

**Ю.І. ПОСУДІН**

**МОНІТОРИНГ  
ДОВКІЛЛЯ  
З ОСНОВАМИ  
МЕТРОЛОГІЇ**



УДК 577.3

**Посудін Ю. І. Моніторинг довкілля з основами метрології:** підручник.  
– К.: 2012. – 426 с.: іл., бібліогр.

Метою підручника є ознайомлення студентів-екологів з основними положеннями та визначеннями моніторингу довкілля, основами організації моніторингу за складовими біосфери, а також з такими завданнями моніторингу довкілля як оцінювання та аналіз кліматичних факторів середовища (природних випромінювань, атмосферного тиску, вітру, температури, вологості, опадів) та їх сумісної дії; спостереження за станом та якістю складових довкілля (атмосферного повітря та повітря приміщень, ґрунту, поверхневих та підземних вод); ознайомлення з сучасними технологіями оновлення та ремедіації ґрунту, підземних вод та повітря приміщень; висвітлення принципів дії приладів для вимірювання параметрів навколишнього середовища та його забруднення, а також можливості застосування сучасних методів, зокрема автоматизованих та дистанційних, моніторингу довкілля.

Підручник містить приклади розв'язування практичних проблем, контрольні завдання та запитання, відповіді на які студенти зможуть дати завдяки ознайомленню з відповідними розділами підручника; крім того, пропонуються конструктивні тести, прямих відповідей на які нема в підручнику, але студент повинен дати відповідь самостійно. Для обговорення тем основних розділів та дискусій у підручнику запропоновано програми семінарських занять. Наводяться приклади моделювання явищ та процесів, що відбуваються у навколишньому середовищі. Інформативний матеріал подано у додатках.

Підручник призначений для студентів вищих навчальних закладів III - IV рівнів акредитації за напрямом 6.040106 – Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування.

**Рецензенти:**

*Г. О. Білявський,*

доктор геолого-мінералогічних наук, професор, директор навчально-наукового Інституту управління та екологічної безпеки Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління;

*І.Л. Якименко,*

доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри біофізики та основ технологічних процесів Білоцерківського національного аграрного університету;

*В.М. Боголюбов*

доцент кафедри загальної екології та безпеки життєдіяльності Національного університету біоресурсів і природокористування України, кандидат технічних наук

*Рекомендовано до друку Вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол № 9 від 27 квітня 2011 р.)*



## ЗМІСТ

**ПЕРЕДМОВА 3**

**ВСТУП 7**

### **I. МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ – ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ**

#### **1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ 10**

- 1.1. Завдання моніторингу довкілля 10
- 1.2. Класифікація систем моніторингу довкілля 11
- 1.3. Екологічний моніторинг 13
- 1.4. Глобальна система моніторингу навколишнього середовища 14
- 1.5. Організація фонових моніторингу довкілля 16
- 1.6. Організація національного (державного) моніторингу довкілля 18

#### **2. ОРГАНІЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ ЗА СКЛАДОВИМИ БІОСФЕРИ 21**

- 2.1. Організація спостережень за станом та якістю атмосферного повітря 21
  - 2.1.1. Пости спостереження за довкіллям 21
  - 2.1.2. Класифікація постів спостереження за якістю атмосферного повітря 21
  - 2.1.3. Розташування постів спостереження 21
  - 2.1.4. Програма спостережень 22
  - 2.1.5. Організація спостережень за станом та якістю атмосферного повітря в Україні 22
- 2.2. Організація спостережень за станом та якістю поверхневих вод 23
  - 2.2.1. Основні завдання моніторингу поверхневих вод 23
  - 2.2.2. Розміщення пунктів спостереження 24
  - 2.2.3. Програма спостережень 24
  - 2.2.4. Організація спостережень за забрудненням поверхневих та підземних вод в Україні 25
- 2.3. Організація спостережень за станом та якістю ґрунтів 26
  - 2.3.1. Основні завдання ґрунтового моніторингу 26
  - 2.3.2. Програма спостережень 27
  - 2.3.3. Організація спостережень за забрудненням ґрунтів в Україні 27

#### **3. ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА 28**

- 3.1. Основні терміни, що застосовуються у метрології 28
- 3.2. Фізичні одиниці 29

- 3.3. Засоби вимірювальної техніки 29
- 3.4. Основні характеристики засобів вимірювань 30
- 3.5. Шкала засобу вимірювання 31
- 3.6. Види вимірювань 32
- 3.7. Похибки вимірювань 33
- 3.8. Автоматизовані методи вимірювання 34

Практичне заняття. Вимоги до обробки результатів вимірювань 36

## **II. КЛІМАТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ 42**

### **4. ОРГАНІЗАЦІЯ КЛІМАТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ 42**

- 4.1. Метеорологічні станції 42
- 4.2. Автоматичні метеорологічні станції 44
- 4.3. Організація кліматичного моніторингу в Україні 46

### **5. ПРИРОДНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ 49**

- 5.1. Вимірювання сонячної сталої 49
- 5.2. Глобальне сонячне випромінювання 49
- 5.3. Розподіл сонячного випромінювання 50
- 5.4. Атмосферне випромінювання 51
- 5.5. Випромінювання земної поверхні 52
- 5.6. Випромінювальний баланс земної поверхні 52

### **6. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ПРИРОДНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ 54**

- 6.1. Класифікація методів вимірювання сонячного випромінювання 54
- 6.2. Вимірювання прямого сонячного випромінювання 55
- 6.3. Вимірювання дифузного випромінювання 56
- 6.4. Вимірювання глобального випромінювання 56
- 6.5. Вимірювання довгохвильового випромінювання 58
- 6.6. Вимірювання сумарного випромінювання 58
- 6.7. Вимірювання альbedo 59
- 6.8. Вимірювання енергетичного балансу 59
- 6.9. Спеціалізовані оцінки випромінювання 61

Семинарське заняття. Ультрафіолетове випромінювання 63

### **7. ТЕМПЕРАТУРНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА 64**

- 7.1. Температура атмосфери 64
- 7.2. Температура ґрунту 65
- 7.3. Температура водойм 70

- 7.4. Географічний розподіл температури 72
- 7.5. Температурні стресові ситуації 73
- Екстремальні значення температури 73*

## **8. ТЕПЛОВІ ПОТОКИ 74**

- 8.1. Теплопровідність 74
- 8.2. Відчутна теплота 74
- 8.3. Прихована теплота 75
- 8.4. Енергетичний баланс земної поверхні 77

## **9. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ 81**

- 9.1. Вимірювання температури 81
  - 9.1.1. Термометри опору 81
  - 9.1.2. Термоелектричні термометри 82
  - 9.1.3. Біметалевий термометр 82
  - 9.1.4. Метод інфрачервоної термометрії 83
  - 9.1.5. Кварцовий п'єзоелектричний термометр 85
  - 9.1.6. Дистанційні вимірювання температури 86
- 9.2. Методи автоматизованого вимірювання теплових потоків 86
  - 9.2.1. Сенсор теплових потоків 86
  - 9.2.2. Метод сцинтилометрії 88

*Практичне заняття. Моделювання вертикальних змін температури повітря 91*

## **10. АТМОСФЕРНИЙ ТИСК 95**

- 10.1. Вертикальний розподіл тиску 95
- 10.2. Атмосферне повітря як ідеальний газ 95
- 10.3. Гідростатична рівновага 95
- 10.4. Барометрична формула 96
- 10.5. Горизонтальний розподіл тиску 97
- 10.6. Однорідний розподіл температури та тиску 98
- 10.7. Неоднорідний розподіл температури та тиску 99
- Екстремальні значення атмосферного тиску 99*

## **11. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ 100**

- 11.1. Традиційні методи вимірювання атмосферного тиску 100
- 11.2. Методи автоматизованого вимірювання атмосферного тиску 103

## **12. ВІТЕР 108**

- 12.1. Параметри вітру 108
- 12.2. Причини виникнення вітру 108
- 12.3. Тиск та вітер 109

- 13. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІТРУ 111**
- 13.1. Анемометри 111
  - 13.2. Термоанемометр 112
  - 13.3. Ультразвуковий анемометр 112
  - 13.4. Содар 113
  - 13.5. Лідар 114
  - 13.6. Супутники 114
  - 13.7. Визначення напрямку вітру 115
  - Екстремальні значення вітру 117*
  - Практичне заняття. Моделювання зміни швидкості вітру 118*
- 14. МОНІТОРИНГ ЦИКЛОНІВ 124**
- 14.1. Механізми виникнення циклонів 124
  - 14.2. Механізми виникнення антициклонів 125
  - 14.3. Тропічні циклони 126
  - 14.4. Спостереження за циклонами 127
  - 14.5. Оцінювання циклонів 129
- 15. ВОЛОГІСТЬ 130**
- 15.1. Параметри вологості 130
  - 15.2. Просторовий розподіл водяної пари в атмосфері 131
  - 15.3. Індекс глобальної вологості 133
- 16. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ 134**
- 16.1. Аспіраційний психрометр Асмана 134
  - 16.2. Автоматизований аспіраційний психрометр Асмана 135
  - 16.3. Волосяний гігрометр 136
  - 16.4. Ємнісний гігрометр 137
  - 16.5. Конденсаційний гігрометр 138
  - 16.6. Сорбційний гігрометр 139
  - 16.7. Електролітичний гігрометр 139
  - 16.8. Інфрачервоний газовий аналізатор 139
  - 16.9. Відкрита система вимірювання вологості повітря 140
  - 16.10. Дистанційне вимірювання вологості 141
  - Екстремальні значення вологості повітря 142*
  - Практичне заняття. Вимірювання вологості за допомогою номограми 143*
- 17. ОПАДИ 146**
- 17.1. Параметри опадів 146
    - 17.1.1. Механізми виникнення опадів 146
    - 17.1.2. Стресові ситуації 148
    - 17.1.3. Географічний розподіл опадів 149

- 17.1.4. Температура та опади 150
- 17.2. Ізотопи в опадах 151
- Екстремальні значення опадів* 154

## **18. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ОПАДІВ** 155

- 18.1. Нахилені черпаки 155
- 18.2. Сифонний опадомір 155
- 18.3. Ваговий опадомір 156
- 18.4. Дистанційне зондування опадів 157
- 18.5. Вимірювання туманів 159

Практичне заняття. Вимірювання параметрів опадів 160

## **19. МЕТОД ВИХРОВОЇ КОВАРІАЦІЇ** 163

- 19.1. Турбулентність 163
- 19.2. Граничний шар атмосфери 164
- 19.3. Метод вихрової коваріації 165
- 19.4. Потік вертикального моменту 166
- 19.5. Перенесення аерозолів 166
- 19.6. Потік відчутної теплоти 167
- 19.7. Потік прихованої теплоти 168
- 19.8. Потік двоокису вуглецю 169

## **20. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ВИХРОВОЇ КОВАРІАЦІЇ ТА АКУМУЛЯЦІЇ** 170

- 20.1. Вимірювання вихрової коваріації 170
  - 20.1.1. Інфрачервоні газові аналізатори 172
  - 20.1.2. Практичні вимірювання вихрової коваріації 173
- 20.2. Вимірювання вихрової акумуляції 175

Практичне заняття. Обчислення коефіцієнтів коваріації та кореляції та їх порівняльний аналіз 177

## **21. ГЛОБАЛЬНІ ЗМІНИ КЛІМАТУ ТА ГЛОБАЛЬНЕ ПОТЕПЛІННЯ** 181

- 21.1. Клімат та причини його зміни 181
- 21.2. Система спостереження за глобальним кліматом 181
- 21.3. Глобальне потепління 183
- 21.4. Механізми глобального потепління 183
- 21.5. Двоокис вуглецю 186
- 21.6. Збільшення температури 187
- 21.7. Зменшення льодового покриву 188
- 21.8. Підймання рівня моря 190
- 21.9. Україна та глобальне потепління 192
- 21.10. Запобігання впливу кліматичних змін 194

Наукова робота. Моніторинг довкілля 195

### **III. БІОТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ 199**

#### **22. БІОІНДИКАЦІЯ ТА БІОТЕСТУВАННЯ 199**

- 22.1. Визначення біотичного моніторингу 199
- 22.2. Історія біотичного моніторингу 199
- 22.3. Біоіндикація 199
  - 22.3.1. Лишайники як біоіндикатори 200
  - 22.3.2. Водорості як біоіндикатори 200
  - 22.3.3. Забруднення органічними речовинами 201
  - 22.3.4. Індокси якості водойм 201
  - 22.3.5. Безхребетні як індикатори 205
  - 22.3.6. Біоіндикатори чистої води 205
  - 22.3.7. Біоіндикатори забрудненої води 205
  - 22.3.8. Риби як біоіндикатори 206
  - 22.3.9. Рослини як біоіндикатори 206
  - 22.3.10. Переваги та недоліки методів біоіндикації 206
- 22.4. Біотестування 207
  - 22.4.1. Бактерії як тест-об'єкти 207
  - 22.4.2. Гриби як тест-об'єкти 207
  - 22.4.3. Водорості як тест-об'єкти 207
  - 22.4.4. Безхребетні як тест-об'єкти 209
  - 22.4.5. Риби як тест-об'єкти 209
  - 22.4.6. Переваги та недоліки методів біотестування 211

### **IV. МОНІТОРИНГ ОСНОВНИХ СКЛАДОВИХ БІОСФЕРИ 212**

#### **23. МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ 212**

- 23.1. Атмосфера Землі 212
- 23.2. Джерела забруднень повітря 212
- 23.3. Первинні забруднюючі речовини та критерії забруднення повітря 213
- 23.4. Нормативи і стандарти якості атмосферного повітря 215
- 23.5. Якість повітря 217
- 23.6. Відбір проб повітря 217
- 23.7. Оксид вуглецю CO 219
- 23.8. Вимірювання оксиду вуглецю 220
- 23.9. Діоксид азоту NO<sub>2</sub> 220
- 23.10. Вимірювання діоксиду азоту 221
- 23.11. Атмосферний озон 222
- 23.12. Вимірювання атмосферного озону 222
- 23.13. Приземний озон 223
- 23.14. Вимірювання приземного озону 224
- 23.15. Частинки 225
- 23.16. Техніка уловлювання частинок 225

- 23.16.1 Інерційна багатокамерна система 225
- 23.16.2. Гравітаційна камера осідання 226
- 23.16.3. Змочувальна камера 227
- 23.16.4. Електростатичний уловлювач 227
- 23.16.5. Циклонний колектор 228
- 23.16.6. Дихотомна система 229
- 23.17. Діоксид сірки SO<sub>2</sub> 229
- 23.18. Вимірювання діоксиду сірки 230
- 23.19. Відкриті системи аналізу повітря 230
  - 23.19.1. Диференційна оптична спектроскопія поглинання 230
  - 23.19.2. Спектроскопія Фур'є перетворення 232
  - 23.19.3. Фур'є-спектрометр 234
  - 23.19.4. Відкрита система Фур'є-спектрометра 236
- 23.20. Мініатюрні системи газового аналізу на основі вологої хімії 236
  - 23.20.1. Краплинний колектор 237
  - 23.20.2. Вимірювання NO<sub>2</sub> на ppb рівні 238
  - 23.20.3. Мініатюрні мембрани з дифузійною пасткою 239
  - 23.20.4. Пористі скляні прилади 241
  - 23.20.5. Хемілюмінесцентний метод визначення оксидів азоту 242
  - 23.20.6. Вимірювання поглинання на основі реакції Сальцмана 242
  - 23.20.7. Мікросистеми газового аналізу для розчинених у воді газів 242
- 23.21. Мініатюрні системи газового аналізу на основі сухої хімії 245
  - 23.21.1. Методи хемілюмінесценції 245
  - 23.21.2. Леткі сірчані сполуки ЛСС 246
  - 23.21.3. Диметилсульфід ДМС 246
  - 23.21.3. Метилмеркаптан CH<sub>3</sub>SH 246
  - 23.21.4. Ізопрен 247
  - 23.21.5. Мікроекстракція твердої фази 248
  - 23.21.6. Метод предконцентрації 249
- 23.22. Автоматизовані системи спостереження за атмосферним повітрям 250
  - Практичне заняття. Частинки 252

## **24. МОНИТОРИНГ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ПРИМІЩЕНЬ 253**

- 24.1. Леткі органічні сполуки та їх характеристики 253
- 24.2. Вплив на здоров'я та токсичність летких органічних сполук (ЛОС) 254
- 24.3. «Синдром Хворого Будинку» 255
- 24.4. Оцінювання дії ЛОС 255
- 24.5. Запобігання впливу ЛОС на здоров'я мешканців у приміщеннях 256

## **25. МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА АНАЛІЗУ ЛОС 258**

- 25.1. Відбирання зразків та предконцентрація 258
  - 25.2. Газова хроматографія (ГХ) 259
  - 25.3. Мас-спектрометрія(МС) 261
  - 25.4. Комбінація методів хроматографії та мас-спектрометрії (ГХ/МС) 262
  - 25.5. Детектори в системах ГХ, МС та ГХ/МС 263
  - 25.6. Метод оптико-акустичної спектроскопії (ОАС) 264
  - 25.7. Техніка мас-спектрометрії на основі реакцій переносу протона (РПП/МС) 265
- Семінарське заняття. Шкідливість куріння 267

## **26. МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ҐРУНТУ 268**

- 26.1. Склад ґрунту 268
  - 26.2. Основні забруднюючі речовини у ґрунті 268
  - 26.3. Якість ґрунту 269
    - 26.3.1. Показники якості ґрунту 270
    - 26.3.2. Фізичні показники 270
    - 26.3.3. Хімічні показники 273
    - 26.3.4. Біологічні показники 276
    - 26.3.5. Фактори, що впливають на якість ґрунту 278
  - 26.4. Відбір проб ґрунтових зразків 278
  - 26.5. Нормативи і стандарти якості ґрунту 279
  - 26.6. Вимірювання забруднення ґрунту 280
    - 26.6.1. Оптична емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою 280
    - 26.6.2. Мас-спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІСП-МС) 282
  - 26.7. Ерозія ґрунтів 283
    - 26.7.1. Типи ерозії ґрунтів 283
    - 26.7.2. Вітрова ерозія 285
    - 26.7.3. Наслідки ерозійних процесів 285
    - 26.7.4. Моніторинг земель України 285
- Семінар. Моніторинг якості ґрунту 286
- Практичне завдання. Індекс якості ґрунту 287
- Практичне заняття. Визначення ерозійного індексу ґрунту. Універсальне рівняння втрат ґрунту 290

## **27. МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ВОДИ 293**

- 27.1. Властивості води 293
  - 27.1.1. Механічні властивості води 293
  - 27.1.2. Гідродинамічні властивості води 293
  - 27.1.3. Теплофізичні властивості 294
  - 27.1.4. Електричні властивості 294
  - 27.1.5. Оптичні властивості 294



- 27.2. Водні ресурси 295
  - 27.2.1. Ґрунтові води 295
  - 27.2.2. Поверхневі води 296
  - 27.2.3. Стічні води 296
- 27.3. Забруднення води 296
  - 27.3.1. Класифікація забруднюючих речовин 296
  - 27.3.2. Евтрофікація 297
  - 27.3.3. Транспортування та поширення забруднюючих речовин 298
  - 27.3.4. Важкі метали 299
- 27.4. Якість води 299
  - 27.4.1. Питна вода 299
  - 27.4.2. Нормативи і стандарти якості питної води 300
  - Се м і н а р. **Моніторинг якості води** 304
    - 27.4.3. Якість екорегіональних вод 304
    - 27.4.4. Якість води для сільського господарства 304
    - 27.4.5. Відбір проб зразків води 304
- 27.5. Моніторинг *in situ* поверхневих вод 305
  - 27.5.1. Концентрація розчиненого кисню 305
  - 27.5.2. Каламутність води 306
  - 27.5.3. Окисно-відновний потенціал 309
  - 27.5.4. Принципи дії електрохімічних методів 309
- 27.6. Вимірювання забруднення води 312
  - 27.6.1. Метод мас-спектрометрії з мембранним введенням (МСМВ) 313
  - 27.6.2. Модифікація методу МСМВ 313
- 27.7. Вимірювання потоку течії 314
- 27.8. Автоматизовані системи контролю якості води 315
- П р а к т и ч н е з а н я т т я. **Визначення індексу якості води** 316

## **28. МОНІТОРИНГ РОСЛИН ТА РОСЛИННИХ ПОКРИВІВ 319**

- 28.1. Спектроскопічний моніторинг рослинних об'єктів 319
- 28.2. Спектроскопія відбивання 319
  - 28.2.1. Спектр відбивання зеленого листка 319
  - 28.2.2. Методи спектроскопії відбивання 320
  - 28.2.3. Відбивальні вегетаційні індекси 321
  - 28.2.4. Вплив різних факторів на відбивання листка 321
- 28.3. Флуоресцентна спектроскопія 321
  - 28.3.1. Флуоресцентні властивості окремого листка 321
  - 28.3.2. Методи флуоресцентної спектроскопії 322
  - 28.3.3. Флуоресцентні індекси 326
  - 28.3.4. Вплив різних факторів на флуоресцентні властивості окремого листка 328
- 28.4. Дистанційне вимірювання відбивання рослинних покривів 328

- 28.4.1. Спектральні ділянки *MSS* та *TM* 328
- 28.4.2. Відбивальні властивості рослинного покриву 330
- 28.4.3. Спектральні вегетаційні індекси, що використовують під час дистанційного зондування 331
- 28.4.4. Вплив різних факторів на відбивання рослинного покриву 332
- 28.4.5. Вплив різних факторів на флуоресценцію рослинного покриву 332

