грец. *tektonikos* – те, що стосується будівництва) – процеси пов'язані з існуючою структурою земної кори або загальними змінами, що в ній відбуваються.

**Техногенез** – сукупність геохімічних і геофізичних процесів, пов'язаних з діяльністю людства, які вже значно змінили і продовжують змінювати геохімічні умови в біосфері.

**Техносфера** (грец. *technē* – майстерність і *sphaira* – сфера) – частина біосфери, яка перетворена людством з метою задовольнити власні соціально-економічні потреби за допомоги прямого і опосередкованого впливу технічних засобів.

**Торф** – горюча копалина, що утворюється внаслідок скупчення остаточно нерозкладених в умовах боліт решток рослин (здебільшого сфагнуму).

**Урбанізація** (лат. *urbanus* – міський) – процес збільшення на планеті чисельності міських територій; потужний чинник трансформації ландшафту, земельних, водних ресурсів, масового виробництва відходів, що забруднюють атмосферу, гідросферу, літосферу і спотворюють природні біогеохімічні цикли.

## ЛІТЕРАТУРА

**Агроекологія:** посібник. А. М. Фесенко, О. В. Солошенко, Н. Ю. Гаврилович, Л. С. Осипова, В. В. Безпалько, С. І. Кочетова. Харків: ХНТУСГ, 2013. 291 с.

**Алексеевко В. А., Алексеенко Л. П.** Геохимические барьеры. М.: Логос, 2003. 114 с.

**Алексеевко В. А.,** Белюченко И. С., Алексеевко А. В. Аграрные ландшафты Кубани и экологическая геохимия: понятия, законы: монография. Краснодар: КубГАУ, 2016. 380 с.

**Андрейцев В. І.** Екологічне право і законодавство суверенної України: проблеми реалізації державної екологічної політики: монографія. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2011. 370 с.

**Аніщенко В. О.** Основи екології : навч. посіб. К.: ДП «Вид. дім «Персонал», 2011. 148 с.

**Базалук О. А.** Разумное вещество. К. : Наук. думка, 2000. 367 с.

**Бедункова О. О.** Міграція важких металів у водних екосистемах (на прикладі річки Замчисько): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. сільськогосп. наук : спец. 03.00.16 – екологія. Житомир, 2006. 33 с.

**Берталанфи Л. фон.** История и статус общей теории систем Системные исследования. М. : Наука, 1973. С. 26 – 29.

**Білоніжка П. М.** Йод у підземних водах нафтоносних басейнів як показник органічного походження нафти. Вісник Львів. ун-ту. Сер. геол. 2009. Вип. 23. С. 121–125

**Білоніжка Петро.** Геохімія біосфери = Geochemistry of the biosphere : монографія. Львів : ЛНУ імені Івана Франка. 2018. 182 с.

**Білявський Г. О., Фурдуй Р. С., Костіков І. Ю.** Основи екології: Підручник. – 2-ге вид. К.: Либідь, 2005. 408 с

**Біогеохімія :** навч. посіб. / [В. І. Дорохов, З. М. Шелест, Г. В. Скиба, О. М. Барабаш]. Житомир : ЖДТУ, 2004. 272 с.

**Боголюбов В. М.,** Клименко М. О., Мельник Л. Г., Ракоїд О. О. Стратегія сталого розвитку : Підручник К.: ВЦ НУБІПУ, 2018. 446 с.

**Бойчук Ю. Д., Солашенко Е. М., Бугай О. В.** Екологія і охорона навколишнього середовища : навч. посібник, Суми: ВТД «Університетська книга», 2007. 306 с.

**Брукс Р. Р.** Биологические методы поисков полезных ископаемых. М.: Недра, 1986. 312 с.

**Буц Ю. В.,** Крайнюк О. В., Лоцман П. І., Сенчихін Ю. М. Постпірогенна трансформація біогеохімічних властивостей сірих лісових ґрунтів при техногенному навантаженні. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія», 2022. (27), 63-71.*

**Вернадский В. И.** Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-пресс, 2004. 576 с.

**Вернадский В. И.** Дневники 1917 – 1921. К. : Наук. думка, 1994. 271 с.

**Вернадский В. И.** Научная мысль как планетное явление. М.: Наука, 1991. 272 с.

**Вернадский В. И.** Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 2001. 376 с.

**Вернадский В. И.** Избранные научные труды академика В. И. Вернадского. Т. 7. Труды по геохимии и радиогеологии. Книга 1. К., 2012. 821 с.