Практичне завдання. Перпендикулярний вегетаційний індекс *PVI* 333

## **V. ОСОБЛИВІ ВИДИ ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА 336**

### **29. ФІЗИЧНІ ЗАБРУДНЕННЯ 336**

- 29.1. Вібраційні забруднення 336
- 29.2. Шумове забруднення 338
  - 29.2.1. Основні визначення 338
  - 29.2.2. Вплив шуму на живі організми 338
  - 29.2.3. Заходи проти шумового забруднення 339
- 29.3. Електромагнітне забруднення 340
- 29.4. Світлове забруднення 341
- 29.5. Радіоактивне забруднення 342
  - 29.5.1. Основні завдання радіоекологічного моніторингу 342
  - 29.5.2. Джерела радіоактивного забруднення 343
  - 29.5.3. Радіоактивні відходи 343
  - 29.5.4. Система раннього попередження про радіаційну аварію Гамма-1 346

Семінарське заняття. Тверді відходи 347

Практичне заняття. Моделювання поширення забруднень в атмосфері 349

## **VI. ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ БІОСФЕРИ 356**

### **30. ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ 356**

- 30.1. Поширення електромагнітного випромінювання крізь атмосферу 356
- 30.2. Класифікація систем дистанційного зондування 358
  - 30.2.1. Реєстрація  $\gamma$ - випромінювання 359
  - 30.2.2. Фотографічні та відеографічні системи 359
  - 30.2.3. Багатоспектральні сканери 359
  - 30.2.4. Теплові сенсори 360
  - 30.2.5. Надвисокочастотні (НВЧ) локатори 361
  - 30.2.6. Дистанційне зондування рослинних покривів 362
  - 30.2.7. Лідари 364

- 30.3. Застосування дистанційного зондування 370  
Практичне завдання. Дистанційне зондування  
навколишнього середовища 372

## **VII. ПРИКЛАДИ ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ ПІСЛЯ АНАЛІЗУ МОНІТОРИНГОВИХ ДАНИХ 375**

### **31. *Ex situ* РЕМЕДІАЦІЯ 375**

- 31.1. Ремедіація ґрунту 375
- 31.2. Технології ремедіації 376
- 31.3. Утримання забруднювачів 376
  - 31.3.1. Фізичні бар'єри 376
  - 31.3.2. Пасивні та реактивні бар'єри 376
  - 31.3.3. Гідравлічні бар'єри 377
- 31.4. Віддалення забруднювачів 378
  - 31.4.1. Викопування ґрунту 378
  - 31.4.2. Накачування та обробка 378
  - 31.4.3. Прискорена промивка 380
  - 31.4.4. Ґрунтова парова екстракція 380
  - 31.4.5. Розпилення повітря 382
  - 31.4.6. Теплові методи 383
  - 31.4.7. Електрокінетичний метод 384

### **32. *Ex Situ* БІОРЕМЕДІАЦІЯ 386**

- 32.1. Заорювання 386
- 32.2. Компостування 386
- 32.3. Біокупа 386

### **33. *In Situ* БІОРЕМЕДІАЦІЯ 388**

- 33.1. Технології *in situ* біоремедіації 388
- 33.2. Додавання кисню 388
- 33.3. Біообдування 389
- 33.4. Додавання поживних речовин 391
- 33.5. Додавання мікроорганізмів 391
- 33.6. Фіторемедіація 391
  - 33.6.1. Основні процеси фіторемедіації 391
  - 33.6.2. Механізми фітотрансформації 392
  - 33.6.3. Фіторемедіація радіонуклідів 393

### **34. НАНОТЕХНОЛОГІЇ У РЕМЕДІАЦІЇ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА 397**

- 34.1. Нанотехнології 397
- 34.2. Наночастинки 397
  - 34.2.1. Залізо нульової валентності 398
  - 34.2.2. Окисно-відновний потенціал 401

- 34.2.3. Біметалеві наночастинки 403
- 34.2.4. Емульсифіковані частинки 403
- 34.3. Наноматеріали 404
  - 34.3.1. Графен та фулерен 404
  - 34.3.2. Самоорганізуючі моношари на мезопористій підкладці 405
  - 34.3.3. Нанотрубки 405
  - 34.3.4. Феритини 406
  - 34.3.5. Дендримери 406
  - 34.3.6. Металопорфірини 407
  - 34.3.7. SOMS (Swells of Organically Modified Silica) або Osorb (Organic Sorbtion) 407
- 34.4. Фільтрація частинок 408
  - 34.4.1. Мікрофільтрація 408
  - 34.4.2. Ультрафільтрація 408
  - 34.4.3. Нанофільтрація 408
  - 34.4.4. Зворотний осмос 408
- 34.5. Мікробіологічний синтез наночастинок 411
- 34.6. Нанозабруднення 412

**ДОДАТКИ 414**

**ЛІТЕРАТУРА 417**

## УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

AIST – Japan's National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  
AMeDAS – Automated Meteorological Data Acquisition System  
AQI – Air Quality Index  
BDCM – bromodichloromethane  
BLM – Bureau of Land Management  
BR – Bureau of Reclamation  
BRIM – Biosphere Reserve Integrated Monitoring  
BTEX – benzene, toluene, ethylbenzene, xylene  
CDC – Centers for Disease Control and Prevention  
CT – carbon tetrachloride  
DOAS – Differential Optical Absorption Spectroscopy  
DOD – U.S. Army Corp of Engineers Department of Defense  
DOE – Federal Energy Regulatory Commission (FERC) Department of Energy  
EEA – European Environment Agency  
EMAN – Ecological Monitoring and Assessment Network  
EPA – Environmental Protection Agency  
EPA – Environmental Protection Agency  
ESA – Economics and Statistics Administration  
FDA – Food and Drug Administration  
FERC – Federal Energy Regulatory Commission  
FMA –Fluorescein mercury acetate  
FNU – Formazin Nephelometric Unit  
GAW – Global Atmosphere Watch  
GEMS – Global Environmental Monitoring System  
GEO – The Group on Earth Observations  
GEOSS – Global Earth Observation System of Systems  
GHI – Global Humidity Index  
GMES – Global Monitoring for Environment and Security  
GOME – Global Ozone Monitoring Experiment  
GS – Griess-Saltzman  
IAEA – International Atomic Energy Agency  
IBSRAM – International Board for Soil Research Management  
ICMESA – Industrie Chimiche Meda Societa Azionaria  
IEA – International Energy Administration  
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change  
JMA – Japan Meteorological Agency  
LIDAR – **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging  
MAB – The Man and the Biosphere Programme  
MCS – Microchannel Scriber  
NAPL – Non-Aqueous Phase Liquids  
NASA – National Aeronautics and Space Administration  
NBIS – National Biological Information Service

NESDIS – National Environmental Satellite, Data & Information Service  
 NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration  
 NODC – National Oceanic Data Center  
 NPS – U.S. Fish and Wildlife National Park Service  
 NRE – National Resources & Environment  
 NTU – Nephelometric Turbidity Units  
 NWS – National Weather Service  
 OSM – Office of Surface Mining  
 Osorb – Organic Sorbtion  
 PDMS – Polydimethylsiloxane  
 PEMSEA – Partnerships in Environmental Management for the Seas of East Asia  
 PET – Potential Evapotranspiration  
 ppb – parts per milliard (billion)  
 ppm – parts per million  
 pPTFE – Porous Polytetrafluoroethylene  
 RADAR – Radio Detection And Ranging  
 RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation  
 SAMMS™ – Self-Assembled Monolayers on Mesoporous Supports  
 SCOPE-CM – The Sustained, Co-Ordinated Processing of Environmental Satellite Data for Climate Monitoring  
 SLAP – Standard Light Antarctic Precipitation  
 SODAR – **SO**und **D**etection **A**nd **R**anging  
 SOMS – Swells of Organically Modified Silica  
 TCE – Trichloroethylene  
 TRMM – Tropical Rainfall Measuring Mission  
 UNEP – United Nations Environment Programme  
 UNSO – United Nations Statistical Office  
 USCB –U.S. Census Bureau  
 USDA – U.S. Department of Agriculture  
 USGS – U.S. Geological Survey  
 VC – Vinyl Chloride  
 VPDB – Vienna Pee Dee Belemnite  
 VSMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water  
 VSMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water  
 WMO – World Meteorological Organization  
 WQI -Water Quality Index  
 WWW – World Weather Watch  
 ZVI – Zero-Valent Iron  
 PM – Particulate Matter  
 pPP – Porous Polypropylene  
 АДР – дигідрофосфат амонію  
 АЕС-ІЗП – атомна емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою  
 АНКОС-АГ – автоматизована система спостереження і контролю атмосферного повітря

АСКНС-АГ – автоматизована система спостереження і контролю атмосферного повітря  
АСКПВ – автоматична станція контролю поверхневих вод  
АСКЯВ – автоматична станція контролю якості води  
АЦП – аналого-цифровий перетворювач  
ГПЕ – ґрунтова парова екстракція  
ГПФФ – густина потоку фотосинтетичних фотонів  
ГСС – глобальна система спостережень  
ГССК – глобальна система спостереження за кліматом  
ГХ – газова хроматографія  
ГХ/МС – комбінація методів хроматографії та мас-спектрометрії  
Держводгосп – Державний Комітет України по водному господарству  
Держгідромет – Державна гідрометеорологічна служба  
Держжитлокомунгосп – Державний комітет України з питань житлово-комунального господарств  
Держкомзем – Державний комітет України із земельних ресурсів  
Держкомлісгосп – Державне агентство лісових ресурсів України  
ДМС – диметилсульфід  
ДСанПіН – Державні санітарні норми та правила  
ЕЗНВ – емульсифіковані частинки заліза нульової валентності  
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина  
ЗДССК – загальнодержавна служба спостережень і контролю довкілля  
ЗЛОС – загальні леткі органічні сполуки  
ІЗП – індуктивно-зв'язана плазма  
ІЧГА – інфрачервоний газовий аналізатор  
КБА – коефіцієнт біоаккумуляції  
КОЄ – катіон-обмінна ємність  
ЛОС – леткі органічні сполуки  
ЛСЗПВ – Лабораторія спостережень за забрудненням поверхневих вод  
Мінагрополітики – Міністерство аграрної політики та продовольства України  
Мінприроди – Міністерство екології та природних ресурсів України  
МНС – Міністерство надзвичайних ситуацій  
МОЗ – Міністерство охорони здоров'я  
МС – мас-спектрометрія  
МС-ІЗП – мас-спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою  
МСМВ – метод мас-спектрометрії з мемб раннім введенням  
МТБЕ – метил-трет-бутиловий ефір  
НВЧ – надвисокі частоти  
НК МАБ України – Національний комітет України з програми ЮНЕСКО «Людина і біосфера»  
НЛОС – напівлеткі органічні сполуки  
ОАС – оптико-акустична спектроскопія  
ОВП – окисно-відновний потенціал

ОЕС-ІЗП – оптична емісійна спектроскопія з індуктивно зв’язаною плазмою  
ПАВ – поліциклічні ароматичні вуглеводні  
ПОКК – проблемно-орієнтований комплекс контролю забруднень  
РПП/МС – техніка мас-спектрометрії на основі реакцій перенесення протона  
СПЗ – стаціонарний пост спостережень за забрудненням  
СТР – суспендовані тверді речовини  
ФАВ – фотосинтетично активне випромінювання  
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач  
ЦГО – Центральна Геофізична Обсерваторія  
ЧАЕС – Чорнобильська атомна електростанція



## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Юрій Посудін – доктор біологічних наук, професор Національного університету біоресурсів та природокористування України.

Закінчив 1969 року радіофізичний факультет Державного університету ім. Шевченка. Захистив дисертації на здобуття вченого ступеня: у 1977 р. – кандидата фізико-математичних наук (Інститут радіотехніки та електроніки АН СРСР, Москва), у 1992 р. – доктора біологічних наук (Агрофізичний Інститут, Санкт-Петербург).

Сферою наукових інтересів є дослідження фоторуху водоростей та флуоресцентний аналіз рослин.

Педагогічна діяльність проф. Ю. Посудіна пов'язана з викладанням дисциплін «Біофізика навколишнього середовища», «Біофізика та фізичні методи аналізу», «Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища», «Моніторинг довкілля з основами метрології».



### **Наукова та лекційна діяльність за кордоном:**

Visiting Researcher, Institute of Biophysics CNR, Pisa, Italy, 1979-1980, *Laser in vivo Microspectrofluorometry Photopigments of Euglena gracilis*.

Visiting Researcher, German Scientific Foundation (DAAD) Grant, Erlangen University, 1993, *Investigation of Gravitaxis of Dunaliella salina* Teod.

Visiting Lecturer, J.W.Fulbright Scholarship, University of Georgia, U.S.A., 1996, *Series of Lectures: "Environmental Pollution Control: A Spectroscopic Approach"*.

Visiting Researcher, German Scientific Foundation (DAAD) Grant, Karlsruhe University, 1997 *Fluorescence Analysis of Green Pea Pisum sativum*.

Visiting Researcher, Spain, University of Malaga, 2000, *Acquisition of Carbon Inorganic by Brown Alga Petalonia fascia*.

Visiting Researcher, U.S.A, University of Georgia, 2001, *Laser Noninvasive Blood Glucose Monitoring*.

Visiting Researcher, Japan, Kobe University Research Center for Inland Seas, 2002 *PAM-fluorometry of Ulva pertusa under High Irradiance*.

Visiting Researcher, German Scientific Foundation (DAAD) Grant, Alfred-Wegener-Institute for Polar and Marine Research, Bremenhaven, Germany, 2003, *Effect of Ultraviolet Radiation on Photobiological Reactions of Algae*.

Visiting Researcher, Japan, University of Toyama, Faculty of Science, Dep. of Environmental Biology and Chemistry; Kyushu University, Faculty of Agriculture, Department of Forest and Forest Products Sciences, 2007, *Experimental Investigation of Mass Exchange between Mountain Plants and their Environment*”.

Visiting Researcher, U.S.A, University of Georgia, 2008, *Phytoremediation of Indoor Air using Ornamental Plants*.

Visiting Lecturer, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2010, Series of Lectures “*Environmental Monitoring and Remediation*”.

Participant of Curriculum Resource Center, Department of Environmental Sciences and Policy, Central European University, Budapest, Hungary, 2010. Course “*Environmental Monitoring with Fundamentals of Metrology*”

Visiting Lecturer, Jyväskylä University, Finland, 2010, Series of Lectures “*Physical Tools in Environmental Monitoring*”.

### **Основні публікації:**

Посудін Ю. І. *Біофізика водного середовища* / Посудін Ю. І., Грицай В. Й. – Київ: Вид-во НУБіП України, 2011. – 126 с.

Посудін Ю. І. *Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища: підручник* / Ю. І. Посудін. – Київ, 2011. – 340 с. : іл.

Посудін Ю. І. *Біофізика рослин* / Посудін Ю. І. – Вінниця: Нова книга, 2004. – 252 с.

Посудін Ю. І. *Біофізика: підручник* / Посудін Ю. І. – Київ: Урожай, 1995. – 222 с.

Посудин Ю. И. *Физика для биологов и экологов: учебник* / Посудин Ю. И. – Киев; Пушино: электр. изд-во “Аналитическая микроскопия”, 2012. – 464 с. <http://cam.psn.ru/books.asp>

Посудін Ю. І. *Лабораторний практикум і збірник задач із дисципліни “Фізика з основами біофізики”*: навч. посібник / Посудін Ю. І. – Київ: Арістей, 2004. – 178 с.

Посудін Ю. І. *Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища* / Посудін Ю. І. – Київ: Світ, 2003. – 286 с.

Посудін Ю. І. *Методи неруйнівної оцінки якості та безпеки сільськогосподарських і харчових продуктів* / Посудін Ю. І. – Київ: Арістей, 2005. – 407 с.

Посудин Ю. И. *Наука и контроль окружающей среды* / Посудин Ю. И. // *Человек-Техника-Природа*. – Київ: Вища школа, 1990. – С. 26-33.

Посудін Ю. І. *Методи і засоби моніторингових досліджень* / Посудін Ю. І. // *Моніторинг довкілля: підручник* / за ред. В. М. Боголюбова, Т. А. Сафранова. – Херсон: Грінь Д. С., 2012. – С. 324-342.

Посудін Ю. І. *Практикум з методів вимірювання параметрів навколишнього середовища* / Посудін Ю. І. – Київ: ЗАТ “НІЧЛАВА”, 2007. – 226 с.

Посудін Ю. І. *Спектроскопічний моніторинг агросфери: навч. посібник* / Посудін Ю. І. – Київ: Урожай, 1998. – 127 с.

Посудін Ю. І. *Фізика* / Посудін Ю. І. – Біла Церква: Вид-во БНАУ, 2008. – 463 с.

Посудін Ю. І. *Фізика з основами біофізики* / Посудін Ю. І. – Київ: Світ, 2003. – 400 с.

Посудін Ю. І. *Фізика і біофізика навколишнього середовища* / Посудін Ю. І. – Київ: Світ, 2000. – 300 с.

Posudin Yuri I. *Lasers in Agriculture* / Posudin Yuri I. – USA, Enfield, N. H.: Science Publishers, 1998. – 188 p.: ill.

Posudin Yuri I. *Physics with Fundamentals of Biophysics* / Posudin Yuri I. – Kyiv: Agrarna nauka, 2004. – 195 p., [4] p. of plates: ill. (some col.).

Posudin Yuriy I. *Environmental Biophysics* / Posudin Yuriy. – Fukuoka; Kiev, 2011. – 179 [5] p. URI:

<http://www.ekmair.ukma.kiev.ua/handle/123456789/951>

Posudin Yuriy I. *Photomovement of Dunaliella Teod* / Posudin, Yuriy I.; Massjuk, Nadiya P.; Lilitskaya, Galyna G. – Wiesbaden: Vieweg+Teubner / Springer, 2010. – 224 p.

Posudin Yuriy. *Practical Spectroscopy in Agriculture and Food Science* / Posudin Yuriy. – USA, Enfield, N. H.: Science Publishers, 2007. – xi, 196 p.: ill. (some col.).



## ПЕРЕДМОВА

У науковій та навчальній літературі висвітлені основні проблеми моніторингу довкілля [1-8]. Проте більшість навчальних посібників та підручників з моніторингу довкілля, виданих за останні роки в Україні, присвячена в основному загальним положенням та організації моніторингу за складовими біосфери. Втім, питання вимірювання та аналізу параметрів навколишнього середовища в цих джерелах або не розкриті взагалі, або згадуються фрагментарно. Слід зазначити, що відповідно до Освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів за напрямом 8.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природо-користування», яка затверджена як Галузевий стандарт вищої освіти України у 2011 р., у склад навчальної дисципліни «Моніторинг довкілля» входять змістовні модулі пов'язані з класифікацією методів та методикою проведення вимірювань складу та властивостей різних компонентів навколишнього середовища. Основні поняття метрології та методи вимірювання параметрів навколишнього середовища розглянуті у навчальній літературі [13-18], але інформація щодо принципів дії сучасних приладів та застосування інструментальних методів вже застаріла і потребує оновлення.

Метою підручника «Моніторинг довкілля з основами метрології» є вивчення:

1. Основних принципів організації системи моніторингу довкілля та спостережень за основними складовими біосфери;
2. Ситуації щодо зростання населення земної кулі та пов'язаних з цим збільшенням споживання енергії (що викликає відповідне вичерпання джерел енергії та паливних запасів); світового використання добрив; концентрації забруднюючих речовин (двоокису вуглецю, двоокису азоту, сірководню, сірчаного газу, вуглеводню та ін.) в біосфері; дефіциту ріллі; нагромадження звичайних та небезпечних відходів;
3. Кліматичних факторів середовища, таких як атмосферний тиск, вітер, опади, вологість повітря та ґрунту, температура компонентів біосфери, теплові потоки, природні випромінювання та взаємодії цих факторів;
4. Причин та наслідків глобальних змін клімату;
5. Біотичних факторів середовища, їх реакції на антропогенні впливи, принципів біоіндикації та біотестування;
6. Стану та якості атмосфери, повітря міст та приміщень, джерел забруднень та поширення забруднюючих речовин;
7. Стану та якості ґрунту, джерел забруднень ґрунту, принципів захисту ґрунтових ресурсів від виснаження та деградації;
8. Стану та якості поверхневих та ґрунтових вод, водних ресурсів, джерел забруднення води, принципів захисту громадського водопостачання та впровадження технологій очищення води;
9. Стану та якості рослин та рослинних покривів під впливом стресових ситуацій;

10. Фізичних забруднень навколишнього середовища, зокрема вібраційних, шумових, електромагнітних, світлових, радіоактивних;

11. Основних методів та принципів дії приладів для вимірювання параметрів навколишнього середовища, в тому числі засобів автоматизованого та дистанційного зондування компонентів біосфери;

12. Принципів захисту навколишнього середовища за допомогою технологій ремедіації, біоремедіації та фіторемедіації.

У даному підручнику розглянуто такі сучасні прилади і методи вимірювання, оцінювання, аналізу стану та якості різних компонентів навколишнього середовища, а також передові технології оновлення природних ресурсів:

- Радіометри, призначені для вимірювання прямого та дифузного сонячного випромінювання, глобального та сумарного випромінювання, альбедо (піргеліометри, піранометри, піргеометри, піррадіометри, альбедометри, балансометри, квантові сенсори, люксометри);
- Термометри та сенсори теплових потоків: термометри опору, біметалеві термометри, термоелектричні термометри, інфрачервоні термометри, сенсори теплових потоків, сцинтилометри;
- Вимірювачі атмосферного тиску: барометри, барографи, цифрові барометричні сенсори тиску, п'єзоелектричні сенсори тиску;
- Анемометри: чашечковий та пропелерний, термоанемометр, ультразвуковий анемометр, содар, лідар;
- Психрометри та гігрометри: автоматизований аспіраційний психрометр Асмана, емнісний гігрометр, конденсаційний гігрометр, системи дистанційного вимірювання вологості;
- Опадоміри: нахилені черпаки, сифонний опадомір, методи дистанційного зондування опадів;
- Методи вихрової коваріації та акумуляції: методи вимірювання потоку вертикального моменту, відчутної теплоти, прихованої теплоти, двоокису вуглецю;
- Методи оцінювання стану та якості атмосферного повітря: метод інфрачервоного поглинання, хемілюмінесцентний метод, ультрафіолетова фотометрія, флуоресцентний метод;
- Техніка уловлювання частинок: інерційна багатокамерна система, гравітаційна камера осідання, змочуюча камера, електростатичний уловлювач, циклонний колектор, дихотомна система;
- Методи кількісного та якісного аналізу забруднюючих речовин у повітрі: газова хроматографія (ГХ), мас-спектрометрія (МС), комбінація методів хроматографії та мас-спектрометрії (ГХ/МС), детектори у системах ГХ, МС та ГХ/МС, метод оптико-акустичної спектроскопії (ОАС), техніка мас-спектрометрії на основі реакцій перенесення протона (РПП/МС);



- Методи оцінювання якості води: рівня рН, електропровідності, концентрації розчиненого кисню, каламутності води, окисно-відновного потенціалу, вимірювання потоку течії;
- Мініатюрні системи газового аналізу: мініатюрні мембрани з дифузійною пасткою, пористі трубчаті колектори/детектори та рідкі світловоди, пористі скляні прилади, вимірювання поглинання на основі реакції Сальцмана, мікросистеми газового аналізу для розчинених у воді газів, мікроекстракція твердої фази, метод предконцентрації;
- Відкриті системи аналізу повітря: диференційна оптична спектроскопія поглинання, спектроскопія Фур'є перетворення; оптична емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою (ОЕС-ІЗП); мас-спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою (МС-ІЗП); метод мас-спектрометрії з мембранним введенням (МСМВ); діоксиновий сенсор;
- Методи визначення стану рослинних покривів на основі спектроскопії відбивання та флуоресценції;
- Методи дистанційного зондування біосфери на основі реєстрації  $\gamma$  випромінювання, фотографічні та відеографічні системи, багатоспектральні сканери, теплові сенсори, надвисокочастотні локатори, методи лазерного дистанційного зондування;
- Методи та технології ремедіації довкілля: утримання забруднювачів, віддалення забруднювачів, накачування та обробка, прискорена промивка, ґрунтова парова екстракція, розпилення повітря, теплові методи, електрокінетичний метод;
- Технології застосування наночастинок у ремедіації: заліза нульової валентності, біметалевих наночастинок, емульсифікованих частинок;
- Технології застосування наноматеріалів в ремедіації: графена та фулерена, самоорганізуючих моношарів на мезопористій підкладці, нанотрубок, дендримерів, металопорфіринів, SOMS (Swells of Organically Modified Silica) або Osorb (Organic Sorbtion);
- Методи нанофільтрації: мікрофільтрації, ультрафільтрації, нанофільтрації, зворотного осмосу.

Для більшості методів пропонується аналіз переваг та недоліків.

Основні акценти у цьому підручнику зроблено на моніторингу стану та якості основних компонентів довкілля: атмосфери, ґрунту, води. Особлива увага приділена кліматичним факторам середовища, їх взаємодії між собою та сучасним (автоматизованим та дистанційним) методам їх вимірювання.

Вперше розглянуто методи вихрової коваріації та акумуляції, які дають можливість оцінити перенесення у граничному шарі атмосфери потоків імпульсу, відчутної та прихованої теплоти, аерозолів та двоокису вуглецю.

Оригінальним є розділ, присвячений моніторингу якості повітря приміщень: відомо, що сучасна людина проводить близько 90 % свого часу у закритому просторі, де концентрація забруднюючих речовин більша, ніж

у зовнішньому повітрі. З погіршенням якості повітря приміщень пов'язаний «синдром хворого будинку» – комплекс захворювань, притаманний мешканцям приміщень.

Хоча в розділах, присвячених моніторингу складових біосфери, розглядаються практичні застосування дистанційного зондування, в окремому розділі підручника розглянуто принципи дистанційного моніторингу біосфери.

Як приклад налагодження управлінських рішень після аналізу моніторингових даних у підручнику висвітлюються принципи та сучасні технології ремедіації навколишнього середовища – процесу вилучення забруднюючих речовин з навколишнього середовища, зокрема з ґрунту, підземних та поверхневих вод, а також атмосфери з метою захисту здоров'я людини та довкілля.

Підручник містить приклади розв'язування практичних проблем, контрольні завдання та запитання, відповіді на які студенти зможуть дати завдяки ознайомленню з відповідними розділами підручника; крім того, пропонуються конструктивні тести, прямих відповідей на які нема в підручнику, але студент повинен дати відповідь самостійно. Наводяться приклади моделювання явищ та процесів, що відбуваються у навколишньому середовищі. Для обговорення тем основних розділів та дискусій у підручнику запропоновані програми семінарських занять. Інформативний матеріал подано у додатках.

Підручник призначений для студентів вищих навчальних закладів III - IV рівнів акредитації за напрямом 6.040106 – Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування.

Автор висловлює глибоку вдячність Г.О. Білявському за щирі моральну підтримку, яка уможливила видання цього підручника; І.Л. Якименко та В.М. Боголюбову за корисні критичні зауваження, висловлені під час обговорення рукопису; О.І. Гриник за ретельне редагування тексту рукопису.

*Юрій Посудін,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України*



*Understanding that the world does not belong to any one nation or generation, and sharing a spirit of utmost urgency, we dedicate ourselves to undertake bold action to cherish and protect the environment of our planetary home.*

Al Gore  
September 16, 1992,  
Sioux Fall, South Dakota

## ВСТУП

У 2011 р. кількість населення земної кулі досягла близько 7 мільярдів. З точки зору прогнозування зростання населення у майбутньому (зокрема у 2300 р.) можливі три сценарії: середній рівень зростання (9 млрд); низький рівень (2,3 млрд) та високий рівень (36,4 млрд).

Зі зростанням населення земної кулі пов'язані такі процеси як *індустріалізація* – процес соціальних та економічних змін, внаслідок яких людство переходить від до-індустріального суспільства до індустріального, та *урбанізація* – збільшення частки населення, що мешкає у містах за рахунок міграції з сільських районів або завдяки природній народжуваності. Характерною ознакою демографічного зростання є поява *мегаполісів* (від грецького μήτηρ, *mētēr* – мати та πόλις, *pólis* – місто) – великих міст з населенням понад 1 млн мешканців. У 2006 р. близько 30 міст світу мали населення, кількість якого перевищувала 8 млн мешканців.

Відповідно до експоненціального закону зростання населення земної кулі збільшується також споживання енергії; світове використання добрив; концентрація забруднюючих речовин (таких як двоокис вуглецю, двоокис азоту, сірководень, сірчаний газ, вуглеводень та інші); дефіцит ріллі; нагромадження радіоактивних відходів. Людство вже досягнуло або досягне у найближчому майбутньому максимумів добування природного палива: нафти – у 2007 р.; вугілля – у 2025 р.; газу – у 2025 р. Споживання електроенергії за рахунок гідроелектростанцій збільшиться на 40% до 2050 р. Можливо, саме проблемами з добуванням природного палива можна пояснити виникнення військових конфліктів у різних частинах світу.

Зростання населення земної кулі та пов'язані з цим збільшення споживання енергії; нестача продуктів харчування; погіршення якості води та повітря внаслідок швидких темпів індустріалізації та урбанізації; вплив забруднень біосфери на клімат планети, біогеохімічні кругообіги, фауну та флору – все це зумовлює безпрецедентну кризу навколишнього середовища.



Внаслідок парникового ефекту порушується тепловий баланс; цілком ймовірним є підвищення глобальної температури поверхні Землі за рахунок зміни концентрації парникових газів, що може призвести до зміни клімату. Збільшення глобальної температури призводить до танення полярного льоду та теплового розширення об'єму океану, що врешті-решт може викликати збільшення рівня Світового океану. Наслідками цього можуть стати затоплення територій, де живуть сотні мільйонів людей ерозія узбережжя; повені; інгібування процесів утворення первинної продукції; зміна якості поверхневих та ґрунтових вод. Глобальне потепління є причиною таких стихійних лих як сильні повені, урагани, цунамі та посухи. Зміни клімату можуть викликати міграцію населення.

Ознаками екологічної кризи є природні та антропогенні екологічні катастрофи. Лише з початку XXI ст. у світі відбулися значні катастрофи, що супроводжувалися людськими жертвами та завдали непоправної шкоди довкіллю.

Слід зазначити інтенсивні землетруси та цунамі в Індійському океані 2004 р. (225000 жертв); землетруси у Пакистані 2005 р. (74500 жертв); Сичуані, Китай 2008 р. (69000 жертв); Гаїті 2010 р. (320000 жертв); ураган «Катріна» у 2005 р., найбільш руйнівний ураган в історії США; циклон «Наргіс» у 2005 р. (М'янма (до 1989 - Бірма)) землетрус та цунамі в Японії у 2011 р.

Внаслідок виверження вулкану Ейяф'ялайокуль у Ісландії було не лише накрито небезпечним попелом половину території Європи, але й паралізовано авіаперевезення у багатьох країнах.

У 2003 р. несподівана спека у Європі спричинила 40000 смертельних випадків, а у 2010 р. надзвичайно висока температура в Росії викликала 15000 смертельних випадків та численні пожежі.

Потужні повені відбулися в Австралії та Бразилії у 2010-2011 рр.

До антропогенних катастроф слід віднести вибух у 2001 р. на хімічному заводі AZF в Тулузі (Франція), який спричинив збитків на 1800 млн євро; масштабну аварію на нафтовій платформі британської компанії British Petroleum у 2010 р., що стала найбільшою екологічною катастрофою в історії США; руйнування резервуару з так званим червоним шламом в угорському регіоні Веспрем (2010 р.); виявлення діоксину у 2010 р. у кормах на свино- та птахофермах Німеччини.

Почастішали аварійні ситуації авіаційного, залізничного та водного транспорту.

Не можна не враховувати згубної дії на навколишнє середовище експлуатації військової техніки та освоєння космосу. У 2000 р. у житловий будинок у м. Бровари влучила тактична ракета, що спричинило смерть трьох мешканців. У 2001 р. іншою українською ракетою під час навчань у Криму було збито російський лайнер, внаслідок чого 78 осіб загинуло. Упродовж останніх років відбулися пожежі та вибухи військових арсеналів у м. Артемівськ Донецької обл. (2003 р.), поблизу села Новобогданівка Запорізької обл. (2004 р.) та у м. Лозова Харківської обл. (2008 р.), які спри-

чинили великі збитки; мали місце також вибухи боєприпасів на військових складах в Ульяновську (2009 р.), Башкирії та Удмуртії (2011 р.).

Трапляються інциденти і в космосі. На висоті 790 км над Сибіром у 2009 р. зіткнулися два супутника – російський «Космос-2251» та американський «Іридиум-33». У 2006 р. уламки російського військового супутника ледве не зачепили латиноамериканський аеробус з 279 пасажирами на борту. Випробування китайської антисупутникової зброї у 2007 р. призвели до розпорошування у космосі, й без того вкрай засміченого, близько 2300 уламків та незліченої кількості дрібніших предметів. Нагадаємо, що 24 серпня 2011 р. після запуску з космодрому Байконур вантажний корабель Прогрес М-12М не зміг вийти на розрахункову орбіту; фрагменти космічної вантажівки впали в Чойському районі Республіки Алтай. Запущена на початку листопада цього ж року російська міжпланетна станція "Фобос-Грунт" так і не змогла долетіти до Марса. Уламки російського супутника "Меридіан", що не зміг вийти на орбіту, за іронією, впали на вулицю Космонавтів у селищі Вагайцево Новосибірської області. Ніхто не постраждав, проте один з фрагментів влучив у хату одного з селян.

Тобто, ми живемо у вкрай складний час з точки зору стану навколишнього середовища та різноманітних екологічних катаклізмів. Саме через це спостереження за навколишнім середовищем з метою одержання даних, що містять корисну інформацію та надають можливість прийняти певні рішення, здійснити контроль за ростом населення земної кулі, забезпечити захист природних ресурсів, оцінити якість повітря міст та приміщень, ґрунту та води, передбачити погоду та глобальні зміни клімату, допомогти у плануванні земельних ресурсів та громадського водопостачання, утилізації небезпечних відходів, збереженні біологічного різноманіття є вкрай актуальними.



# I. МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ – ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ

## 1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

### 1.1. Завдання моніторингу довкілля

*Моніторинг довкілля* – це аналітично-інформаційна система, яка охоплює спостереження за станом довкілля та факторами, що впливають на його компоненти; оцінювання та аналіз фактичного стану всіх компонентів довкілля; прогнозування стану довкілля та забезпечення науково-інформаційної підтримки прийняття управлінських рішень [4,5].

Термін «моніторинг» (від лат. *monitor* – той, хто нагадує, указує, остерігає) виник під час Стокгольмської конференції ООН з навколишнього середовища у 1972 році.

Питанням визначення та концепції моніторингу довкілля присвячений ряд робіт [1-8].

*Основними завданнями моніторингу довкілля є:*

1. Контроль за зростанням населення земної кулі та пов'язане з цим збільшене споживання енергії (що викликає відповідне вичерпування джерел енергії та паливних запасів); світового використання добрив; концентрації забруднюючих речовин (таких як двоокис вуглецю, двоокис азоту, сірководень, сірчаний газ, вуглеводень та інші) у біосфері; дефіциту ґрунту; нагромадження звичайних та небезпечних відходів;

2. Спостереження за кліматичними факторами середовища, такими як атмосферний тиск, вітер, опади, вологість повітря та ґрунту, температура компонентів біосфери, теплові потоки, природні випромінювання, та взаємодією цих факторів;

3. Прогнозування погодних умов; короткочасних та довгочасних кліматичних змін; контроль за глобальними змінами клімату; розробка стратегій щодо зменшення викидів газів, які забруднюють довкілля та небезпечні для здоров'я людей.

4. Контроль за станом та якістю атмосфери, повітря міст та приміщень, джерелами забруднень та їх транспортуванням;

5. Контроль за станом та якістю ґрунту, джерелами забруднень ґрунту, захист ґрунтових ресурсів від виснаження та деградації;

6. Контроль за станом та якістю поверхневих та ґрунтових вод, водними ресурсами, джерелами забруднення води, захист громадського водопостачання, впровадження технологій очищення води;

7. Вивчення негативних змін навколишнього середовища, стресових ситуацій та порушень екологічної рівноваги природного та антропогенного характеру; впливу на здоров'я людини фізичних забруднень та найбільш небезпечних речовин;

8. Контроль за радіоекологічною ситуацією; викидами радіоактивних відходів; їх впливом на здоров'я людей; транспортуванням, збереженням та утилізацією;

9. Спостереження за біотичними факторами середовища; їх реакцією на антропогенні впливи; відхилення від нормального природного стану на різних рівнях;

10. Контроль за рослинним покривом, видовим складом фауни та флори, різноманітністю навколишнього живого світу.

11. Ознайомлення з основними методами та принципом дії приладів для вимірювання параметрів навколишнього середовища, у тому числі з засобами автоматизованого та дистанційного зондування компонентів біосфери.

## **1.2. Класифікація систем моніторингу довкілля**

Слід зазначити різні підходи щодо класифікації моніторингу довкілля.

*Моніторинг джерел забруднень* – моніторинг точкових стаціонарних джерел (таких, як заводські труби або сховища токсичних чи радіоактивних речовин), рухомих (транспортні засоби) та просторових (полігони з забруднюючими речовинами, поля з агрохімічними препаратами, промислові та муніципальні стоки).

*Моніторинг факторів впливу* – моніторинг різноманітних біотичних та абіотичних факторів (реакцій та параметрів біоти, хімічних забруднювачів, фізичних факторів, таких як сонячне випромінювання, шум, вібрації тощо).

За компонентами навколишнього середовища розрізняють: *моніторинг атмосфери та повітря приміщень, моніторинг ґрунту, моніторинг поверхневих та підземних вод, моніторинг рослинних покривів.*

Загальноприйнятими видами моніторингу довкілля вважаються такі види моніторингу [5]:

*Загальний (стандартний) моніторинг* – оптимальні за кількістю параметрів спостереження на пунктах, об'єднані у інформаційно-технологічну мережу, які надають можливість регулярно здійснювати управлінські рішення на всіх рівнях, базуючись на оцінюванні та прогнозуванні стану довкілля.

*Оперативний (кризовий) моніторинг* – інтенсивні спостереження за всіма складовими довкілля та джерелами техногенного впливу, розташованими в районах кризових ситуацій, аварій та небезпечних природних явищ з метою оперативного реагування на надзвичайні екологічні ситуації, прийняття рішень щодо їхньої ліквідації та створення безпечних умов для населення.

*Фоновий (науковий) моніторинг* – багаторічні комплексні спостереження за визначеними об'єктами природоохоронних зон для оцінювання та прогнозування змін стану екосистем, віддалених від об'єктів промислової та господарської діяльності.

Залежно від масштабів спостереження та характеру узагальнення інформації розрізняють такі системи моніторингу:

*Глобальний* – спостереження за загальносвітовими процесами та явищами в біосфері Землі та її компонентах, попередження про небезпечні екстремальні ситуації. Глобальний моніторинг – це система спостереження за змінами у навколишньому середовищі на Землі в цілому, у глобальному масштабі та прийняття управлінських рішень щодо вирішення загальнолюдських проблем, таких як потепління клімату, збереження озонового шару, прогнозування землетрусів, цунамі тощо.

*Національний* – моніторинг у масштабах однієї країни (наприклад, України).

*Регіональний* – спостереження за процесами та явищами в межах певних регіонів – адміністративних одиниць (області, краю), природних регіонів та екосистем.

*Локальний* – моніторинг впливу певного антропогенного джерела; локальний моніторинг призначений забезпечити спостереження за довкіллям на рівні міста, району, підприємства.

*Імпактний* (від англ. impact – удар) – спостереження за локальними джерелами підвищеної небезпеки.

Система державного моніторингу охоплює національний, регіональний та локальний рівні.

Класифікація систем моніторингу може базуватися також на методах спостереження, а саме: *хімічний, фізичний та біологічний моніторинг*.

Схему класифікації моніторингу довкілля наведено на рис.1.1.

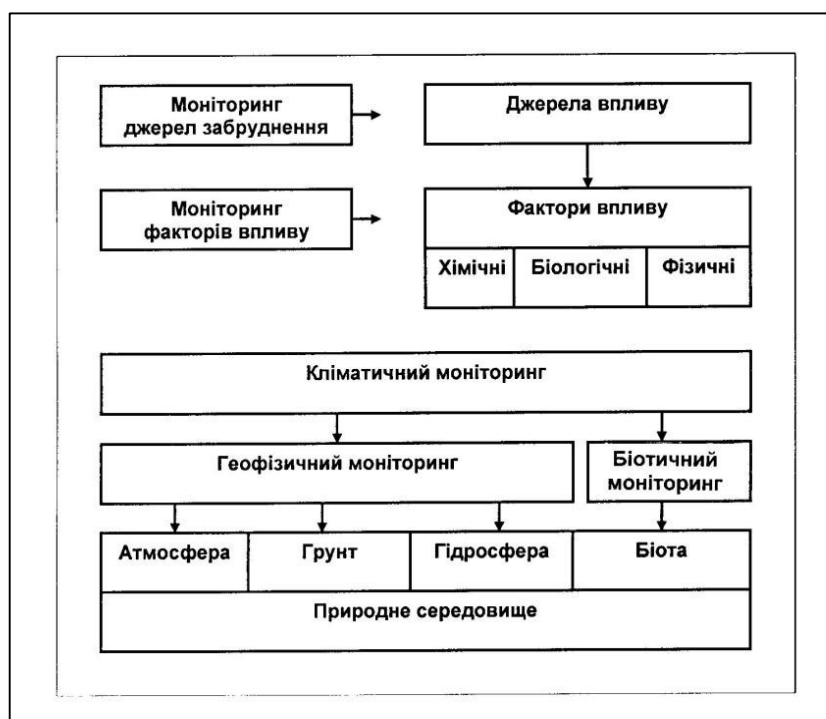


Рис. 1.1. Схема класифікації моніторингу довкілля

Найбільш універсальним є комплексний екологічний моніторинг довкілля, який реалізує геофізичний та біологічний моніторинги в їхньому зв'язку та тісно пов'язаний з кліматичним моніторингом.

### 1.3. Екологічний моніторинг

*Екологічний моніторинг* – комплексна підсистема моніторингу біосфери, яка охоплює спостереження, оцінювання та прогнозування антропогенних змін (геофізичних та біологічних) стану як біосфери загалом, так і екосистем, спричинених дією забруднювачів, сільськогосподарським використанням земель, вирубуванням лісів, урбанізацією, а також оцінювання екологічної рівноваги в екосистемах [6].

Залежно від поставлених завдань слід розрізняти такі види моніторингу: *кліматичний, абіотичний, радіоекологічний, біотичний та геоекологічний моніторинг*.

*Кліматичний моніторинг* – система спостережень, оцінювання та прогнозування зміни клімату. Кліматичний моніторинг охоплює *геофізичний* (система спостережень за абіотичною частиною біосфери: кліматом, сонячним випромінюванням, атмосферним тиском, вітром, температурою, вологістю, опадами, іонізаційним випромінюванням), та *біотичний* (система спостережень за станом біотичної складової біосфери та її реакцією на антропогенний вплив).