**Виноградов А. П.** Йод в морских илах. О происхождении йод-бромных вод нефтеносных районов. Труды биогеохим. лаборатории АН СССР. 1939. Т. 5. С. 19–32.

**Виноградов А. П.** Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М. : Изд-во АН СССР, 1957. 237 с.

**Войтенко Л. В.** Хімія з основами біогеохімії : Навч.посібник. К.: Наукова столиця, 2019. 400 с.

**Гандзюра В. П.** Продуктивність біосистем за токсичного забруднення середовища важкими металами. Київ: ВГЛ «Обрії», 2002. 248 с.

**Гардашук Т. В.** Сучасний екологізм: теоретичні засади та практичні імплікації: дис. ... д-ра філософ. наук : 09.00.09 / Ін-т філософії ім. Г. С. Сковороди НАН України. К., 2006. 360 с.

**Геохимия окружающей среды** / Саєт Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. и др. М.: Недра, 1990. 335 с.

**Германович О. М.** Емісія діоксиду карбону ґрунтом за різних систем удобрення і вапнування в агробіогеоценозах Опілля: дис. ... канд. с.-г. наук : 03.00.16 / Львівський нац. аграрий ун-т. Львів. 2018. 117 с.

**Гетьман Г. І.** Геохімічні ландшафти України. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2007. № 1. С. 72-78.

**Глазовская М.А.** Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. Смоленск: Ойкумена, 2002. 288 с.

**Гнатів П. С., Хірівський П. Р.** Теорія систем і системний аналіз в екології : навч. посібник. Львів: Камула, 2000. 204 с.

**Голубець М. А.** Плівка життя. Львів: «Поллі», 1997. 186 с.

**Голубець М. А.** Екосистемологія. Львів: «Поллі», 2000. 315 с.

**Голубець М. А.** Середовищезнавство (інвайронментологія). Львів: Кормпанія «Манускрипт», 2010. 176 с.

**Горова А. І.,** Лисицька С. М., Павличенко Т. В., Скворцова Т. В. Біотехнології в екології : навч. посібник Д. : Національний гірничий університет, 2012. 184 с.

**Гриб Й. В.** Екологічна оцінка стану екосистем річкових басейнів рівнинної частини території України (охорона, відновлення, управління): дис. ... д-ра біол.наук : 03.00.16 / Нац. ун-т водного господарства та природокористування. К., 2001. 416 с.

**Григорук М.** Золоте ірраціональне число. *Світосгляд*. 2017. № 6. с. 41-60

**Гродзинський Д. М.** Збереження біорізноманіття України і світу – неодмінна основа стабільного розвитку цивілізації. *Наука і наукознавство*. 2010. № 3. С. 3-1

**Гуцуляк В. М.** Ландшафтно-геохімічна екологія. Чернівці: Рута, 2001. 248 с.

**Денисик Г. І.** «Золота середина» у природничо-географічних дослідженнях. *Наукові записки ВДПУ, Серія: географія*, 2011. № 23. С. 5-10.

**Дерябо С. Д., Ясвин В. А.** Две модели экологии. *Человек*.1998. № 1. С. 34–40.

**Дідух Я. П., Плюта П. Г.** Фітоіндикація екологічних факторів. К.: Наук. думка, 1994. 280 с.

**Дмитрук Ю. М.** Еколого-геохімічний аналіз ґрунтового покриву агро-екосистем. Чернівці: Рута, 2006. 328 с.

**Дмитрук Ю. М., Бербець М. А.** Основи біогеохімії. Чернівці: Книги – ХХІ, 2009. 288 с.

**Добровольский В. В.** Основы биогеохимии: учебник. М. : Академия. 2003. 397 с.

**Дрозд О. М., Дядін Д. В.** Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Геохімія довкілля» (для студентів спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища). Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 45 с.

**Дудка І. О., Вассер С. П.** Гриби в природі та житті людини. К. : Наук. думка, 1980. 167 с.

**Екологічна біохімія** : Навч. посібник / В. М. Ісаєнко, В. М. Войціцький, Ю. Д. Бабенюк, С. В. Хижняк, В. М. Ільїн, С. А. Олійник. К. : Книжкове вид-во НАУ, 2005. 440 с.