Кліматичний моніторинг передбачає: вимірювання основних метеорологічних параметрів, вивчення та аналіз явищ та процесів, що характеризують відповідний стан погоди; визначення реакції кліматичної системи, вплив її елементів на природні й антропогенні зміни; оцінювання внутрішніх та зовнішніх факторів, які впливають на клімат та стан кліматичної системи; визначення можливих фізичних та екологічних перетворень у довкіллі, що відбуваються внаслідок кліматичних змін та коливань.

*Абіотичний моніторинг* – спостереження за компонентами та явищами неживої, неорганічної природи, що впливають на живі організми. Впродовж цих спостережень вимірюють такі абіотичні фактори як тиск, рух повітря, вітер, вологість, атмосферні опади, температура, сонячне випромінювання, іонізаційне випромінювання.

*Радіоекологічний моніторинг* – комплексна інформаційно-технічна система спостережень, оцінювання, аналізу та прогнозування радіаційного стану біосфери, радіаційної ситуації поблизу атомних електростанцій, наслідків аварій на об'єктах ядерно-паливного циклу.

*Біотичний моніторинг* – це контроль стану біологічної складової (біоти) екосистем.

*Геоекологічний моніторинг* – спостереження за природними екосистемами, агроекосистемами, індустріальними екосистемами.

Основними завданнями екологічного моніторингу є: систематичні спостереження за станом та якістю складових біосфери, постійне оціню-

вання екологічних умов середовища проживання людини та біологічних об'єктів.

#### **1.4. Глобальна система моніторингу навколишнього середовища**

Згідно з резолюцією Генеральній Асамблеї ООН (Стокгольм, 1972 р.) розроблена концепція *Глобальної системи моніторингу навколишнього середовища* (Global Environmental Monitoring System, GEMS). Програми ООН з навколишнього середовища, основні завдання якої були сформульовані у Найробі у грудні 1974 року:

1. Створення розширеної системи попередження загрози людському здоров'ю;
2. Оцінювання глобального забруднення атмосфери та можливих його впливів на клімат;
3. Оцінювання рівня та розподілу забруднюючих речовин в біологічних системах, зокрема харчових ланцюгах;
4. Оцінювання критичних екологічних проблем, пов'язаних із сільським господарством та використанням земельних та водних ресурсів;
5. Оцінювання реакції наземних екосистем на вплив з боку навколишнього середовища;
6. Оцінювання стану забруднення океану та його впливу на морські екосистеми;
7. Вдосконалення міжнародної системи, що реалізує моніторинг факторів, необхідних для розуміння та прогнозування стихійних лих та впровадження ефективної системи попередження.

Прикладом глобального підходу до моніторингу довкілля є діяльність *Групи зі Спостереження Землі* (The Group on Earth Observations, GEO), яка була створена у 2005 році в Брюсселі. Сферами інтересу GEO були природні та антропогенні катастрофи; джерела екологічних небезпек для здоров'я людства; енергетичний менеджмент; зміни клімату та наслідки цих змін; водні ресурси; передбачення погоди; управління екосистемами; сталий розвиток сільського господарства; біорізноманіття; збереження природи.

У рамках діяльності GEO була організована *Система спостереження Землі* (Global Earth Observation System of Systems, GEOSS) на основі 10-річного Плану впровадження, розрахованого на 2005-2015 рр.

Серед основних завдань GEOSS було прогнозування спалахів менінгіту; захист біорізноманіття; поліпшення кліматичних спостережень в Африці; підтримка ситуацій, що утворилися внаслідок стихійних лих у Центральній та Південній Америці; управління водними ресурсами в країнах Азії; використання сонячної енергії; покращення управління сільським господарством та рибальством; картографування та класифікація екосистем; прогноз погоди для Олімпіади 2008 р. в Пекіні.

Для реалізації цих завдань передбачалося застосування супутників, аерозондів, метеорологічних станцій, буїв в океанах, опадомірів, сонарів та лідарів, сейсмічних систем, комп'ютерного моделювання.

У Європейських масштабах слід відзначити *Глобальну Систему Моніторингу Навколишнього Середовища* (Global Monitoring for Environment and Security, GMES), створену за ініціативою Європейської Комісії та Європейського Космічного Агентства у 1998 році.

Основною метою GMES була раціоналізація використання даних, одержаних з багатьох джерел інформації та служб щодо стану навколишнього середовища під антропогенним впливом, та попередження людства про можливі екологічні катастрофи.

Ідея глобального моніторингу (The Sustained, Co-Ordinated Processing of Environmental Satellite Data for Climate Monitoring (SCOPE-CM) була запропонована Секретаріатом Всесвітньої Метеорологічної Організації (WMO) у 2009 році в Женеві з метою застосування космічних засобів для моніторингу довкілля та змін клімату.

Програма моніторингу довкілля здійснюється рядом міжнародних організацій, до яких слід віднести Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), United Nations Environment Programme (UNEP), Earth System Governance Project. На регіональному рівні відзначимо European Environment Agency (EEA) та Partnerships in Environmental Management for the Seas of East Asia (PEMSEA).

Функції цих організацій добре визначені, але можна відмітити їх певну спеціалізацію, яка надає можливість запобігти перекриванню сфер діяльності. Так, NOAA відповідає за передбачення погоди та прогнозування суворих штормів; EPA займається моніторингом забруднень, що походять від споживання викопного палива, експлуатації природних ресурсів, утилізації відходів, ремедіацією покинутих полігонів та промислових територій (слід відмітити програму EPA Environmental Monitoring and Assessment Program); Департамент енергії (Department of Energy, DOE) має у своєму розпорядженні сховище ядерних відходів та реалізує моніторинг ядерної програми; космічне агентство (National Aeronautics and Space Administration, NASA) здійснює космічні програми та пов'язані з ними дослідження атмосфери, океану та земної поверхні; Міністерство оборони (Department of Defense, DOD) є власником системи глобального прогнозування погоди та ситуації в океанських регіонах; Міністерство сільськогосподарства (U. S. Department of Agriculture, USDA) контролює сільськогосподарське виробництво та якість харчових продуктів та ґрунтових ресурсів.

Збиранням та розповсюдженням даних щодо навколишнього середовища у глобальних масштабах займається ряд міжнародних організацій. Організація Об'єднаних Націй (ООН) курирує декілька організацій, що займаються моніторингом погоди, запасів продовольства, станом здоров'я населення. Таким чином, сферою інтересів Продовольчої та сільськогосподарської організації (Food and Agricultural Organization, FAO) стало виробництво продуктів харчування, застосування пестицидів, сільськогосподарські індекси, землекористування, деградація ґрунтів тощо; інші установи ООН, такі як Всесвітня метеорологічна організація (World



Meteorological Organization, WMO), Всесвітня служба погоди (World Weather Watch, WWW) і Всесвітня організація охорони здоров'я (World Health Organization, WHO) здійснюють глобальну систему моніторингу навколишнього середовища (GEMS), яка відстежує та повідомляє про глобальний стан води, повітря, клімату та харчових забруднень. Ряд організацій, включених в цю систему, зокрема Міжнародне агентство з атомної енергії (International Atomic Energy Agency, IAEA) та Служба глобального спостереження за атмосферою (Global Atmosphere Watch, GAW), займаються спостереженням за атмосферними забруднюючими речовинами, хлорфторвуглецями та озоном.

Значна кількість екологічних даних, зібраних під егідою ООН, розповсюджуються у вигляді статистичних звітів Статистичним управлінням Організації Об'єднаних Націй (United Nations Statistical Office, UNSO) та Міжнародною адміністрацією з енергії (International Energy Administration, IEA).

Слід зазначити, що Україна є членом Всесвітньої метеорологічної організації ООН; учасницею Конвенції про транскордонне забруднення повітря на великі відстані (Женева, 1979); Конвенції про оперативне оповіщення про ядерну аварію (Відень, 1986); Віденської конвенції про охорону озонового шару (1985); Конвенції про оцінку впливу на навколишнє середовище в транскордонному контексті (Еспо, 1991); Рамкової конвенції ООН про зміни клімату (Ріо-де-Жанейро, 1992).

У 2004 році Україна ратифікувала Кіотський протокол. У 2009 році наша країна була присутня на міжнародних переговорах ООН у Копенгагені.

### **1.5. Організація фонового моніторингу довкілля**

*Фоновий моніторинг* передбачає контроль за загальнопланетарними змінами у біосфері, що пов'язані з антропогенною діяльністю. Особливу роль у розвитку концепції фонового моніторингу відіграла Програма ЮНЕСКО «Людина та біосфера» (The Man and the Biosphere Programme, MAB), затверджена у 1971 р.

Одним з основних досягнень цієї Програми було створення Всесвітньої мережі Біосферних Заповідників (The World Network of Biosphere Reserves) – в зарубіжних документах та літературі застосовується термін «резерват» (від лат. *reservatus* – збережений). Під егідою ЮНЕСКО було запропоновано Комплексний моніторинг біосферних заповідників (Biosphere Reserve Integrated Monitoring, BRIM), який охоплював спостереження за абіотичними факторами середовища та біорізноманіттям, передбачав соціоекономічний та комплексний моніторинг довкілля.

*Біосферний заповідник* – територія міжнародного значення, відокремлена з метою збереження різноманітності природно-територіальних комплексів та генетичних ресурсів рослинного та тваринного світу, проведення наукових досліджень, фонового моніторингу та вивчення стану довкілля.

Основними завданнями біосферного моніторингу є встановлення взаємозв'язку між забрудненням, структурою та функціонуванням екосистем, їх ланок, популяцій та окремих організмів; визначення переліку тих показників та вимірювань, які необхідні для спостереження та оцінювання існуючого стану екосистеми та прогнозування його змін у майбутньому; аналіз шляхів та швидкостей перетворення забруднюючих речовин в екосистемі; визначення критичних рівнів показників навколишнього середовища.

Перший Міжнародний конгрес у справі біосферних заповідників було проведено у Мінську в 1983 році.

У 1995 р. в Севільї (Іспанія) відбувся Міжнародний Конгрес з питань щодо біосферних резерватів, який заклав основу стратегії подальшого розвитку біосферної справи (Seville Strategy and the International Guidelines). Севільська стратегія та Положення про Всесвітню мережу біосферних заповідників були затверджені на Генеральній конференції ЮНЕСКО у 1995 році.

У 2000 році у Памплоні (Іспанія) відбулася Міжнародна експертна нарада, а у 2004 році мала місце Міжнародна Конференція та Експертна нарада з питань Транскордонних біосферних резерватів («Following-up on Seville + 5»), на яких були визначені дії, спрямовані на виконання стратегічних Севільських рекомендацій.

У 2001 році відбулася Спеціальна зустріч щодо Інтегрованого Моніторингу Біосферних Резерватів (Рим, Італія).

Підсилення стратегічних досягнень Севільських документів та підвищення ролі біосферних заповідників було відмічено у Мадридському плані дій, що був прийнятий на 3-му Всесвітньому Конгресі з біосферних резерватів у 2008 році.

В Україні координацією та науково-методичним супроводом наукових досліджень, спрямованих на розробку науково обґрунтованої національної політики у сфері охорони природи та сталого використання природних ресурсів та екосистем, займається Національний комітет України з програми ЮНЕСКО «Людина та біосфера» (НК МАБ України), який спрямовує свої зусилля на розбудову національної екомережі України та її інтеграцію у Всеєвропейську екомережу, удосконалення системи природних заповідників, національних природних парків, подальший розвиток мережі біосферних резерватів та їх об'єднання на основі спільного планування процесу збереження навколишнього середовища, розширення мережі транскордонних біосферних резерватів, розвитку міжнародної співпраці у галузі збереження та сталого використання біорізноманіття шляхом загального управління транскордонними екосистемами на основі принципів Севільської стратегії біосферних резерватів ЮНЕСКО.

Найбільш вагомим здобутком діяльності НК МАБ України є створення національної мережі біосферних резерватів ЮНЕСКО на території України. На сьогодні вона складається з п'яти національних та двох транскордонних міжнародних резерватів : Асканія-Нова (33307,6 га), Чорномор-

ський біосферний заповідник (100809 га), Карпатський біосферний заповідник (57880 га), Дунайський біосферний заповідник (46402,9 га), Шацький (48977 га), румунсько-український «Дельта Дунаю», польсько-словацько-український «Східні Карпати». Продовжується робота щодо створення транскордонних біосферних резерватів ЮНЕСКО: польсько-українського «Західне Полісся», польсько-українського «Розточчя», румунсько-українського «Мармарош» та російсько-українського біосферного резервату в басейні Десни «Брянсько-Старогутські ліси».

На даний час (за даними ЮНЕСКО 2011 р.) існує 580 біосферних заповідників у 114 країнах світу, у тому числі міжнародних або транснаціональних заповідників.

*Програма фонових моніторингу* на базі біосферних заповідників передбачає [5]:

1. Моніторинг забруднюючих речовин та факторів, що впливають на довкілля;
2. Моніторинг відгуків біоти на антропогенний вплив (фонових рівнів забруднення в першу чергу);
3. Спостереження за зміною функціональних та структурних характеристик еталонних природних екосистем та їх антропогенних модифікацій.

Вибір конкретних речовин, що можуть бути включені у програму вимірювань у біосферних заповідниках, визначається такими критеріями [4-6]:

1. Поширення речовин, їх стійкість та мобільність у навколишньому середовищі;
2. Здатність речовини до впливу на біологічні та геофізичні системи.

Показники зміни природного кругообігу речовин, що викликається антропогенною діяльністю, класифікація та перелік забруднюючих речовин, що підлягають оцінюванню на фонових станціях у біосферних заповідниках, наведено в роботах [4-6].

Для реалізації програми фонових моніторингу застосовують *станції комплексного фонових моніторингу*, які формуються з стаціонарної ділянки спостережень та хімічної лабораторії. Така станція дає можливість збирати зразки повітря, ґрунту, опадів, вод, рослинності та проводити аналіз цих зразків. Вимоги до розташування та інструментального забезпечення станцій комплексного фонових забезпечення наведено у роботі [7].

## **1.6. Організація національного (державного) моніторингу довкілля**

*Національний або державний моніторинг* – це система моніторингу довкілля в межах однієї країни.

У Сполучених Штатах Америки національний моніторинг здійснюють такі організації, як Environmental Protection Agency (EPA); National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); National Weather Service (NWS); National Environmental Satellite, Data & Information Service (NESDIS); National Oceanic Data Center (NODC); U.S. Census Bureau

(USCB); Economics and Statistics Administration (ESA); Food and Drug Administration (FDA); Centers for Disease Control and Prevention (CDC); U.S. Army Corp of Engineers Department of Defense (DOD); National Aeronautics and Space Administration (NASA); Environmental Protection Agency (EPA), зокрема Office of Solid Waste and Emergency Response, Office of Air and Radiation Office of Water; U.S. Geological Survey (USGS); National Biological Information Service (NBIS); Bureau of Land Management (BLM); U.S. Fish and Wildlife National Park Service (NPS); (BR); Office of Surface Mining (OSM); Federal Energy Regulatory Commission (FERC) Department of Energy (DOE); U.S. Department of Agriculture (USDA), зокрема National Resources & Environment (NRE).

У Російській Федерації створена у 1993 році Єдина державна система екологічного моніторингу (ЄДСЕМ); організаційні функції в цій системі здійснює Росгідромет, а загальну координацію міністерств та відомств в сфері моніторингу довкілля здійснює Міністерство природних ресурсів Російської Федерації.

У Великобританії з 1980 року створюється система моніторингу, домінуючими напрямками якої є контроль якості навколишнього середовища та оцінювання нових забруднювачів та ефектів.

У Фінляндії проблемам моніторингу довкілля присвячує свою діяльність Фінський метеорологічний Інститут (ФМІ), створений у 1991 році при Університеті Хельсінкі.

У Канаді проблемами моніторингу довкілля займається Ecological Monitoring and Assessment Network (EMAN); в Японії – Japan Meteorological Agency (JMA); в Мексиці впроваджено програму El Fideicomiso para la Administración del Programa de Desarrollo Forestal. В цілому, кожна країна має міністерство або інші урядові чи приватні організації, здатні займатися організацією моніторингу довкілля.

У таких країнах як США, Фінляндія, Великобританія, Нідерланди, Франція, Канада, Японія створені мережі пунктів безперервного спостереження за якістю атмосферного повітря та контрольно-вимірювальних станцій.

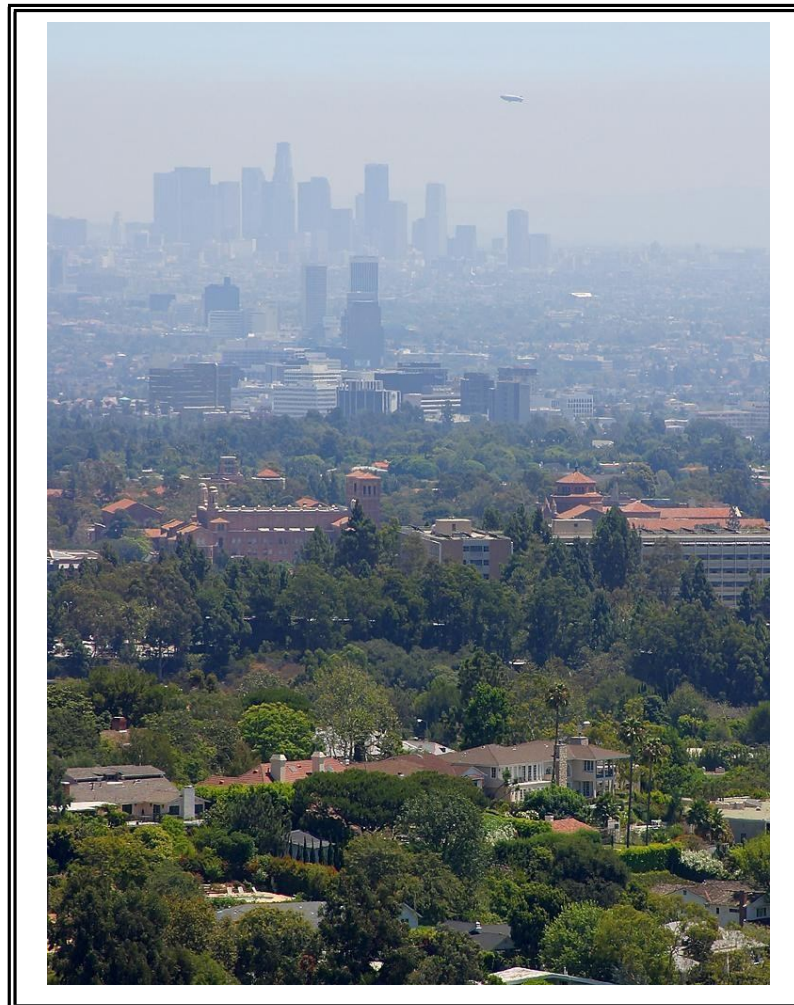
Згідно із Постановою Кабінету Міністрів України від 30 березня 1998 р. N 391 «Положення про державну систему моніторингу довкілля» *державна система моніторингу довкілля* – це система спостережень, збирання, оброблення, передавання, збереження та аналізу інформації про стан довкілля, прогнозування його змін та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень про запобігання негативних змін стану довкілля та дотримання вимог екологічної безпеки [9]. У результаті виконання Державної цільової екологічної програми проведення моніторингу навколишнього природного середовища [10] повинно бути забезпечено скорочення строків розроблення та підвищення якості та ефективності управлінських рішень у сфері охорони навколишнього природного середовища, раціонального природокористування та екологічної

безпеки; розбудову мережі моніторингу навколишнього природного середовища України за єдиними вимогами, а також з урахуванням вимог комітету з екологічної політики Європейської економічної комісії ООН.

В Україні моніторинг довкілля здійснюється Держгідрометслужбою Міністерства надзвичайних ситуацій (МНС), Міністерством охорони здоров'я (МОЗ), Міністерством аграрної політики (Мінагрополітики), Міністерством екології та природних ресурсів (Мінприроди), Держкомлісгоспом, Держжитлокомунгоспом, Держводгоспом, Держкомземом, їх органами на місцях, а також підприємствами, установами та організаціями, що належать до сфери їх управління, які є суб'єктами системи моніторингу за загальнодержавною та регіональними (місцевими) програмами реалізації відповідних природоохоронних заходів.

Діяльність вищезгаданих організацій позначилася підготовкою проектів та виходом у світ законів, присвячених захисту здоров'я людства та навколишнього середовища. За роки незалежності в Україні вийшла низка нормативних документів у сфері моніторингу довкілля (див. додаток).

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 31 грудня 2004 р. схвалено Концепцію Державної програми проведення моніторингу навколишнього природного середовища, розрахованої на 2006-2010 роки.



## **2. ОРГАНІЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ ЗА СКЛАДОВИМИ БІОС-ФЕРИ**

### **2.1. Організація спостережень за станом та якістю атмосферного повітря**

#### **2.1.1. Пости спостереження за довкіллям**

*Постом спостереження* є вибране місце або точка місцевості, де розташовується споруда або автомобіль, обладнаний вимірювальними приладами. Пости розташовують в міських житлових та адміністративних районах, в рекреаційних зонах, поблизу джерел забруднення атмосферного повітря.

#### **2.1.2. Класифікація постів спостереження за якістю атмосферного повітря**

Мережа постів, що застосовується для спостереження за якістю та забрудненням атмосферного повітря, включає [4]:

*Стаціонарний пост* – забезпечує регулярний відбір зразків повітря з метою подальшого кількісного та якісного визначення забруднюючих речовин у повітрі.

*Опорний стаціонарний пост*, що контролює довготривалі зміни основних та найбільш поширених забруднюючих речовин.

*Маршрутний пост*, що здійснює регулярний відбір зразків повітря там, де неможливо встановити стаціонарний пост.

*Пересувний підфакельний пост*, призначений для відбору зразків повітря в області димового або газового факела з метою визначення зони певного джерела промислових викидів (наприклад, поблизу заводської труби).

#### **2.1.3. Розташування постів спостереження**

Характер розташування постів спостереження залежить від поставлених завдань. Якщо визначається рівень забруднення повітря, притаманний відповідному району, пост спостереження розміщується на ділянці, яка не підлягає впливу джерел викидів.

Якщо оцінюється концентрація викидів в конкретній точці, пост розміщують в області максимальних концентрацій викидів від конкретного джерела.

Мережа постів спостереження коливається від 3-6 у містах з кількістю населення до 500 тис. осіб до 20 стаціонарних постів у великих містах (з чисельністю населення більш ніж 1 мільйон) країн СНД (у Києві – 16) та від 1-3 до 40 в містах Західної Європи [4-7].

Серед вітчизняних стаціонарних постів спостереження слід зазначити «ПОСТ-1», «ПОСТ-2», «ПОСТ-2а» – дюралюмінієві павільйони, обладнані приладами для автоматизованого вимірювання забруднень повітря та метеорологічних параметрів.

#### **2.1.4. Програма спостережень**

На практиці здійснюють такі програми за допомогою постів спостережень:

*Повна програма* – безперервна реєстрація на основі автоматизованих приладів або дискретна впродовж обов'язкового відбору зразків о 1-й, 7-й, 13-й та 19-й годинах за місцевим часом.

*Неповна програма* – отримання інформації щоденно о 7-й, 13-й та 19-й годинах місцевого часу.

*Скорочена програма* – отримання інформації щоденно о 7-й та 13-й годинах місцевого часу.

*Добова програма* – визначення середньодобової концентрації шляхом безперервного добового відбору зразків або дискретного не менш ніж 4 рази на добу.

Для отримання високої вірогідності результатів вимірювань концентрацій забруднюючих речовин доцільно забезпечити проведення не менш ніж 200 спостережень впродовж короткого часу; період спостережень обмежується п'ятьма роками.

#### **2.1.5. Організація спостережень за станом та якістю атмосферного повітря в Україні**

У 1972 році під керівництвом Головного управління гідрометеослужби (Держкомгідромету) була створена Загальнодержавна служба спостережень та контролю за станом атмосфери. Пізніше Держкомгідромет було реорганізовано у Державну гідрометеорологічну службу (Держгідрометслужбу) МНС України.

Основними завданнями мережі моніторингу атмосферного повітря в Україні є [4,5]:

1. оцінювання рівня забруднення атмосфери;
2. вивчення впливу забруднення повітряного басейну на захворюваність населення;
3. підрахунок збитків, що наносяться сільському господарству, лісам, тваринництву, будівлям та спорудам;
4. планування розміщення промислових підприємств та визначення санітарно-захисних зон (СЗЗ);
5. уточнення та перевірка розрахункових методів розсіювання домішок від джерел забруднення АП;
6. оцінювання фонового забруднення атмосфери.

Оцінювання стану атмосферного повітря здійснюється на базі УкрНДГМІ та Центральної Геофізичної Обсерваторії МНС [12] у 53 містах різних областей України на 162 стаціонарних постах спостережень за забрудненням (ПСЗ) та на двох станціях транскордонного моніторингу: «Світязь» (Волинська обл.) та «Рава-Руська» (Львівська обл.). В атмосферному повітрі визначається вміст 33 забруднюючих речовин, зокрема оксидів азо-

ту, діоксиду сірки, оксиду вуглецю, пилу, формальдегіду, важких металів та бензопірену.

В Україні діє автоматизована система спостережень та контролю оточуючого середовища (АСКОС).

Слід згадати діяльність Відділу спостережень за станом хімічного забруднення Центральної Геофізичної Обсерваторії, створеного у 1973 році. До складу відділу входить лабораторія спостережень за забрудненням атмосферного повітря, яка здійснює контроль хімічного забруднення природного середовища на мережі, закріпленій за ЦГО (територія м. Києва та Київської області) та аналіз проб доквілля, які надходять від підрозділів Гідрометслужби, а також формує банк даних з хімічного забруднення атмосферного повітря.

До сфери постійної діяльності відділу залучено 21 пункт спостережень за станом атмосферного повітря на території м. Києва та міст Київської області (м. Біла Церква, Бровари, Обухів, Українка), 33 станції спостережень за хімічним складом опадів, 54 станції за визначенням хімічного складу снігового покриву, 51 станція, де визначається рН опадів, 78 постів спостережень за визначенням вмісту важких металів в аерозолях, які розташовані в 48 містах України.

У місті Києві на цей час працює 16 ПСЗ, що розташовані в різних районах міста. Для спостережень за забрудненням атмосферного повітря зроблені проблемно орієнтовані комплекси контролю забруднень ПОКК-2. Три СПЗ, які розташовані в різних житлових районах міста (проспект Науки, 37, Гідропарк, проспект Перемоги 98/2) оснащені стаціонарними автоматичними газоаналізаторами, які дозволяють контролювати в безперервному режимі концентрації оксидів азоту ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ), діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ), оксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ) в атмосферному повітрі.

На київському заводі «Енергія» з утилізації твердих побутових відходів, який щодня спалює продукти життєдіяльності міста та викидає у повітря значну кількість шкідливих газів ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ , пил), встановлений ПОКК-3 та технологічні комплекси ТК-1, що вимірюють концентрацію кисню ( $\text{O}_2$ ) у зоні виходу продуктів горіння кожного котла та концентрації оксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ), діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) та метану ( $\text{CH}_4$ ).

## **2.2. Організація спостережень за станом та якістю поверхневих вод**

### **2.2.1. Основні завдання моніторингу поверхневих вод**

*Моніторинг поверхневих вод* – це система послідовних періодичних спостережень, збору та обробки інформації про стан водних об'єктів, прогнозування можливих змін якості води та розробка науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття управлінських рішень щодо покращення стану відкритих водних об'єктів.

Система моніторингу водних об'єктів вирішує такі завдання [4,5]:



1. забезпечує спостереження за рівнем забруднення водного середовища;
2. вивчає динаміку забруднюючих речовин та виявляє умови, при яких проходять коливання рівнів забруднень;
3. вивчає закономірності процесів самоочищення та самовідновлення, а також накопичення забруднюючих речовин у донних відкладеннях;
4. вивчає закономірності виносу речовин через гирлові створи річок у водойми.

### **2.2.2. Розміщення пунктів спостереження**

Є дві основних схеми розміщення пунктів спостереження за забрудненням поверхневих вод [4-7]:

*об'єктна схема* передбачає розміщення пунктів спостереження на великих та середніх річках, озерах та водоймах, що мають суттєве господарське значення;

*територіальна схема* застосовується для фонових спостережень, регіонального узагальнення характеристик гідрологічного режиму малих річок.

Мережа пунктів спостережень може бути стаціонарною, спеціалізованою або тимчасовою.

Розташовують пункти спостереження в місцях скиду стічних та колекторно-дренажних вод, в кінцевих створах річок, в гирлових зонах забруднених приток великих річок.

Вимірювання параметрів, що характеризують стан та якість води, проводять у *створах* – умовних поперечних перерізах водойми або водотоку, в якому проводиться комплекс вимірювань. Зазвичай встановлюють три створи – один створ вище на 1 км джерела забруднення, другий – нижче джерела на відстані 0,5-1 км, третій нижче джерела на відстані, де забезпечується достатнє змішування стічних вод з водами річки.

### **2.2.3. Програма спостережень**

*Обов'язкова програма* передбачає [4-7]:

1) *гідрохімічні спостереження*: візуальні спостереження, температура (°C), кольоровість (градуси), прозорість (см), запах (бали), концентрація розчинених газів – кисню, діоксиду вуглецю (мг/дм<sup>3</sup>); концентрація завислих речовин (мг/дм<sup>3</sup>), водневий показник *pH*; кисно-відновний показник *Eh* (мВ); концентрація головних іонів – хлоридних, сульфатних, гідрокарбонатних, кальцію, магнію, натрію, калію, суми іонів (мг/дм<sup>3</sup>, мг/л); хімічне споживання кисню (*XСК* – мг/дм<sup>3</sup>); біохімічне споживання кисню за 5 діб (*БСК<sub>5</sub>* – мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>); концентрація біогенних елементів – амонійних, нітритних, нітратних іонів, фосфатів, загального заліза, кремнію (мг/дм<sup>3</sup>); концентрація нафтопродуктів, синтетичних поверхнево-активних речовин (СПАР), летких фенолів, пестицидів та сполук металів (мг/дм<sup>3</sup>);

2) *гідрологічні спостереження*: витрати води ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), швидкість течії ( $\text{м}/\text{с}$ ), та рівень води ( $\text{м}$ ) на водоймах.

Існують також скорочені програми спостережень.

#### **2.2.4. Організація спостережень за забрудненням поверхневих та підземних вод в Україні**

Згідно з Наказом № 485 від 24.12.2001 щодо організації та здійснення державного моніторингу вод [11] розподіл функцій між суб'єктами державного моніторингу вод здійснюють Мінекоресурсів (організації гідрометеорологічної служби, Держекоінспекція та Держуправління), МНС, Держводгосп, Державна санітарно-епідеміологічна служба МОЗ та Мінагрополітики у таких напрямках, як контроль джерел скидів стічних вод; поверхневих вод; водних об'єктів у межах природоохоронних територій; наземних та морських екосистем; річкових, озерних, морських вод; стихійних та небезпечних гідрометеорологічних явищ: повеней, паводків тощо; підземних вод; мінеральних; термальних вод, лікувальних грязей, ропи, лиманів та озер; поверхневих вод сільськогосподарського призначення (токсикологічні та радіологічні визначення, залишкова кількість пестицидів, агрохімкатів та важких металів); річок, водосховищ, каналів, зрошувальних систем та водойм у межах водогосподарських систем комплексного призначення, систем міжгалузевого та сільськогосподарського водопостачання; водойм у зонах впливу атомних електростанцій (вміст радіонуклідів); підтоплення сільських населених пунктів, прибережних зон водосховищ (переформування берегів та підтоплення територій).

Базові спостереження за забрудненням поверхневих вод здійснюються у 240 пунктах спостережень, розташованих на 116 річках, 15 водосховищах, 7 озерах та лиманах. Якість води Чорного та Азовського морів та гирлових ділянок Дніпра, Дунаю та Південного Бугу контролюється у 154 пунктах.

Гідрологічні спостереження проводяться у 433 пунктах, розташованих на річках, озерах та водосховищах.

Морська стаціонарна гідрометеорологічна мережа включає в себе 32 пункти спостережень, розташовані у прибережній та шельфовій зонах, гирлах річок, що впадають у море.

У сфері екологічного моніторингу вод спеціалізуються Лабораторія спостережень за забрудненням поверхневих вод (ЛСЗПВ) та Лабораторія гідробіології Центральної Геофізичної Обсерваторії МНС України [12].

ЛСПЗВ здійснює моніторинг поверхневих вод суші України, контроль за відбором проб води на території 6-ти областей України (Київської, Чернігівської, Черкаської, Житомирської, Вінницької, Сумської) та проводить аналіз цих проб води, проводить визначення вмісту важких металів у поверхневих водах усюди території України та вміст пестицидів у пунктах спостереження басейну Дніпра та річках басейнів Західного Бугу, Південного Бугу, Дністра. Лабораторія проводить спостереження за забрудненням поверхневих вод суші у 36 пунктах, розташованих на 21 річці, 3 водо-

сховищах. Пункти спостережень розташовані з врахуванням специфіки промислових та сільськогосподарських скидів у водні об'єкти України. Проби води аналізуються за 41 показником. Лабораторія здійснює методичне керівництво з гідрохімічного розділу робіт 23-ма гідрологічними та 11 гідрохімічними підрозділами мережі спостережень гідрометслужби. ЛСПЗВ визначає мінеральний склад у поверхневих та стічних водах; вміст важких металів у поверхневих та стічних водах; вміст пестицидів у поверхневих та стічних водах; вміст забруднюючих речовин антропогенного походження (нафтопродуктів, фенолів, поверхнево-активних речовин, сполук біогенних елементів).

Лабораторія гідробіології ЦГО займається здійсненням спостережень за станом водних об'єктів на мережі гідрометслужби згідно з гідробіологічними показниками (фітопланктон, зоопланктон, перефітон та макрозообентос) щодо визначення стану гідробіоценозів та екосистем водних об'єктів на контрольованих ділянках, визначенням якості вод (біоіндикація) та експериментальним визначенням токсичності вод (біотестування) поверхневих, підземних, питних та зворотних вод, водних розчинів окремих речовин та їх сумішей.

На сьогоднішній день лабораторія контролює 38 річок та 7 водосховищ в 88 пунктах, 168 створах, 196 вертикалях. Крім того, лабораторія провела обстеження 15 водних об'єктів та виконувала режимні гідробіологічні спостереження більш як на 100 річках, 11 водосховищах, 1 озері та водоймах-охолоджувачах на 4-х АЕС. В архіві лабораторії зберігається масив гідробіологічних даних (починаючи з 1974 р.) 144 водних об'єктів на території України.

## **2.3. Організація спостережень за станом та якістю ґрунтів**

### **2.3.1. Основні завдання ґрунтового моніторингу**

Основними завданнями ґрунтового моніторингу є [4,5]:

- вчасне виявлення несприятливих змін властивостей ґрунтового покриву при різних видах його використання;
- сезонний контроль стану ґрунтового покриву (динаміка змін) під сільськогосподарськими культурами для видачі своєчасних рекомендацій;
- оцінювання середньорічних втрат ґрунтів (швидкості втрат ґрунтового покриву в результаті дощової, вітрової й іригаційної ерозії);
- виявлення районів з дефіцитним балансом біогенних елементів, виявлення й оцінювання швидкості втрат гумусу, азоту та фосфору;
- контроль за зміною кислотності та лужності ґрунтів, особливо в районах із внесенням високих доз мінеральних добрив та поблизу великих промислових центрів – джерел підкислення атмосферних опадів;
- контроль за сольовим режимом процесів зрошування ґрунтів, що удобрюються;
- контроль за забрудненням ґрунтів важкими металами;

- контроль за локальним забрудненням ґрунтів ВМ в зоні впливу промислових підприємств та транспортних магістралей, а також забруднення пестицидами в районах їх постійного використання;
- довгостроковий та сезонний (за фазами розвитку рослин) контроль вологості, температури, структурного стану, водно-фізичних властивостей ґрунтів та вмістом у них елементів живлення рослин;
- оцінювання ймовірної зміни властивостей ґрунтів при проектуванні гідроробудівництва, меліорації, упровадженні нових систем землеробства, добрив тощо;
- контроль за розмірами та правильністю відчуження орнопридатних земель для промислових та комунальних цілей.

### **2.3.2. Програма спостережень**

Програма спостережень та оцінювання стану ґрунтів внаслідок антропогенного забруднення включає [7]: 1. реєстрацію сучасного рівня хімічного забруднення ґрунтів, виявлення географічних закономірностей та динаміки тимчасових змін забруднення ґрунтів, залежно від розташування та технологічних параметрів джерел забруднення; 2. оцінювання можливих наслідків забруднення ґрунтів та прогнозування тенденцій зміни хімічного складу ґрунтів у найближчому майбутньому; 3. обґрунтування складу та характеру заходів щодо регулювання можливих негативних наслідків в результаті забруднення ґрунтів та заходів, спрямованих на докорінне поліпшення вже забруднених ґрунтів; 4. забезпечення зацікавлених організацій інформацією про рівень забруднення ґрунтів.

### **2.3.3. Організація спостережень за забрудненням ґрунтів в Україні**

У державних масштабах моніторинг ґрунтів здійснюється такими організаціями як Держгеослужбою, Мінагрополітики, гідрометеостанціями. Установами НАН України, Національним космічним агентством України, центральною Геофізичною Обсерваторією. У своїй діяльності ці організації керуються законодавчими актами (див. додаток).

Відділ спостережень за станом хімічного забруднення ЦГО МНС, зокрема Лабораторія спостережень за забрудненням ґрунтів та моніторингу важких металів визначає на території України в ґрунтах населених пунктів його механічний склад, кислотність, вміст важких металів (кадмій, марганець, мідь, цинк, нікель, свинець) та в ґрунтах сільгоспугідь залишковий вміст хлорорганічних пестицидів (ДДТ, ДДЕ, альфа та гамма ГХЦГ), вміст нітратів. Лабораторія обстежила 106 населених пунктів України та має дані з моніторингу ґрунтів Києва з 1997 року; 24 населених пунктів Київської області з 1993 року; Маріуполя та Костянтинівки Донецької області (опорні пункти) щорічні з 1986 року, 51 населеного пункту України з 90-х років. Обстежено парки «Софіївка» в Умані та «Олександрія» у Білій Церкві як фонові території.

### 3. ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Дисципліна «Моніторинг довкілля з основами метрології» вимагає застосування сучасного метрологічного забезпечення моніторингу довкілля. У навчальній літературі детально розглянуто основні поняття метрології [13], а також методи вимірювання параметрів навколишнього середовища [14-18]. Розглянемо основні положення та визначення, висвітлені у цих літературних джерелах.

#### 3.1. Основні терміни, що застосовуються у метрології

*Метрологія* (від грец. *metron* – міра та *logos* – вчення) – наука про вимірювання, методи вимірювання, засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення необхідної точності вимірювань.

*Вимірювання* – це знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

*Фактор* – це причина або рушійна сила будь-якого процесу, що відбувається у навколишньому середовищі.

*Параметр* – це величина, що характеризує будь-яку властивість процесу або явища, що відбувається у навколишньому середовищі.

*Вимірювання параметра навколишнього середовища* – це послідовність експериментальних та обчислювальних операцій, що здійснюються з метою знаходження значення параметра навколишнього середовища, який характеризує деякий об'єкт або явище навколишнього середовища під впливом того чи іншого фактору. Вимірювання передбачає кількісну оцінку певного параметру в стандартних одиницях, тобто порівняння параметру з рекомендованим стандартом для визначення їхньої рівності або ступеня різниці. Вимірювання містить такі елементи: об'єкт (явище), властивості або стан якого характеризує величина, що вимірюється; одиницю цієї величини; технічні засоби, проградуєвані в обраних одиницях; метод вимірювання; спостерігач (система реєстрації), що сприймає результат вимірювання; отримане значення величини, що вимірювалася, та оцінювання його відхилення від дійсного значення, тобто похибку вимірювання.

З метою оптимальної розробки та застосування національних стандартів та їх кореляції з міжнародними стандартами, забезпечення уніфікації вимірювань, впорядкування інформації здійснюються стандартизацію.

*Стандартизація* – діяльність, спрямована на досягнення оптимального ступеня впорядкування у певній галузі шляхом встановлення положень для загального та багаторазового використання стосовно реально існуючих або перспективних завдань.

*Стандарт* – документ, що встановлює для загального та багаторазового застосування правила, загальні принципи або характеристики, які стосуються діяльності чи її результатів, з метою досягнення оптимального ступеня впорядкованості у певній галузі, розроблений у встановленому порядку на основі консенсусу.

Для реалізації стандартизації використовують такий нормативний документ, як технічні умови.

*Нормативний документ* – документ, що містить правила, загальні принципи, характеристики, які стосуються визначених видів діяльності або їх результатів.

*Технічні умови* – документ, що встановлює технічні вимоги, яким повинні відповідати продукція, процеси чи послуги.

Документальне підтвердження того, що даний об'єкт або процес відповідають визначеним вимогам, здійснюють завдяки *сертифікації* – документальному підтвердженню того, що певний об'єкт цілком відповідає визначеним параметрам його якості.

### 3.2. Фізичні одиниці

Характеристики процесів або властивостей тіл та полів, які можуть бути визначені кількісно за допомогою тих чи інших вимірювань, називаються *фізичними величинами*.

Кожна фізична величина характеризується *числовим значенням* та *одиницею вимірювання*. Наприклад, сила  $F = 5 \text{ Н}$  має числове значення (5) та одиницю вимірювання (Н).

Одиниці можуть бути *основними* (м, с, кг, К, А, кд, моль) та *похідними* (м/с,  $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ).

Будь-які фізичні величини можуть бути представлені за допомогою фундаментальних величин, які, в свою чергу, визначаються як результати вимірювань або порівняння з установленими стандартами. У 1960 році було прийнято *Міжнародну систему одиниць СІ* (System International), яка містить сім основних одиниць: одиниця довжини – метр; одиниця маси – кілограм, одиниця часу – секунда, одиниця сили електричного струму – ампер, одиниця термодинамічної температури – кельвін, одиниця сили світла – кандела, одиниця кількості речовини – моль. Крім того, є додаткові одиниці СІ, такі як одиниця плоского кута – радіан та одиниця вимірювання тілесного кута – стерadian.

### 3.3. Засоби вимірювальної техніки

*Засіб вимірювання* – це технічний засіб, що має нормовані метрологічні характеристики. До засобів вимірювання відносяться вимірювальний прилад, міра, вимірювальна система, вимірювальний перетворювач, сукупність вимірювальних систем.

*Міра* – засіб вимірювань, призначений для відтворювання фізичної величини заданого розміру.

*Вимірювальний прилад* – засіб вимірювань, який надає можливість безпосередньо відраховувати значення величини, що вимірюється. Залежно від того, яким шляхом вимірювальні прилади постачають інформацію, вони поділяються на *аналогові* та *цифрові*.