**Екологічна енциклопедія** : у 3 т. / [редкол. : А. В. Толстоухов (гол. ред.) та ін.]. К. : ТОВ «Центр екологічної освіти і інформації». Т. 1 (А–З). 2006, 432 с.; Т. 2 (Є–Н), 2007. 143 с.; Т. 3 (О–Я), 2008. 472 с.

**Екологічна токсикологія** / Шумейко В. М., Глуховський І. В., Овруцький В. М. та ін. К.: АТ «Видавництво «Столиця», 1998. 204 с.

**Екологічні основи управління водними ресурсами** : навч. посіб. / А. І. Томільцева, А. В. Яцик, В. Б. Мокін та ін. К. : Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 200 с

**Екотрофологія** : основи екологічно безпечного харчування / [Димань Т. М., Барановський М. М., Білявський Г. О. та ін.] К. : Лібра, 2006. 304 с.

**Єгорова Т. М.** Біогеохімічні пріоритети агроекологічних досліджень. *Агроекологічний журнал*. 2017. № 1. С. 28-35.

**Загородний А. Г., Волков С. В., Онищенко О. С., Шестопалов В. М., В. І. Вернадський** – вчений, мислитель, організатор науки. Вісн. НАН України, 2013. № 3, с. 8-37.

**Запольський А. К., Салюк А. І.** Основи екології: Підручник. К.: Вища шк., 2004. 382 с.

**Злобін Ю. А., Кочубей Н. В.** Загальна екологія. Суми : ВТД «Університетська книга», 2005. 416 с.

**Илькун Г. М.** Газоустойчивость растений. К. : Наукова думка, 1971. 146 с.

**Илькун Г. Н.** Загрязнители атмосферы и растения. К. : Наукова думка, 1978. 163 с.

**Іванов В. Г.** Екологічна хімія: конспект лекцій Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. 108 с.

**Кирильчук А. А.,** Бонішко О. С. Хімія ґрунтів. Основи теорії і практикум : навч. посібник. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2011. 354 с.

**Кисельов М. М.,** Деркач В. Л., Толстоухов А. В. та ін. Концептуальні виміри екологічної свідомості. К.: ПАРАПАН, 2003. 312 с.

**Кияк В., Данилик І., Шпаківська І.** та ін. Збереження біорізноманіття у гірських і рівнинних регіонах України в умовах кліматичних змін : монографія. Львів: Простір-М, 2022. 189 с.

**Кіцно В. О.,** Поліщук С. В., Гудков І. М. Основи радіобіології та радіоекології : навч. посіб. К. : Хай-Тек, 2008. 316 с.

**Клименко М. О., Зеленський І. І.** Техноекологія : навч. посіб. К. : В. Ц. «Академія», 2011. 256 с.

**Клименко М. О., Боголюбов В. М.,** Клименко Л. В., Бережицька О. А. Практикум з розробки стратегії місцевого сталого розвитку: навч. посібник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2013. 230 с.

**Клименко М. О.,** Клименко О. М., Клименко Л. В. Радіоекологія: підручник. Рівне: НУВГП, 2020. 304 с.

**Ковалевский А. Л.** Биогеохимические поиски рудных месторождений. М.: Недра, 1974. 193 с.

**Ковалевский А. Л.** Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1991. 278 с.

**Ковальський В. В.** Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 265 с.

**Ковда В. А.** Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком. М. : Наука, 1973. 119 с.

**Ковда В. А.** Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.

**Конвенція про біологічне різноманіття:** [відп. ред. К. І. Гарадашук]. – К.: Стило, 1997. 154 с.

**Коржнев М. М.,** Вижба С. А., Ошляков О. Є. та ін. Екологічна геологія : підручник. К. : ВПЦ «Київський університет». 2005. 257 с.

**Корсак К. В.,** Плахотнік О. В. Основи сучасної екології: навч. посіб. К. : ДП «Вид. дім «Персонал», 2009. 408 с.

**Костік В. В.** Екологічна хімія : конспект лекцій. Одеса : Одеський державний екологічний університет, 2019. 127 с.

**Коць С. Я.** Біологічна фіксація азоту: досягнення та перспективи розвитку. *Фізіологія рослин і генетика*, 2021. Т. 53. № 2. С. 128-159.