Інформація, яку отримує аналоговий вимірювальний прилад, постійно змінюється та відповідно (аналогічно) реєструється приладом. Величи-

на параметра, що змінюється, читається на шкалі приладу. Аналоговий прилад містить сенсор – функціональний елемент приладу, що забезпечує зв'язок між приладом та параметром, що вимірюється; перетворювач сигналу, який трансформує отриманий сенсором сигнал таким чином, щоб його можна було спостерігати, читати, реєструвати; аналоговий індикатор, що перетворює сигнал від перетворювача у форму, зручну для реєстрації оператором. Типовим аналоговим вимірювальним приладом є термометр. Сенсором тут є головка термометра, перетворювачем сигналу – капілярна трубка із ртуттю, аналоговим індикатором – градуйована шкала.

У цифрових приладах інформація постачається у вигляді дискретних сигналів, хоча величина параметра змінюється безперервно. Область змін величини параметра, що вимірюється, ділиться на певну кількість рівних інтервалів, відзначених цифрами. Кожний інтервал відповідає найменшій зміні параметра, яку здатний зареєструвати прилад. Цифровий прилад містить такі основні елементи: сенсор (функції його ті ж самі, що й в аналоговому приладі), аналогово-цифровий перетворювач, який перетворює отриманий сигнал у цифрову форму, та цифровий дисплей, за допомогою якого читається отримана інформація.

*Вимірювальний перетворювач* – засіб вимірювань, призначений для виробки сигналу вимірювальної інформації, зручної для передачі, подальшого перетворення, обробки та передачі по каналах трансляції, але який не завжди сприймається безпосередньо спостерігачем.

*Засіб вимірювальної техніки* – технічний засіб, який застосовується під час вимірювань та має нормовані метрологічні характеристики.

*Вимірювальна установка* – сукупність функціонально об'єднаних засобів вимірювальної техніки та допоміжних засобів, призначених для отримання сигналів, що придатні для безпосереднього сприймання вимірювальної інформації спостерігачем.

*Вимірювальна система* – сукупність вимірювальних каналів та пристроїв, які використовують для створення та передавання сигналів інформації щодо кількох вимірюваних фізичних величин.

*Еталон* – засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення або зберігання одиниці вимірювань величин, установлених державними стандартами одиниць цих величин. Існує поняття «первинний еталон» – засіб вимірювань, що має найвищу точність. На практиці використовують поняття «вторинний еталон», значення якого встановлюють через первинний еталон.

### **3.4. Основні характеристики засобів вимірювань**

*Точність вимірювань* характеризує різницю між значенням величини, що вимірюється, та істинним значенням. Точність вимірювального приладу лімітує вимірювання величини параметра. Узагальненою характеристикою засобів вимірювань є *класи точності*, які є показниками встановлених для них стандартами границь похибок. Наприклад, клас точності 0,1 відповідає похибці 0,1%.

*Чутливість засобу* може бути визначена як відношення величини зміни сигналу від сенсора до величини зміни параметра, що вимірюється. Прилад з невисокою чутливістю може позбавитися певної корисної інформації, тоді як прилад з високою чутливістю може отримати зайву інформацію, яка приведе до ускладнення її інтерпретування.

*Роздільна здатність* – найменша зміна величини параметра, що вимірюється (наприклад, поділка або цифра шкали приладу).

*Лінійність відгуку* відповідає рівномірній шкалі приладу; ця характеристика не є обов'язковою, але полегшує процес вимірювань.

*Дрейф нуля* характеризує нестабільність установки нуля при відсутності сигналу; викликається кліматичними та іншими умовами.

*Час відгуку* характеризує швидкість, з якою прилад реагує на зміну вхідного сигналу; відповідає проміжку часу між зміною параметра та моментом вимірювання цієї зміни.

*Вірогідність вимірювань* – здатність приладу постачати вірогідну інформацію протягом даного періоду часу.

*Достовірність вимірювань* – ступінь довіри до їх результатів.

*Збіжність вимірювань* – якість вимірів, яка відображає наближеність результатів однакових вимірювань (виконаних в однакових умовах).

*Правильність вимірювань* – якість вимірів, яка відображає наближеність до нуля отриманих систематичних похибок.

*Швидкодія засобу вимірювань* характеризується часом реагування засобу вимірювання на зміну вхідної величини, яка вимірюється.

### **3.5. Шкала засобу вимірювання**

*Шкалою засобу вимірювань* називають частину показового пристрою у вигляді сукупності позначок разом із пов'язаною з нею певною послідовністю чисел.

*Поділка шкали* – проміжок шкали між двома сусідніми відмітками шкали.

*Ціна поділки* – найменше значення вимірюваної величини, яке відповідає одній поділці.

На шкалі приладу представлено умовні позначення, що відповідають типу та системі приладу, класу точності, необхідному положенню шкали (горизонтальному, вертикальному чи нахиленому), випробній напрузі електричної міцності ізоляції, групі стійкості до кліматичних впливів.

*Клас точності* – узагальнена характеристика засобу вимірювальної техніки, що визначається границями його допустимих основних та додаткових похибок, а також іншими характеристиками, що впливають на його точність, значення яких регламентуються стандартами на окремі види засобів вимірювань.

Отже, клас точності – це відносна похибка від верхньої межі вимірювання, виражена у відсотках.

Точність електровимірювальних приладів лежить в основі їх поділу на класи, а саме: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Клас точності відпові-



дає відносній похибці у відсотках. Наприклад, вольтметр, шкалу якого наведено на рис. 1, має клас точності  $\gamma = 1,5$  (число, що обведено колом); максимальне значення напруги, яка може бути виміряна за шкалою приладу на даному діапазоні, становить  $U_{\max} = 300 \text{ В}$  (згідно з фіксацією ручки, розміщеної у верхній частині приладу, в положенні «300 В»). Звідси систематична похибка вимірювання напруги  $u$  дорівнює:

$$\Delta_{cU} = \frac{\gamma \cdot X_{\max}}{100} = \frac{1,5 \cdot 300 \text{ В}}{100} = 4,5 \text{ В.}$$

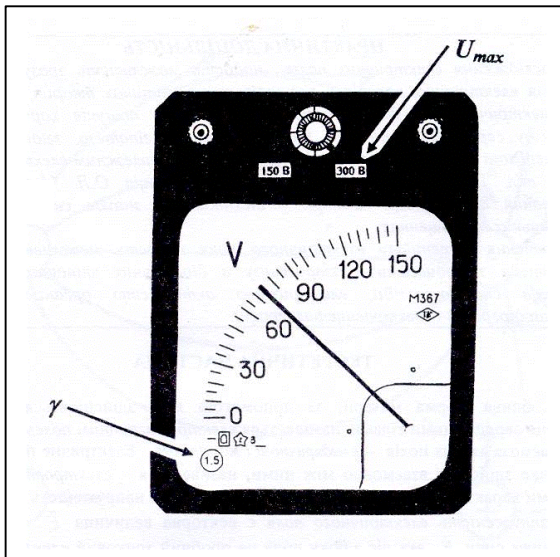
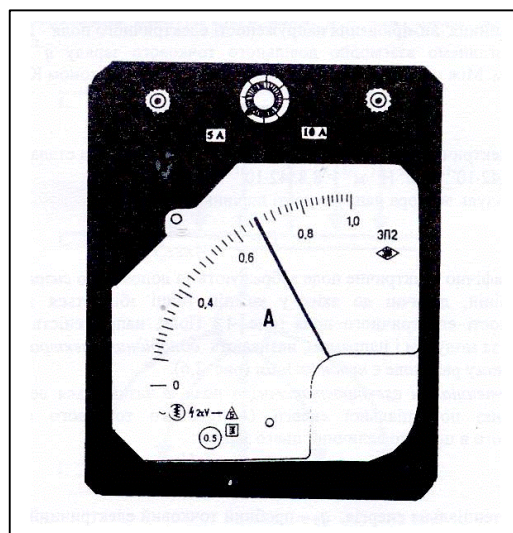


Рис. 3.1. Визначення похибки вимірювання електричної величини (пояснення у тексті)

### Контрольне завдання

Визначити систематичну похибку приладу, який наведено на рис. 3.2.

Рис. 3.2. Шкала приладу, систематичну похибку якого слід визначити



### 3.6. Види вимірювань

Вимірювання можуть бути *прямими*, якщо сигнал, що надходить на вимірювальний прилад від сенсора, містить безпосередньо інформацію про параметр, який вимірюється (наприклад, вимірювання температури, воло-

гості, тиску, швидкості вітру тощо), та *непрямими*, під час яких значення параметру знаходять за допомогою обчислень на основі відомих формул або залежностей між цим параметром та параметрами, що вимірювалися безпосередньо (наприклад, вимірювання швидкості седиментації частинок, втрат теплоти з поверхні листка тощо). Вимірювання параметрів навколишнього середовища можуть здійснюватися безпосередньо біля об'єкту дослідження або дистанційно.

### 3.7. Похибки вимірювань

Результати вимірювань надають не істинне значення величини  $a$ , що вимірюється, а лише наближене. Найбільш близьким до істинного значення можна вважати середнє арифметичне  $\langle x \rangle$  результатів вимірювань, тобто  $\langle x \rangle \sim a$ .

*Похибкою* результату вимірювання називається відхилення результату вимірювання  $x$  фізичної величини від її істинного значення  $a$ , тобто  $\Delta x = x - a$ .

*Абсолютна похибка вимірювань* – це модуль різниці результату вимірювання  $x$  та її істинного значення  $a$ , тобто  $|\Delta x| = |x - a|$ .

*Довірчою границею похибок вимірювань*  $\Delta$  називають межі, в яких знаходиться істинне значення:  $\langle x \rangle - \Delta \leq a \leq \langle x \rangle + \Delta$ , або  $a = \langle x \rangle \pm \Delta$ .

*Довірчою ймовірністю*  $P$  випадкової події називають ту частку великої кількості результатів вимірювань, які б попали у дані довірчі межі. Довірча ймовірність не може бути більшою від одиниці:  $0 \leq P \leq 1$ . Події, для яких  $P = 1$ , називають *вірогідними*. Величина довірчої ймовірності становить:  $P = 0,90$  – при знижених вимогах надійності в грубо орієнтованих дослідженнях;  $P = 0,95$  – при загальних вимогах надійності у більшості біологічних досліджень;  $P = 0,99$  при підвищених вимогах надійності у перевірочних дослідах;  $P = 0,999$  – при високих вимогах надійності при дослідженнях шкідливих та отруйних речовин.

Похибки поділяються на систематичні та випадкові.

*Систематичні похибки* зумовлені недосконалістю методів вимірювань та неточністю вимірювальних приладів. Ці похибки залишаються постійними протягом повторних вимірювань тієї ж самої величини.

*Випадкові похибки* виникають через суб'єктивні фактори, незначні зміни умов вимірювань та інші випадкові причини. Ці похибки змінюються довільно впродовж повторних вимірювань тієї самої величини.

*Промахи* – це грубі похибки, які значно перевищують систематичні та випадкові похибки і пов'язані з несправністю засобів вимірювань, неправильним відліком показів приладу, різкими змінами умов вимірювань. Звичайно, промахи не враховуються при обробці результатів вимірювань.

Таким чином, похибки, що виникають під час вимірювань, є сумою систематичних та випадкових похибок і називаються *сумарними*.

### 3.8. Автоматизовані методи вимірювання

Процедура автоматизованого вимірювання параметрів навколишнього середовища передбачає застосування датчика – інструменту для вимірювання цих параметрів (сенсора або перетворювача), системи збирання та реєстрації даних.

*Сенсор* – функціональний елемент приладу, що забезпечує зв'язок між приладом та параметром, що вимірюється. Він призначений для детектування сигналу або стимулу та відповідного відгуку. Наприклад, термістор є сенсор, який реагує зміною опору на зміну температури.

*Перетворювач* – це прилад, який перетворює вхідну енергію однієї форми у вихідну енергію іншої форми; він трансформує отриманий сенсором сигнал таким чином, щоб його можна було спостерігати, читати, реєструвати. Прикладом перетворювача може бути термістор, включений у схему вимірювального мосту; такий міст дає можливість вимірювати напругу, що пов'язана з опором. У даному приладі відбувається перетворення теплової енергії на електричну.

Типову схему автоматизованих вимірювань наведено на рис. 3.3.

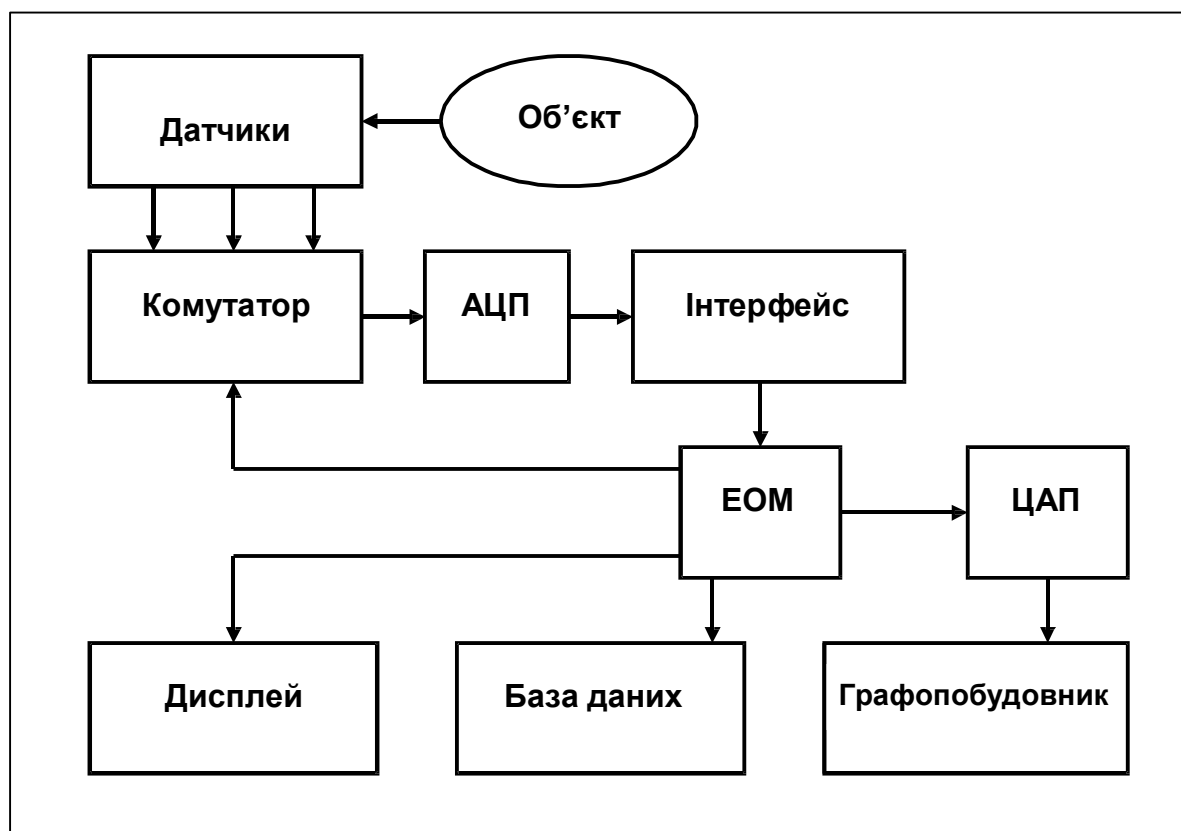


Рис.3.3. Типова схема автоматизованих вимірювань

Об'єктом вимірювань може бути деякий процес або явище, що відбувається у навколишньому середовищі. Величина, що вимірюється, сприймається *датчиком* (сенсором або перетворювачем), з виходу якого електричний сигнал подається на *комутатор*, який переключає або виби-

рає датчики під час багатоканальних вимірювань. Електричний сигнал з виходу датчика надходить до *анало́го цифрового перетворювача (АЦП)*, який перетворює вхідний аналоговий сигнал у дискретний код (цифровий сигнал). Взаємодія АЦП та *електронно-обчислювальної машини (ЕОМ)* забезпечується за допомогою *інтерфейсу*. Зворотне перетворення цифрового сигналу в аналоговий здійснюється за допомогою *ЦАП (цифро-аналогового перетворювача)*.

Інформація, отримана внаслідок вимірювання, підлягає обробці згідно заданій програмі в ЕОМ та представляється в зручній формі або на екрані *дисплея* – вихідного електронного пристрою, призначеного для візуального відображення інформації, або друкується за допомогою *графопобудовника*. Зберігання необхідної інформації здійснюється в *базі даних*.

### Контрольні питання та завдання

1. Що вивчає метрологія?
2. Що таке вимірювання параметрів навколишнього середовища?
3. Дати визначення стандартизації.
4. Що таке фізична величина? Чим вона характеризується?
5. Які одиниці називають основними; які – похідними?
6. Які вимірювання є прямими; які – непрямими?
7. Як класифікуються похибки вимірювань?
8. Назвати основні типи вимірювального обладнання.
9. Охарактеризувати аналогові прилади.
10. Охарактеризувати цифрові прилади.
11. Назвати основні характеристики вимірювального приладу
- 12.3 яких елементів складається система автоматизованих вимірювань?



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

### ВИМОГИ ДО ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

#### ПРАВИЛА ОКРУГЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

##### Значуща цифра

*Найбільша значуща цифра* – це крайня ліва, що не дорівнює 0, цифра, незважаючи на те, де знаходиться десяткова кома:

123

0,0215

*Найменша значуща цифра* – це крайня права, що не дорівнює 0, цифра, якщо десяткова кома відсутня:

4537

5300

*Найменша значуща цифра* – це крайня права цифра, яка може дорівнювати 0 або ні, якщо є десяткова кома:

21,34

1,260

Усі цифри між найбільшою та найменшою значущими цифрами є також *значущими*. Розглянемо приклади:

а) *три значущі цифри*: 123; 12300; 12,3; 1,23; 0,123; 0,0123; 0,00123.

б) *чотири значущі цифри*: 20,32; 4056; 0,06671; 1,260;  $7,654 \cdot 10^4$ .

#### Контрольне завдання

Визначити кількість значущих цифр:

0,034;

35,23;

5431;

1,0;

0,00056;

6000.

#### Округлення результатів при множенні та діленні наближених чисел

*Правило*: при множенні та діленні наближених чисел у результаті треба залишити стільки значущих цифр, скільки їх є у числі з найменшою кількістю значущих цифр.

*Приклади*:

10,77

× 3,55

38,2335 ≈ 38,2

3,1416

× 0,0123

0,03864168 ≈ 0,0386

#### Контрольне завдання

Округлити результати при множенні та діленні:

3,1416

× 0,0123

?

129,6

× 5,53

?

1,45

× 0,77

?

$\frac{2122}{0,123} = ?$

$\frac{6,0606}{1,11} = ?$

### Округлення результатів при додаванні та відніманні наближених чисел

*Правило:* при додаванні та відніманні наближених чисел результат округлюють так, щоб він не мав значущих цифр у тих найменших розрядах, які відсутні хоча б в одному доданку.

*Приклади:*

$$\begin{array}{r} 15,27 \\ + 0,617 \\ + \underline{32,2} \\ \hline 48,087 \approx 48,1 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 3,14 \\ - \underline{1,6} \\ \hline 1,54 \approx 1,5 \end{array}$$

### Контрольне завдання

Округлити результати при додаванні та відніманні:

$$\begin{array}{r} 121,2 \\ + 23,678 \\ + 91,34 \\ + \underline{3,12} \\ \hline ? \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 72,163 \\ - \underline{3,14} \\ \hline ? \end{array}$$

### Округлення результатів при піднесенні у ступінь чи добуванні кореня

*Правило:* у результаті слід залишати стільки значущих цифр, скільки їх є у вихідному числі, з яким відбувається дія.

*Приклади:*

$$2,4^3 = 13,824 \approx 14$$

$$\sqrt{25} = 5,0$$

### Контрольне завдання

Округлити результати при піднесенні в ступінь чи добуванні кореня:

$$\pi(6,76)^2 = ?$$

$$(5,211 \cdot 10^{-4})^2 = ?$$

$$\sqrt{2,567} = ?$$

## ТЕОРІЯ ПОХИБОК

### Похибки при прямих вимірюваннях

Результати вимірювань можна розглядати як статистичну сукупність чисел. Окремі одиниці, що входять у склад статистичної сукупності, називають *варіантами*.

*Середнє арифметичне*  $\langle x \rangle$  є результатом ділення суми всіх варіант сукупності на їх загальне число  $n$ :

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (1)$$

*Випадкове відхилення*  $\delta_i$  дорівнює різниці між  $i$ -тою варіантою та середнім арифметичним:

$$\delta_i = x_i - \langle x \rangle. \quad (2)$$

*Дисперсія*  $\sigma^2$  визначається за формулою:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n-1}. \quad (3)$$

Середнє квадратичне відхилення  $\sigma$  дорівнює кореню квадратному від дисперсії:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n-1}}. \quad (4)$$

Вибіркова похибка середнього арифметичного  $m$  (похибка репрезентативності) визначається за формулою:

$$m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}. \quad (5)$$

Підставляючи (4) в (5), отримуємо:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n(n-1)}}. \quad (6)$$

Довірча границя випадкової похибки  $\overset{\circ}{\Delta}$  середнього арифметичного визначається за виразом:

$$\overset{\circ}{\Delta} = tm = t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n(n-1)}}, \quad (7)$$

де  $t$  – коефіцієнт Стьюдента (критерій надійності), який знаходять з табл.1 за даними кількістю вимірів  $n$  та довірчою ймовірністю  $P$ .