**Коренева І. М.** Система підготовки майбутніх учителів біології до реалізації функцій освіти для сталого розвитку : Монографія. Суми, Вінниченко М. Д. 2019. 526 с.

**Крисаченко В. С.** Екологічна культура: теорія і практика: навч. посіб. К.: Відродження, 1996. 352 с.

**Крисаченко В. С., Хилько М. І.** Екологія. Культура. Політика: Концептуальні засади сучасного розвитку. К.: Знання, 2001. 598 с.

**Крутило Д. В.** Поширення та екологічні особливості бульбочкових бактерій сої в різних регіонах України : дис. ... канд. біол. наук: 03.00.06 / Ін-т сільгосподарської мікробіології УААН. Чернігів, 2006. 178 с.

**Крюченко Н. О.,** Паприга П. С., Осадчук Ю. К. Біогеохімічні провінції Закарпаття. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2009. № (9). с. 53-55.

**Крюченко Н. О.,** Жовинський Я. Є., Папарига П. С., М. В. Жук, К. Є Дмитренко, Кухар М. В., Дмитренко К. Е., Попенко Т. А. Геохімія мікроелементів у буроземних ґрунтах з моховим покривом Карпатського біосферного заповідника. *Геохімія та рудоутворення*. 2022. 43, с. 107-113.

**Кудельский А. В.** Гидрогеология и гидрогеохимия йода. Минск : Наука и техника, 1976. 214 с.

**Кунин Е. В.** Логика случая. О природе и происхождении биологической эволюции; пер. с англ. М. : ЗАО Издательство Центрполиграф, 2014. 527 с.

**Кучерявий В. П.** Екологія: підруч. Львів: Світ, 2000. 482 с.

**Кучерявий В. П.** Урбоекологія: Підручник. Львів: Світ, 2001. 440 с.

**Кучерявий В. П.** Фітомеліорація: Навч. посібник. Львів: Світ, 2003. 540 с.

**Ландсберг Г. Е.** Климат города. Л. : Гидрометгиздат, 1983. 248 с.

**Летников А.,** Сизых Н. Роль процессов гранитизации в формировании кислородной атмосферы Земли. ДАН, 2002. Т. 386, № 4, 2002, с. 538-540.

**Луцевич Д. Д.** Аналітична хімія: підруч. К. : Медицина, 2009. 416 с.

**Малишева Л. Л.** Ландшафтно-геохімічна оцінка екологічного стану територій. К. : РВЦ «Київський університет», 1998. 264 с.

**Малишева Л. Л.** Геохімія ландшафтів: Навч. посібник. К.: Либідь, 2000. 472 с.

**Марчук Г. П., Біла Т. А.** Геохімія довкілля: навч. посібник. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2013. 242 с.

**Мельник Л. Г., Шапочка М. К.** Основи екології. Екологічна економіка та управління : підручник. Суми : Вид-во Університетська книга, 2007. 759 с.

**Мельник О. С., Коренева І. М.,** Загородня Л. П., Данильченко І. Г. Досвід європейських країн у вирішенні питань екологічної безпеки: навчальний посібник: Суми: ВВП «Мрія», 2017. 400 с.

**Мовчан Я. І.** Збереження біотичного різноманіття України (методологія, теорія, практика) : дис. ... д-ра біолог. наук : 03.00.16 / Ін-т ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України. К., 2008. 536 с.

**Моисеев Н. Н.** Человек и ноосфера. М.: Наука, 1987. 367 с.

**Моисеев Н. Н.** Судьба цивилизации. Путь раз ума. М.: Изд-во МНЭПУ, 1988. 288 с.

**Моисеев Н. Н.** Нравственность и феномен эволюции. Экологический императив и этика XXI в. Общественные науки и современность. 1994. № 6. С. 131–139.

**Моисеев Н. Н.** Универсум. Информация. Общество. М.: Устойчивый мир, 2001. 200 с.

**Мэнинг У. Дж., Федер У. А.** Биомониторинг загрязнения атмосферы с помощью растений. Л.: Наука, 1985. 143 с.

**Линник П. Н., Набиванец Б. И.** Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометиздат, 1986. 270 с.

**Наумов Г. Б.** Геохимия биосферы: учеб. пособ. М.: Академия, 2010. 384 с.

**Небел Б.** Наука об окружающей среде. Как устроен мир: в 2-х т. М.: Мир, 1993. Т. 1. 424 с.; Т. 2. 340 с.

**Общая химия в формулах, определениях, схемах:** / И. А. Шиманович, М. Л. Павлович, В. Ф. Тикавый, П. М. Малашко]; под. ред. В. Ф. Тикавого. – Минск : Універсітэцкае, 1996. 528 с.

**Одум Ю.** Экология: в 2-х т.; пер. с англ. М.: Мир, 1986. Т. 1. 328 с.



**Основи спостережень за станом довкілля** : навч.-метод. посіб / за заг. ред. С. М. Панченка, Л. В. Тихенко. Суми : Університетська книга, 2013. 352 с.

**Павлова Г. А., Шишкіна О. В.** Распределение йода в осадках Тихого океана и накопление его в иловых водах в процессе их метаморфизации. *Геохимия*. 1973. № 7. С. 1056–1066.

**Панайотова Т. Д.** Конспект лекцій з дисципліни «Хімія з основами біогеохімії». Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 109 с

**Пахомов О. Є., Кучерявий В. П., Дідух Я. П., Мальований М. С., Царик Й. В., Шабанов Д. А.** та ін. Екологія: підручник / кол. авторів; за загальною ред. О. Є. Пахомова. Харків : Фоліо, 2014. 666 с.

**Перельман А. И.** *Геохимия*. М. : Высш.шк., 1989. 528 с.

**Порфирьев В. Б.** Природа нефти, газа и ископаемых углей Избр. тр. в 2 т. Абиогенная нефть. Т. 2 / Отв. ред. Е. Ф. Шнюков. К. : Наук. думка, 1987. 256 с.

**Петлін В. М., Міщенко О. В.** Прикладне ландшафтознавство : підручник. Луцьк : Вежа-Друк, 2021. 328 с.

**Позняк С. П., Телегуз О. Г.** Антропогенні ґрунти : Навч. посібник. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2021. 200 с.

**Примаченко С. В., Новоселов Є. Ф.** Екологічна хімія : навч. посібник. Київ: НАУ, 2017. 111 с

**Програма дій «Порядок денний на 21 століття»** / Пер. з англ.: ВГО «Україна. Порядок денний на 21 століття». К.: Інтелсфера, 2000. 360 с.

**Потіш А. Ф., Медвідь В. Г., Гвоздецький О. Г., Козак З. Я.** Екологія : теоретичні основи і практикум. Львів : «Магнолія плюс», 2006. 324 с.

**Приседський Ю. Г.** Характеристика стійкості деревних та чагарникових рослин до забруднення повітря сполуками сірки, фтору та нітрогену. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: біологія*. 2014. 21. № 1112.

**Пригожин И.** От существующего к возникающему. М.: Мир, 1986. 432 с.

**Пригожин И., Стенгерс И.** Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. М. : Прогресс, 1986. 432 с.

**Приседський Ю. Г., Лихолат Ю. В.** Адаптація рослин до антропогенних чинників : підручник Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 98 с.

**Радіонукліди у водних екосистемах України** / [Кузьменко М. І., Деревець В. В., Волкова О. М. та ін.]. К. : Чорнобильінтерінформ, 2001. 318 с.

**Реймерс Н. Ф.** Екологія: теорія, закони, правила, принципи и гіпотези. М. : Россия молодая, 1994. 366 с.

**Рудишин С. Д.** Біологічна підготовка майбутніх екологів: теорія і практика: монографія. Вінниця : ВМГО «Темпус», 2009. 394 с.

**Рудишин С. Д.** Які біологічні знання можна вважати науковими для сучасної екології? *Науковий світ*. 2010. № 5. С. 5-6.

**Рудишин С. Д.** Генетично модифіковані рослини: проблеми і перспективи використання. *Наука та інновації*. 2011. № 6. С. 1-13.

**Рудишин С. Д.** Основи біогеохімії : навч. посібник [для студ. вищ. навч. закл.] К. : ВЦ «Академія», 2013. 248 с.

**Рудишин С. Д.** Сталій розвиток з позицій коеволюції. *Журнал агробіології та екології*. 2018. Т. 5. № 1. С. 43-48.

**Рудишин С. Д.** Еволюція екосистем в контексті сучасної природничо-наукової картини світу. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. III(5), Issue: 41, 2015. III(5), Issue: 41, 2015. P. 30-34.