Довірча границя систематичної похибки  $\Delta_c$  у випадку, коли виключені всі, крім інструментальних, систематичні похибки, визначається ціною поділки  $C$  вимірювального приладу; у цьому разі довірча ймовірність того, що систематичні похибки не перевищують  $\Delta_c = C$ , становить  $P_c = 1$ .

Довірча границя сумарної похибки  $\Delta$  дорівнює:

$$\Delta = \overset{\circ}{\Delta} + \Delta_c. \quad (8)$$

Коефіцієнт Стьюдента					
Кількість вимірювань	$P = 0,90$	$P = 0,95$	$P = 0,98$	$P = 0,99$	$P = 0,999$
3	2,92	4,30	6,97	9,93	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,37	4,03	6,86
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,90	2,37	3,00	3,50	5,41
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
14	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
20	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
$\infty$	1,64	1,96	2,33	2,58	3,29

Відносна похибка  $\varepsilon$  визначається як відношення довірчої границі сумарної похибки до середнього арифметичного:



$$\varepsilon = \frac{\Delta}{\langle x \rangle}. \quad (9)$$

### Приклад

Результати вимірювання швидкості вітру за допомогою анемометра наведено у табл. 1.

1. Результати вимірювання швидкості вітру за допомогою анемометра

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$v, \text{ м/с}$	22,5	2,0	1,5	1,0	2,5	3,5	1,5	1,0	0,5	0,5

Визначити відносну похибку вимірювань швидкості вітру.

### Розв'язання

Визначаємо середнє арифметичне:

$$\langle x \rangle = \frac{2,5 + 2,0 + 1,5 + 1,0 + 2,5 + 3,5 + 1,5 + 1,0 + 0,5 + 0,5}{10} = 1,7 \text{ м/с.}$$

Випадкові відхилення при вимірюванні швидкості вітру становлять:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= |2,5 - 1,7| = 0,8 \text{ м/с}; & \delta_6 &= |3,5 - 1,7| = 1,8 \text{ м/с}; \\ \delta_2 &= |2,0 - 1,7| = 0,3 \text{ м/с}; & \delta_7 &= |1,5 - 1,7| = 0,2 \text{ м/с}; \\ \delta_3 &= |1,5 - 1,7| = 0,2 \text{ м/с}; & \delta_8 &= |1,0 - 1,7| = 0,7 \text{ м/с}; \\ \delta_4 &= |1,0 - 1,7| = 0,7 \text{ м/с}; & \delta_9 &= |0,5 - 1,7| = 1,2 \text{ м/с}; \\ \delta_5 &= |2,5 - 1,7| = 0,8 \text{ м/с}; & \delta_{10} &= |0,5 - 1,7| = 1,2 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Дисперсія для сукупності вимірювань дорівнює:

$$\sigma^2 = \frac{0,8^2 + 0,3^2 + 0,2^2 + 0,7^2 + 0,8^2 + 1,8^2 + 0,2^2 + 0,7^2 + 1,2^2 + 1,2^2}{10} = 8,6 \text{ м/с}.$$

Визначимо похибку репрезентативності:

$$m = \sqrt{\frac{8,6}{10 \cdot 9}} = 0,31 \text{ м/с.}$$

Коефіцієнт Стьюдента для нашого прикладу становить

$t = 2,26$  для  $n = 10$  і  $P = 0,95$ ; отже довірна границя випадкової похибки дорівнює  $\Delta^0 = 2,26 \cdot 0,31 \text{ м/с} = 0,7 \text{ м/с}$ .

У нашому прикладі швидкість вітру визначена анемометром з точністю до 0,5 м/с, тобто довірна границя систематичної похибки становить  $\Delta_s = 0,5 \text{ м/с}$ .

Довірна границя сумарної похибки з урахуванням правил округлення дорівнює:

$$\Delta = 0,7 + 0,5 = 1,2 \text{ м/с.}$$



Відносна похибка  $\varepsilon$  при визначенні швидкості вітру дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{1,2}{1,7} = 0,7 = 70 \%$$

### Похибки при непрямих вимірюваннях

Розглянемо процедуру обчислення похибок при непрямих вимірюваннях. Нехай під час визначення об'ємної густини ґрунту виникає потреба у визначенні об'єму зразка ґрунту циліндричної форми. Формула об'єму  $V$  циліндра має вигляд:

$$V = \pi \frac{D^2}{4} h, \quad (10)$$

де  $D$  – діаметр;  $h$  – висота циліндра.

Логарифмуємо останній вираз:

$$\ln V = \ln \pi + 2 \ln D - \ln 4 + \ln h. \quad (11)$$

Диференціюємо вираз (11):

$$d \ln V = d \ln \pi + 2 d \ln D - d \ln 4 + d \ln h. \quad (12)$$

Враховуючи вираз  $d \ln x = \frac{dx}{x}$ , отримаємо з останнього рівняння:

$$\frac{dV}{V} + \frac{d\pi}{\pi} + 2 \frac{dD}{D} - \frac{d4}{4} + \frac{dh}{h}. \quad (13)$$

Диференціали величин замінюють довірчими границями зі знаками «+», а символи величин – їх середніми значеннями. Крім того, слід зауважити, що  $\frac{d4}{4} = 0$ .

Звідси можна визначити відносні похибки результатів прямих та непрямих вимірювань:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta \pi}{\pi} + 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h}, \quad (14)$$

або

$$\varepsilon_V = \varepsilon_\pi + 2\varepsilon_D + \varepsilon_h. \quad (15)$$

Похибку  $\Delta \pi$  табличної величини  $\pi$  визначають як половину одиниці останнього значущого розряду. Наприклад, якщо  $\pi = 3,14$ , то  $\Delta \pi = 0,005$ ; якщо в таблиці знайдено значення  $\pi = 3,141$ , то  $\Delta \pi = 0,0005$  тощо.

Похибки прямих вимірювань  $\Delta D$  та  $\Delta h$  визначають згідно з формулами попереднього розділу.

Знаходимо довірчу границю сумарної похибки:

$$\Delta_V = \varepsilon_V \cdot \langle V \rangle \quad (16)$$

де середнє значення об'єму знаходять шляхом підстановки у формулу (10) середніх значень результатів прямих вимірювань:

$$\langle V \rangle = \pi \frac{\langle D \rangle^2}{4} \langle h \rangle. \quad (17)$$

### Контрольні завдання

1. Виміряти діаметр ручки штангенциркулем 3, 5 та 7 разів. Обчислити середню площу поперечного перерізу ручки та відносну похибку вимірювань. Визначити, як впливає кількість вимірювань на похибки вимірювань.

2. Виміряти тричі діаметр ручки лінійкою, штангенциркулем та мікрометром. Обчислити середню площу поперечного перерізу ручки та відносну похибку вимірювань. Визначити, як впливає вибір інструменту на похибки вимірювань.

### ПОБУДОВА ГРАФІКІВ

Графіки слід будувати на основі таких основних правил:

1. На осі абсцис (горизонтальній осі) треба відкласти значення аргументу, а на осі ординат (вертикальній осі) – значення функцій (рис. 1,а);

2. Кожну вісь супроводити поділками; біля кожної осі вказати величину та одиницю її вимірювання (рис. 1,б);

3. Площа, що відводиться під графік, повинна бути використана найбільш доцільно (рис. 1, в–д);

4. Через точки, що нанесені на графік, проводять плавну лінію так, щоб усі точки розташовувалися симетрично відносно лінії (рис. 1,е);

5. Похибки вимірювань наносять у вигляді вертикальних розносок (рис. 1,ж).

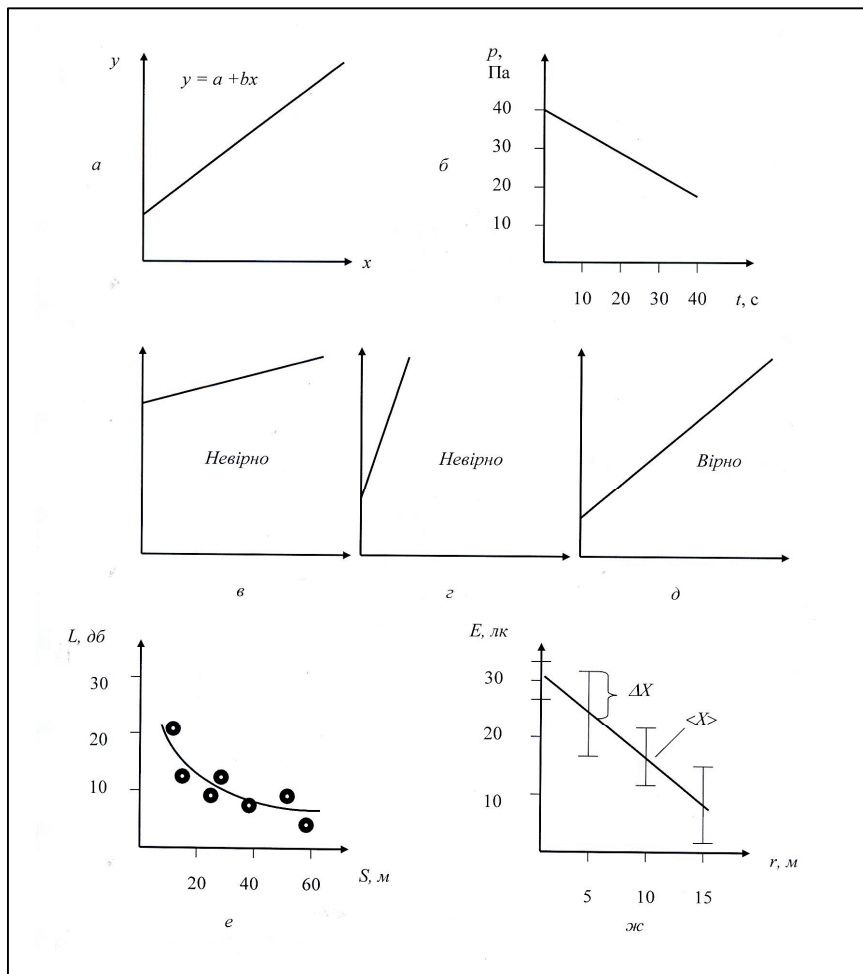


Рис. 1. Правила побудови графіків

## II. КЛІМАТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ

### 4. ОРГАНІЗАЦІЯ КЛІМАТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ

*Клімат* – це статистична сукупність таких метеорологічних елементів та атмосферних явищ як атмосферний тиск, вітер, температура, вологість, опади, сонячне випромінювання, які спостерігаються у даному регіоні упродовж тривалого проміжку часу. Клімат характеризує сукупність станів, через які проходить система «гідросфера-літосфера-атмосфера» за декілька десятиріч.

*Погода* – це сукупність поточних метеорологічних елементів та атмосферних явищ, що спостерігаються у даний момент часу у тій чи іншій точці простору.

*Кліматичний моніторинг* – система спостережень, оцінювання, прогнозування змін і коливань кліматичної системи “атмосфера-гідросфера-літосфера-біота”.

#### 4.1. Метеорологічні станції

Прогнозування погоди здійснюється за допомогою поточної інформації, що постачається близько 9000 метеорологічними станціями світу: щоденно, кожні три години (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 та 21 година за всесвітнім часом) спостерігачі фіксують основні метеорологічні параметри – атмосферний тиск, швидкість вітру, температуру повітря тощо. Після цього всі дані зашифровуються спеціальним синоптичним кодом та поступають у міжрегіональні та світові центри, звідки передаються усім країнам світу для аналізу, вивчення, побудови синоптичних карт та прогнозування погоди.

Так, наприклад, Японія має 100 синоптичних станцій, 62 авіаційних систем спостереження за погодою, 18 радіозондів, 11 вимірювачів профілю вітру, 1000 автоматичних станцій спостереження, 30 радіолокаційних систем, 6 регіональних та 4 морських метеоцентрів.

Метеорологічна служба Фінляндії використовує автоматичні метеорологічні станції; станції спостереження за кліматом, опадами, сонячним випромінюванням; радіозонди та погодні радіолокатори.

*Радіолокаційні системи* передбачають використання електромагнітних хвиль в області від 0,1 см до 2 м (що відповідає частотам від 100 МГц до 50000 МГц). НВЧ локація дає можливість визначати положення, рух та природу віддалених об'єктів.

Так, радіолокатор фінського виробництва Vaisala Weather Radar WRM200 надає інформацію відносно різних типів опадів, таких як сніг, дощ, паморозь, а також параметрів вітру (рис. 4.1). Ще один тип фінського радіолокатора, Vaisala LAP®-3000 Lower Atmosphere Wind Profiler, забезпечує інформацією щодо вертикального профілю горизонтальної швидкості та напрямку вітру, вертикальної швидкості вітру до висоти 3 км.

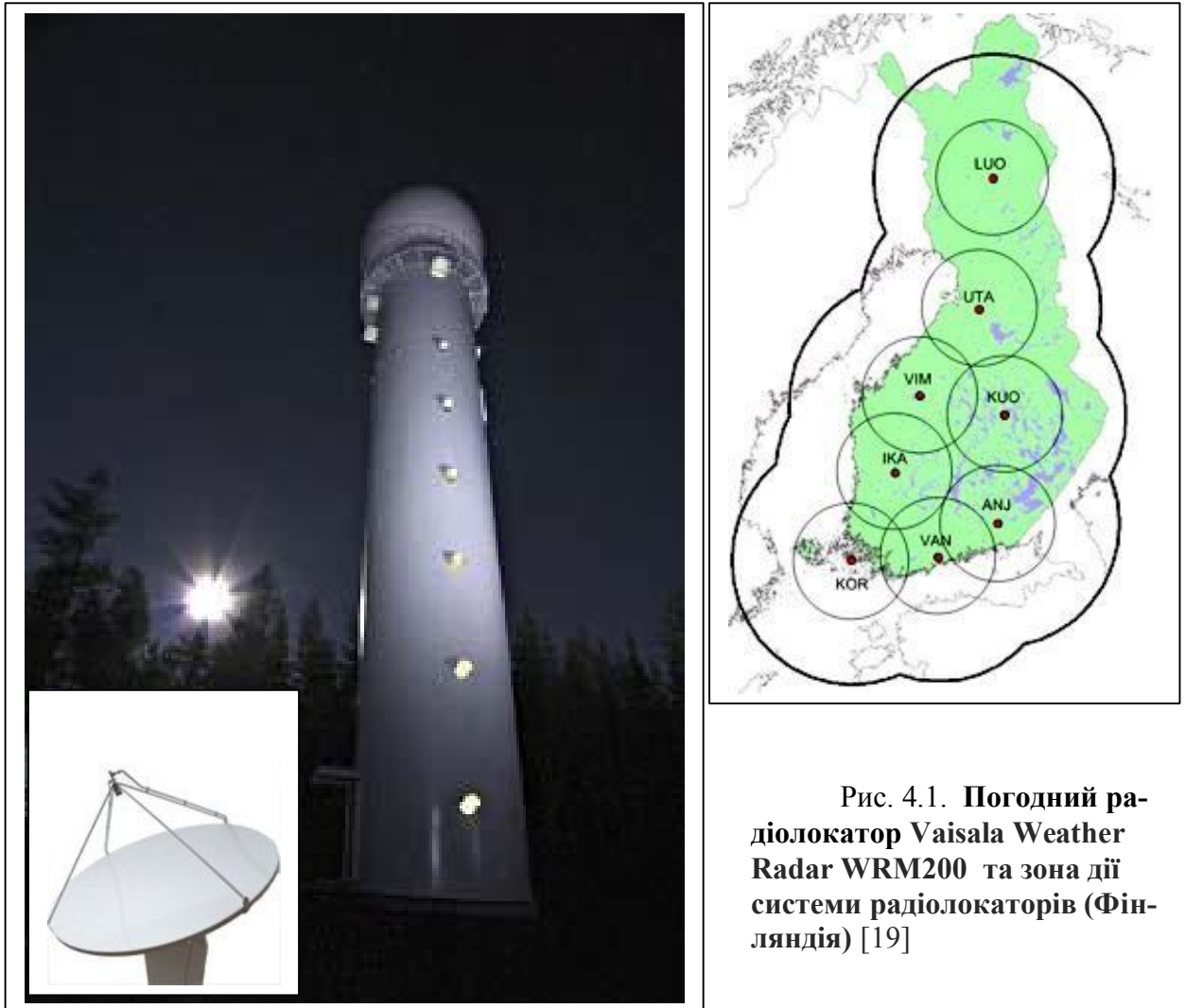


Рис. 4.1. Погодний радіолокатор Vaisala Weather Radar WRM200 та зона дії системи радіолокаторів (Фінляндія) [19]

Ультразвукова система Radio Acoustic Sounding System (RASS) надає можливість вимірювати профіль температури повітря вздовж 1,5 км над рівнем земної поверхні (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Ультразвукова система Radio Acoustic Sounding System (RASS) (Фінляндія), що встановлена на узбережжі Аляски [20]

Мережу доплерівських радіолокаційних станцій на території США наведено на рис. 4.3.

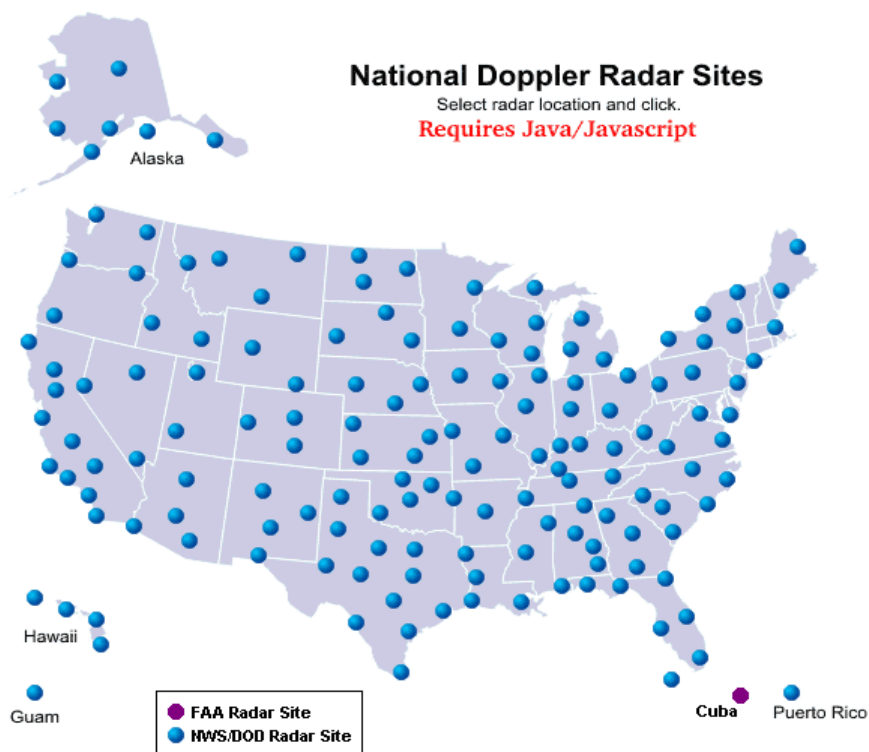


Рис. 4.3. Карта розподілу доплерівських радіолокаційних станцій на території США [21]

## 4.2. Автоматичні метеорологічні станції

Сучасні автоматичні метеорологічні станції, що обладнані комп'ютерами та мікропроцесорами, призначені для виконання різноманітних завдань. Результати спостережень можуть бути передані миттєво у центральні установи або накопичуватися для подальшого вивчення кліматичних умов даного регіону.

Складаються автоматичні метеорологічні станції з набору сенсорів, що здійснюють вимірювання тих чи інших метеорологічних параметрів, адаптерів, які зв'язують ці сенсори з мультиплексором, призначеним для послідовного зв'язку сенсорів з аналого-цифровим перетворювачем, та системи передавання або накопичення інформації.

Розглянемо як приклад автоматичну кліматологічну станцію Cimel ENERCO CE 411 (рис. 4.4).

Живлення станції забезпечується за допомогою сонячної батареї. Електроніка станції розташована у поліефірному боксі, обладнаному теплоізоляцією та вентиляцією. Деякі сенсори (температури, вітру, сонячного випромінювання, вологості), розміщені на штангах, решта (температури



грунту) занурені у ґрунт або розташовані над ґрунтовою поверхнею (опадомір). Станція пов'язана з телефонною мережею або з радіопередавачем для прямого зв'язку з супутником Meteostat.

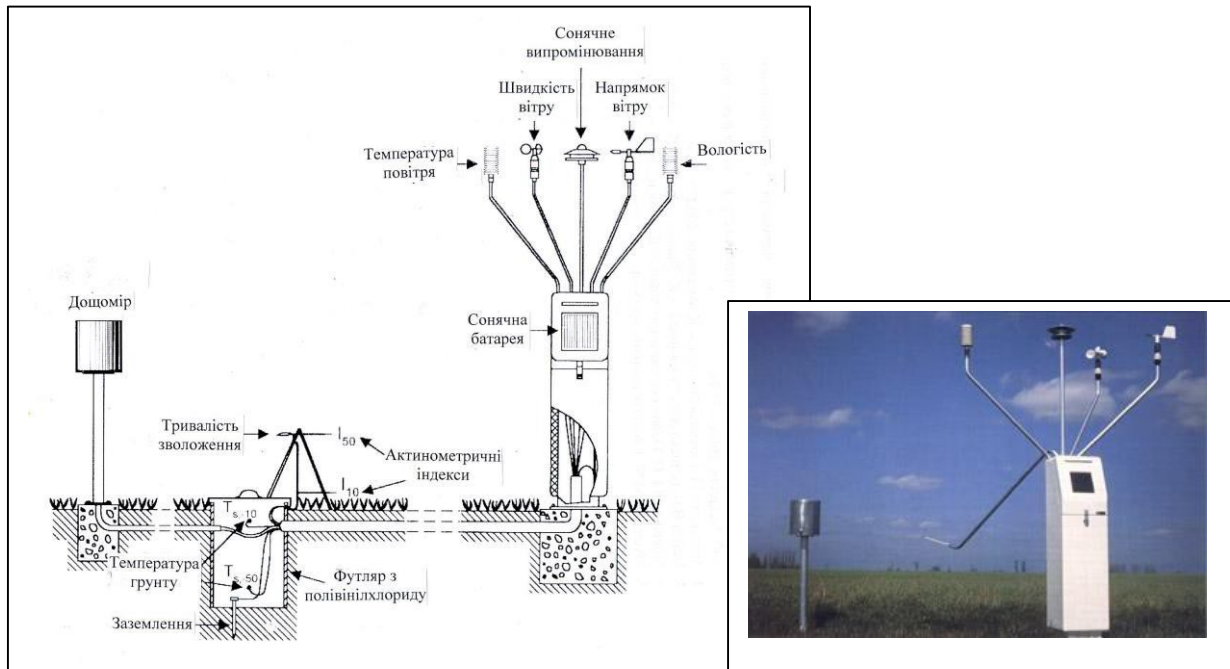


Рис. 4.4. Автоматична кліматологічна станція Cimec ENERCO CE 411

Ще один тип автоматизованої метеорологічної станції (модель 5081) призначений для попередження щодо штормів, прогнозування погоди, вивчення впливу вітру та реалізації іригаційних та сільськогосподарських програм.