**Рудишин С. Д.** Біогеохімічне районування ландшафтів. Біогеохімічні провінції. Екологічні дослідження у вищих навчальних закладах: збірка наукових праць. Херсон : ФОП Вишемирский В. С., 2018. С. 122-123.

**Рудишин С. Д., Кур'ята В. Г.** Практикум з основ загальної екології : навч. посібник Вінниця : Гіпаніс, 2004. 101 с.

**Рудишин Сергій, Хроленко Марина.** Можливості біосфери і сталій розвиток суспільства : проблеми і перспективи коеволюції. *Біологія і хімія в рідній школі*. 2014. № 2. С. 12-16.

**Рудишин С. Д., Коренева І. М., Самілик В. І.** Екологічна компетентність як загальна компетентність вчителів природничих дисциплін. *Український педагогічний журнал*. 2016. № 3. С. 74-83

**Рудишин С. Д., Кмець А. М., Самілик В. І., Гулакова І. М.** Біологія і екологія. 10 клас. Навч. посібник: Вінниченко М. Д., Суми, 2021. 388 с.

**Рудишин С. Д.** Лінгвістична екологія – маргінальний напрям мовознавства : понятійно-категоріальний апарат з позицій екології. *Вісник Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка. Серія: Педагогічні науки.* Глухів, 2023. Вип. 1 (51). С. 230–237.

**Rudyshyn S. D., Kravets V. P., Samilyk V. I., Sereda T. V., & Havrylin V. O.** Features of the Fundamentalization of Education in Higher Educational Institutions of Ukraine in the Context of Sustainable Development. *Journal of Educational and Social Research*, 2020. 10(6), 149-161.

**Rudyshyn Serg D.** Golden section : environmental demention of sustainable development of «biosphere – society» system./ V All –Ukrainian congress of ECOLOGISTS with international participation (Екологія / Ecology – 2015, 23-26 вересня, 2015. Збірник наук. праць. Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД». 2015. С. 254.

**Rudyshyn Sergii D.** Enviromental Demention of Sustainable Development of «BiospereSociety» System: Discourse «Golden Section». Екологічний вимір сталого розвитку системи «біосфера-суспільство»: дискурс «золотий перетин». *Сталий розвиток – XXI століття. Дискусії 2021*: матеріали VII Міжнародної науковопрактичної конференції / Національний університет «Києво-Могилянська академія» / за ред. проф. Хлобистова Є. В. Київ, 2021. С. 140-147.

**Rudyshyn S.** Linguistic ecology and its terminosphere: problems and prospects of scientific ecological discourse. *Science and Education a New Dimension. Humanities and Social Sciences*, 2022. X(50), I.: 269, 2022 Dec. P. 46-54.

**Рюс Ж.** Поступ сучасних ідей: панорама новітньої науки. К.: Основи, 1998. 669 с.

**Самілик В. І.** Формування готовності майбутніх учителів біології до природоохоронної діяльності в процесі професійної підготовки: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.04 / Глухівський нац. пед. ун-т ім. Олександра Довженка. Глухів, 2019. 336 с.

**Сауков А. А.** Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М. : Моск. гос. ун-т, 1963. 248 с.

**Сауков А. А.** Геохимия. М. : Наука, 1975. 480 с.

**Сергійчук М. Г.** Мікробіологія / М. Г. Сергійчук, В. К. Позур, Т. М. Фурзікова, О. С. Радченко, Л. Г. Степура, І. В. Домбровська, Ю. В. Швець. – К. : Видавничо-поліграф. центр «Київський університет», 2008. 541 с.

**Скиба Ю. А.** Теоретичні і методичні засади підготовки майбутніх екологів до управлінської діяльності в умовах збалансованого розвитку: дис. ... д-ра пед. наук: 13.00.04 / Ін-т вищої освіти НАПН України, К., 2014. 509 с.

**Скопенко В. В., Григорьева В. В.** Координационная химия. К.: Вища школа, 1984. 196 с.

**Слюсаренко В.** Числа Фібоначчі та золота пропорція. *Математика*. 2008. № 8 (452). С. 18-24.

**Снігинський В. В., Хірівський П. Р., Гнатів П. С., Корінець Ю. Я., Панас Н. С.** Екотоксикологія : навч. посіб. : для бакалаврів за спец. 101 «Екологія» – [2-ге вид.]. Херсон : Олді-Плюс, 2019. 394 с.

**Соботович Е. В., Бондаренко Г. М., Кононенко Л. В.** Геохимия техногенных радионуклидов. К.: Наукова думка, 2002. 332 с.

**Соколов В. А.** Генезис нефти и газа / Сб. ст. отв. ред. проф. В. А. Соколов. М. : Наука, 1968. 230 с.

**Солнцева Н. П.** Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 376 с.

**Соломенко Л. І., Боголюбов В. М., Волох А. М.** Загальна екологія : підручник; вид. друге випр. і доп. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2018. 352 с.

**Сорокіна Л. Ю., Рога І. В.** Геопросторовий аналіз антропогенних змін ландшафтно-геохімічних умов території (теоретичний аспект). *Український географічний журнал*, 2011. № 1. С. 38-43.

**Степанюк Л. М., Курило С. І., Котвіцька І. М., Грінченко О. В.** Калійвмісні породи Українського щита: баланс речовини. *Геохімія та рудоутворення*. 2019. 40, с. 58-63.

**Стольберг Ф. В.** Экология города. К.: Либра, 2000. 464 с.

**Тайлор Э. Б.** Первобытная культура: Пер. с англ. М., 1989. 573 с.

**Тейяр де Шарден Ж. - П.** Феномен человека. М.: Наука, 1987. 240 с.

**Трефил Джеймс.** 200 законов мироздания. М.: Гелеос, Фонд Дмитрия Зимина «Династия», 2007. 752 с.

**Трохимчук І. М.**, Плюта Н. В., Логвиненко І. П., Сачук Р. М. Біотехнологія з основами екології: навч. посібник. К. : Видавничий дім «Кондор», 2019. 304 с.

**Тютюнник Ю. Г., Горлицкий Б. А.** Техногенне забруднення міських ґрунтів України (феноменологічний аналіз). *Доповіді НАН України*, 2000. № 6. С. 208–211.

**Українська екологічна енциклопедія** / [Дяків Р. С. та ін.]; за ред. Романа Дяківа; Міжнар. екон. фундація, Ін-т українознавства М-ва освіти і науки України. – 2-ге вид. Київ : Міжнар. екон. фундація, 2006. 807 с.

**Федорова Г. В.** Практикум з біогеохімії для екологів. К.: КНТ, 2007. 288 с.

**Ферсман А. Е.** Основные идеи геохимии. М.: Наука, 1991. 212 с.

**Ферсман А. Е.** Владимир Иванович Вернадский (Общий облик ученого и мыслителя). В. И. Вернадский: *pro et contra*. СПб., 2000. С. 44.

**Хацевич О. М.** Біонеорганічна хімія: Навч. посібник. Івано-Франківськ, 2020. 121 с.

**Хентов В. Я.** Химия окружающей среды для технических вузов. Ростов н / Д : Феникс, 2005. 144 с.

**Хлонь Н. В.** Землезнаство: підручник. Суми: Вінниченко М. Д. 2017. 236 с.

**Хроленко М. В.** Система формування екологічної компетентності майбутніх учителів біології у процесі фахової підготовки: Монографія. Суми: Видавничо-виробниче виробництво «Мрія», 2022. 400 с.

**Хухрянский В. Г., Цыганенко А. Я., Павленко Н. В.** Химия биогенных элементов. К.: Вища шк., 1990. 207 с.

**Чайка В. Є.** Урбоекологія. Вінниця: ВДАУ, 1999. 192 с.

**Чебаненко І. І., Євдошук М. І., Ключко В. П., Токовенко В. С.** Нова теорія формування нафтових і газових родовищ (осадово-неорганічна). *Доп. НАН України*. 1999. № 10. С. 118–120.

**Чекалюк Э. Б.** Термодинамические основы теории минерального происхождения нефти / отв. ред. Г. Н. Доленко. К. : Наук. думка. 1971. 256 с.

**Червона книга України.** Вони зникають на нашу допомогу / Упоряд. Сергій Шапаренко. Харків: TORSING, 2009. 320 с.

**Чертко Н. К.** Геохимия: Учебное пособие для студентов геологических специальностей вузов. Мн.: «ТЕТРА СИСТЕМС», 2007. 253 с.

**Шевелев И. Ш.** Марутаєв М. А., Шмельов І. П. Три погляди на природу гармонії. М.: Стройиздат, 2007. 343 с.

**Шестопапов В.** Керована коеволюція як стратегія подолання глобальної екологічної кризи. Вісник НАН України, 2008. № 5. С. 3-9.

**Шишкина О. В., Павлова Г. А., Лисицин А. П.** Накопление йода в иловых водах скважин бурения в Черном море. Докл. АН СССР. 1979. Т. 248, № 3. С. 735–738.

**Шкловский И. С.** Вселення, жизнь, разум. М.: Наука, 1987. 203 с.

**Экологический энциклопедический словарь** [сост. И. И. Дедю]. Кишинев: Гл. ред. МСЭ, 1990. 408 с.

**Юрченко Л. І.** Екологічна культура в контексті екологічної безпеки. К. : Видавництво ПАРАПАН, 2008. 296 с.

**Яцимирский К. Б.** Введение в бионеорганическую химию. К. : Наукова думка, 1976. 209 с.

**Ardon Marcelo, Clark Deborah A., Marzolf Nicholas S. et al.** Can we see the nitrate from the trees? Long-term linkages between tropical forest productivity and stream nitrogen concentrations. *Biogeochemistry*. 2023. Vol. 67. Issue 3.

**Ayala-Muñoz D., Macalady J. L., Sánchez-España J. et al.** Microbial carbon, sulfur, iron, and nitrogen cycling linked to the potential remediation of a meromictic acidic pit lake. *ISME Journal*, 2022. 16, 2666–2679.

**Bashkin V. N., Howarth Robert W.** Modern Biogeochemistry, 2002. Kluwer Academic Publishers. 561 p.

**Bianchi T. S.** The evolution of biogeochemistry: revisited. *Biogeochemistry*. 2021. 154, 141–181

**Bonnet S., Benavides M., Le Moigne, F.A.C. et al.** Diazotrophs are overlooked contributors to carbon and nitrogen export to the deep ocean. *ISME Journal*. 2023. 17, 47–58.

**Commoner Barry.** The Closing Circle: Nature, Man, and Technology. Random House. 1971. 352 p.

**Gill A. L., Grindler R. M., See C. R.** et al. Soil carbon availability decouples net nitrogen mineralization and net nitrification across United States Long Term Ecological Research sites. *Biogeochemistry*, 2023. 162, 13–24.

**Jickells T. D., An Z. S., Andersen K. K.** et al., Global Iron Connections Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate. *Science*, 2005. vol. 308. 67-71.

**Lu Q.-B.** Cosmic-ray-driven reaction and greenhouse effect of halogenated molecules: culprits for atmospheric ozone depletion and global climate change. *International Journal of Modern Physics B*. 2013 Vol. 27, № 17. id 350073

**Middelburg Jack J.** Marine Carbon Biogeochemistry. A Primer for Earth System Scientists. Springer Nature. 2019. 118 c.

**Safonov V. A.** Geochemical Ecology of Organisms in the Biosphere Technogenesis: Analytical Review and Some Results. *Advances in Geochemistry, Analytical Chemistry, and Planetary Sciences*. 2023. pp 463–471.

**Woese C. R.** Bacterial Evolution. *Microbiol. Rev.* 1987. 51. № 2. P. 221-271.

**Woese C. R., Kander O., Wheelis M. L.** Towards a Natural System of Organisms : Proposal for the Domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1990. Vol. 87. P. 4576-4579.

**Навчальний посібник**

Рудишин Сергій Дмитрович

# **БІОГЕОХІМІЯ З ОСНОВАМИ ЕКОЛОГІЇ**

Підписано до друку 21.04.2023 р. Обл.-вид. арк. 15,64. Ум. друк. арк. 18,60.

Формат 60х84/16. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.

Друк цифровий. Наклад 300 прим. Зам. № 568.

Видавець «ФОП Середняк Т. К.», 49000, Дніпропетровськ, 18, а/с 1212

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру  
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 4379 від 02.08.2012.

Ідентифікатор видавця в системі ISBN 8010

49018, Дніпро, 18, а/с 1212

тел. +38-(066)-773-57-49

e-mail: yuriysss@yahoo.com

www.adverta.com.ua

Віддруковано та виготовлено:

ФОП Ятманов В. С., 40022, м. Суми, вул. Троїцька 17.

e-mail: jatmanov@ukr.net