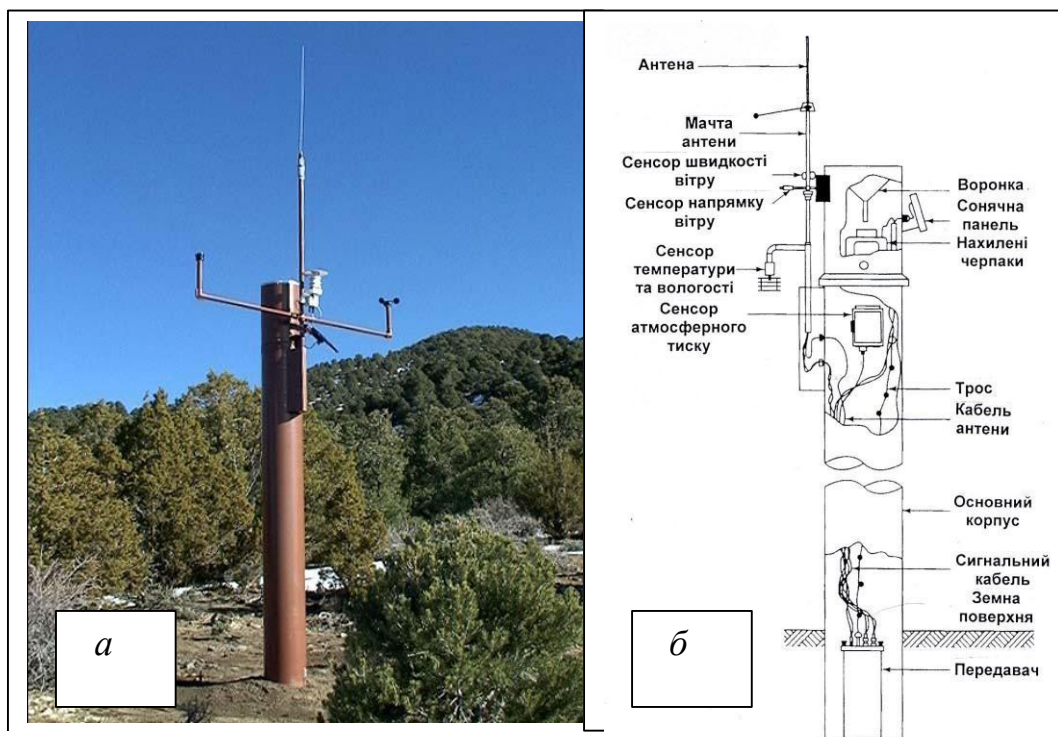


Рис. 4.5. Зовнішній вигляд (а) та конструкція (б) автоматизованої метеорологічної станції (модель 5081)

Складається станція з сенсорів: швидкості та напрямку вітру, температури, вологості, атмосферного тиску та дощоміру. Живлення станції здійснюється через сонячну панель; передача метеорологічної інформації забезпечується радіопередавачем (рис. 4.5).

Габарити станції: висота 4 м, діаметр – 30 см. Вага – 33 кг.

Розглянемо систему наземних спостережень AMeDAS (*Automated Meteorological Data Acquisition System*), яка підпорядкована Японській Метеорологічній Агенції (Japan Meteorological Agency, JMA). Система складається з 1300 автоматизованих станцій, розміщених на відстані близько 17 км одна від одної вздовж всієї Японії.

Система AMeDAS [22] постачає інформацію щодо напрямку та швидкості вітру, типів та кількості опадів, типів та висоти хмар, видимості, температури та вологості повітря, атмосферного тиску, стану погоди (рис. 4.6).

Усі ці дані надсилаються у Центр AMeDAS, що розташований у штаб-квартирі у Токіо, після чого інформація розповсюджується по всій країні.

Близько 700 станцій працюють без участі персоналу; 280 станцій, що розміщені у регіонах можливих снігопадів, проводять спостереження за глибиною снігового покриву.

Крім того, система дає можливість попереджати про ймовірність природних лих – землетрусів та вивержень вулканів.



Рис. 4.6. Зовнішній вигляд системи наземних спостережень AMeDAS [22]

В цілому японське бюро погоди складається з 100 синоптичних станцій, 62 служб погоди для авіації, 18 радіозондних станцій, 11 вимірювачів профілю вітру, 30 радіолокаторів та 4 морських метеоцентрів.

### 4.3. Організація кліматичного моніторингу в Україні

Після здобуття незалежності України у 1991 році на базі Українського управління гідрометеорологічної служби було утворено Державний комітет України з питань гідрометеорології, який у 2000 році увійшов у статусі Департаменту гідрометеорологічної служби і моніторингу до Міністерства екології та природних ресурсів України.

Постановою Кабінету Міністрів України у 2001 році утворено урядовий орган державного управління – Державна гідрометеорологічна служба (Держгідромет), яка зараз діє у складі МНС України [23].

Держгідромет проводить систематичні спостереження за станом атмосфери, водних та інших об'єктів; забезпечує організації та населення

гідрометеорологічною інформацією, даними про забруднення навколишнього природного середовища, попередженнями про стихійні явища, прогнозами погоди, інформацією про клімат.

Систематичні спостереження за кліматом проводить Відділ кліматології Центральної Геофізичної Обсерваторії України [24]. Серед основних завдань відділу слід зазначити: складання Кліматичного кадастру України; узагальнення та підготовка до видання даних метеорологічних та актинометричних спостережень; розробка та впровадження нових методів кліматологічної обробки метеорологічних та актинометричних спостережень, нових методів досліджень кліматичного режиму України; створення Національного банку метеорологічних та кліматологічних даних на базі міжнародної системи «КЛІКОМ»; участь у проведенні міжнародних проектів та дослідів шляхом підготовки відповідної кліматологічної інформації зі станцій метеорологічної мережі України тощо.

У 1995 році відділ кліматології розпочав роботу з підготовки фундаментальної праці – «Кліматичного кадастру України», основна мета якого полягає у підготовці значної і різноманітної кліматологічної інформації, рівень якої відповідає сучасним вимогам науки і практики. «Кадастр з клімату України» освітлює такі питання як сонячна радіація та сонячне сяйво; атмосферний тиск і вітер; температура повітря та ґрунту; вологість повітря, атмосферні опади та сніговий покрив; хмарність; атмосферні явища та ожеледно-паморозеві утворення.

У 1997 році вийшла Постанова Кабінету Міністрів України *Про Кліматичну програму України* [25], у якій стверджується, що клімат є одним з основних природних ресурсів, від яких залежать умови життя і діяльності людини, напрями і рівень розвитку економіки. У той же час, якщо не вживати запобіжних заходів, то несприятливі кліматичні явища можуть завдати значних матеріальних та екологічних збитків суспільству.

У Проекті Концепції державної цільової економічної програми технічного і технологічного розвитку гідрометеорологічної служби, який був підготовлений у 2007 році [26], наведено перелік основних компонентів системи гідрометеорологічних спостережень і прогнозування України, а саме: 126 метеорологічних, 28 авіаметеорологічних та 9 аерологічних станцій, 25 гідрологічних станцій і підрозділів, 14 морських, 3 спеціалізовані агрометеорологічні, 2 водно-балансові, 2 селестокові, 2 сніголавинні станції, озерні станції на водосховищах, а також близько 470 гідрометеорологічних постів. Базові спостереження за забрудненням атмосферного повітря ведуться на 162 стаціонарних постах у 53 містах, атмосферних опадів – у 33, снігового покриву – у 54 населених пунктах, поверхневих вод суші – у 240 пунктах, морських вод – у 97 пунктах, ґрунтів – у 56 адміністративних районах. Функціонує розгалужена мережа з 293 пунктів спостережень за радіоактивним забрудненням довкілля. 114 метеорологічних станцій України включені до каталогу станцій спостережень ВМО.

У цьому ж Проекті Концепції розвитку Гідрометслужби стверджується, що основні причини виникнення проблеми, що знижує ефективність



роботи гідрометеорологічної служби та негативно позначається на якості гідрометеорологічного забезпечення, мають технічний і фінансовий характер [26].

Причини технічного характеру: моральна застарілість та фізична зношеність засобів вимірювальної техніки, яка використовується у гідрометеорологічній службі; практична відсутність сучасних автоматизованих технологій проведення спостережень, гідрометеорологічного прогнозування та забезпечення; відсутність в Україні до 2000 року галузі гідрометеорологічного приладобудування; недостатня державна підтримка галузі гідрометеорологічного приладобудування та аналітичного приладобудування для контролю за забрудненням навколишнього природного середовища.

Причини фінансового характеру: бюджетне фінансування гідрометеорологічної служби не перевищувало 53% від її потреб, а в окремі роки воно складало лише 30% від необхідних коштів.

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Чим відрізняється клімат від погоди?
2. Дати визначення кліматичного моніторингу.
3. Як здійснюється прогнозування погоди ?
4. Яку інформацію надають радіолокаційні та ультразвукові системи?
5. З яких елементів складаються автоматичні метеорологічні станції?
6. Охарактеризувати роботу системи АMeDAS.
7. Пояснити організацію кліматичного моніторингу в Україні.
8. Які проблеми стоять перед гідрометеорологічною службою України?



## 5. ПРИРОДНІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

### 5.1. Вимірювання сонячної сталої

Спостереження за Сонцем за допомогою піргеліометра супутників *Nimbus* надали можливість визначити середню інтенсивність сонячного випромінювання (*сонячну сталу*) у межах 1369-1375 Вт/м<sup>2</sup> (середнє значення 1373 Вт/м<sup>2</sup>).

Загальна сонячна енергія становить для сфери радіусом  $d = 1,496 \cdot 10^{11}$  м (відстань між Сонцем та Землею):

$$E = IS = 1373 \text{ Вт/м}^2 \cdot 4\pi d^2 \text{ м}^2 = 1373 \text{ Вт/м}^2 \cdot 4 \cdot 3.14 \cdot (1,496 \cdot 10^{11})^2 \text{ м}^2 = 3,88 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

Сонце являє собою абсолютне чорне тіло; за законом Стефана-Больцмана маємо:

$$\sigma T^4 = 3,88 \cdot 10^{26} \text{ Вт/}4\pi R_C^2.$$

Звідки абсолютна температура Сонця  $T = 5770$  К.

Радіус земної кулі дорівнює  $R_3 = 6,37 \cdot 10^6$  м;  $R_3^2 = 4,06 \cdot 10^{13}$  м<sup>2</sup>;

Площа поперечного перерізу  $\pi R_3^2 = 3,14 \cdot 4,06 \cdot 10^{13}$  м<sup>2</sup> =  $12,75 \cdot 10^{13}$  м<sup>2</sup>.

Площа усієї поверхні Землі становить  $4 \cdot \pi R_3^2 = 51 \cdot 10^{13}$  м<sup>2</sup>.

Потужність сонячного випромінювання на поверхні Землі (враховуємо, що Земля обертається і площа, що опромінюється, у 4 рази менша, ніж уся площа поверхні):

$$P = 1373 \text{ Вт/м}^2 \cdot \pi R_3^2 = 1373 \cdot 12,75 \cdot 10^{13} \text{ м}^2 = 1,74 \cdot 10^{17} \text{ Вт.}$$

Інтенсивність Сонячного випромінювання, що надходить на земну поверхню, дорівнює:

$$I = P/S = (1,74 \cdot 10^{17} \text{ Вт}/51 \cdot 10^{13} \text{ м}^2) = 342 \text{ Вт/м}^2.$$

### 5.2. Глобальне сонячне випромінювання

Розподіл сонячного випромінювання за інтенсивністю: дві третини у вигляді *прямого* сонячного світла, одна третина у вигляді *дифузно-розсіяного* світла.

Пряме сонячне випромінювання здатне проникати через атмосферу без взаємодії з її компонентами; це є те випромінювання, що вимірюється на земній поверхні перпендикулярно їй за виключенням дифузного випромінювання.

Дифузне випромінювання розсіюється на частинках атмосфери або відбивається від них. Разом пряме та дифузне сонячне випромінювання називається *інсоляцією*. Пряма сонячна інсоляція дорівнює сонячній сталій мінус втрати на поглинання та розсіювання. Сонячна стала залежить від відстані між Сонцем та Землею, сонячних циклів; втрати сонячного випромінювання залежать від часу дня (кут підняття Сонця), хмарного покриву, вмісту вологості та різних забруднювачів.

Глобальне випромінювання Сонця описуються рівнянням:

$$E_{C\downarrow} = E_C \cos\theta + E_{D\downarrow}, \quad (5.1)$$

де  $E_{C\downarrow}$  – сумарна енергетична освітленість сонячним випромінюванням земної поверхні,  $E_C \cos\theta$  – енергетична освітленість земної поверхні прямим сонячним випромінюванням, а  $E_{D\downarrow}$  – дифузним сонячним випромінюванням.

*Енергетична освітленість*  $E_e$  у точці поверхні - відношення потоку випромінювання, що падає на елемент поверхні, до площі цього елемента:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (5.2)$$

*Потік випромінювання*  $\Phi_e$  – потужність, що висилається, переноситься або отримується у вигляді випромінювання.

Одиниця енергетичної освітленості – *ват на квадратний метр* [ $Вт/м^2$ ], потоку випромінювання – *ват* [ $Вт$ ].

Середні значення сумарної енергетичної освітленості та за рахунок дифузного сонячного випромінювання становлять:  $E_{C\downarrow} = 900 \text{ Вт/м}^2$ ;  $E_{D\downarrow} = 200 \text{ Вт/м}^2$  (чисте небо);  $E_{C\downarrow} = 800 \text{ Вт/м}^2$ ;  $E_{D\downarrow} = 350 \text{ Вт/м}^2$  (небо наполовину покрите купчастими хмарами);  $E_{C\downarrow} = E_{D\downarrow} = 300 \text{ Вт/м}^2$  (небо повністю покрите хмарами).

### 5.3. Розподіл сонячного випромінювання

19 % прямого сонячного випромінювання поглинається атмосферою;

20 % відбивається хмарами;

6 % розсіюється атмосферою;

4 % відбивається земною поверхнею;

51 % поглинається земною поверхнею (грунтом та водою).

} Альbedo

Близько 23% (яке відбивається хмарами та розсіюється атмосферою) становить дифузне сонячне випромінювання.

Внаслідок поглинання сонячного випромінювання земною поверхнею це випромінювання з'являється у вигляді прихованої теплоти (23%), відчутної теплоти (7%) та інфрачервоного випромінювання земної поверхні (21%).

Розподіл середнього щорічного сонячного випромінювання по земній поверхні наведено на рис. 4.1.

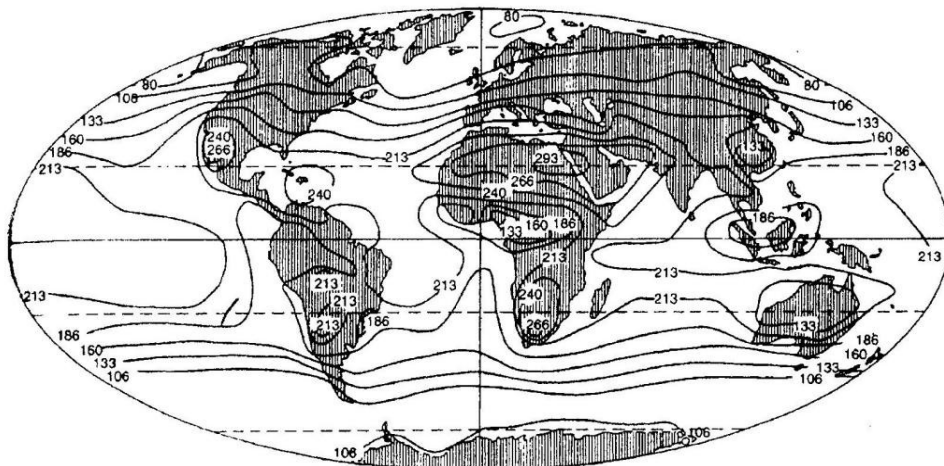


Рис. 5.1 - Розподіл середнього щорічного сонячного випромінювання по земній поверхні ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) [ 27 ]

#### 5.4. Атмосферне випромінювання

На земну поверхню діє довгохвильове випромінювання атмосфери, за яке відповідають у першу чергу такі гази як водні пари, двоокис вуглецю та озон. Ці компоненти поглинають та випромінюють в області: вода – 5–7 мкм, а також на довжинах хвиль, що перевищують 17 мкм; двоокис вуглецю – 4,5 мкм та на довжинах хвиль більших ніж 13,5 мкм; озон – 9,6 мкм. Крім того, атмосферні аерозолі беруть участь у тепловому випромінюванні.

Взагалі, спектр випромінювання атмосфери займає область 5–100 мкм; енергетична світність атмосфери визначається за виразом:

$$M_{A\uparrow} = \sigma T_A^4, \quad (5.3)$$

де  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ ),  $T_A$  – температура уявного абсолютно чорного тіла, яким можна моделювати атмосферу.

*Енергетична світність*  $M_e$  у точці поверхні - відношення потоку випромінювання, що виходить від елемента поверхні, до площі цього елемента:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (5.4)$$

Одиниця енергетичної світності – *ват на квадратний метр* [ $\text{Вт}/\text{м}^2$ ].

На практиці, всі природні тіла можуть бути розглянуті в інтервалі звичайних температур як сірі тіла, що характеризуються випромінювальною здатністю  $\varepsilon$ . Енергетична світність сірого тіла визначається як  $M = \varepsilon\sigma T^4$ .

За рахунок енергетичної світності атмосфери земна поверхня освітлюється; енергетична освітленість земної поверхні дорівнює енергетичній світності атмосфери ( $E_{A\downarrow} = M_{A\uparrow}$ ). Середні значення  $M_{A\uparrow}$  становлять: 170 Вт/м<sup>2</sup> (чисте небо, сухе повітря); 310 Вт/м<sup>2</sup> (чисте небо, вологе повітря); 380 Вт/м<sup>2</sup> (небо наполовину покрите купчастими хмарами); 380 Вт/м<sup>2</sup> (небо повністю покрите хмарами). Слід відмітити, що атмосферне випромінювання спрямоване як до земної поверхні, так і догори.

### 5.5. Випромінювання земної поверхні

За рахунок поглинутого випромінювання земна поверхня стає джерелом власного довгохвильового випромінювання, спрямованого в атмосферу.

Енергетична світність земної поверхні визначається за виразом:

$$M_{3\uparrow} = \varepsilon\sigma T_3^4, \quad (5.5)$$

де  $\varepsilon$  – випромінювальна здатність земної поверхні.

Земна поверхня діє як сіре тіло з температурою 288 К. Спектральна область випромінювання становить 4–50 мкм з максимумом 10 мкм.

Випромінювання земної поверхні майже повністю поглинається атмосферою (зокрема водяною парою, двоокисом вуглецю та озоном), за винятком своєрідних спектральних ділянок – так званих «вікон прозорості», через які випромінювання здатне проходити у космос. Так, для випромінювальної здатності земної поверхні 0,95 та температури 288 К енергетична світність земної поверхні становить  $M_3 = 371$  Вт/м<sup>2</sup>.

### 5.6. Випромінювальний баланс земної поверхні

Сумарне випромінювання визначається обміном коротко- та довгохвильовим випромінюванням на рівні земної поверхні. У сумарній енергетичній освітленості земної поверхні бере участь Сонце ( $E_{C\downarrow}$ ) і атмосфера ( $E_{A\downarrow}$ ). З врахуванням *альbedo* – частки відбитого випромінювання, сумарна енергетична освітленість земної поверхні становить:

$$E_{3\Sigma} = E_{C\downarrow} - a E_{C\downarrow} + E_{A\downarrow} = (1 - a) E_{C\downarrow} + E_{A\downarrow}, \quad (5.6)$$

де  $a$  – альbedo. Значення альbedo  $a$  залежать від типу поверхні (грунт, рослинний покрив, ліс, сніг тощо). Так, наприклад, альbedo лісу, що дорівнює 0,20, відповідає відбиванню 20 % сонячного випромінювання.

Сумарна енергетична світність земної поверхні визначається так:



$$M_{3\Sigma} = \varepsilon\sigma(T_3^4 - T_A^4), \quad (5.7)$$

де  $T_3$  і  $T_A$  – температури земної поверхні та атмосфери відповідно.

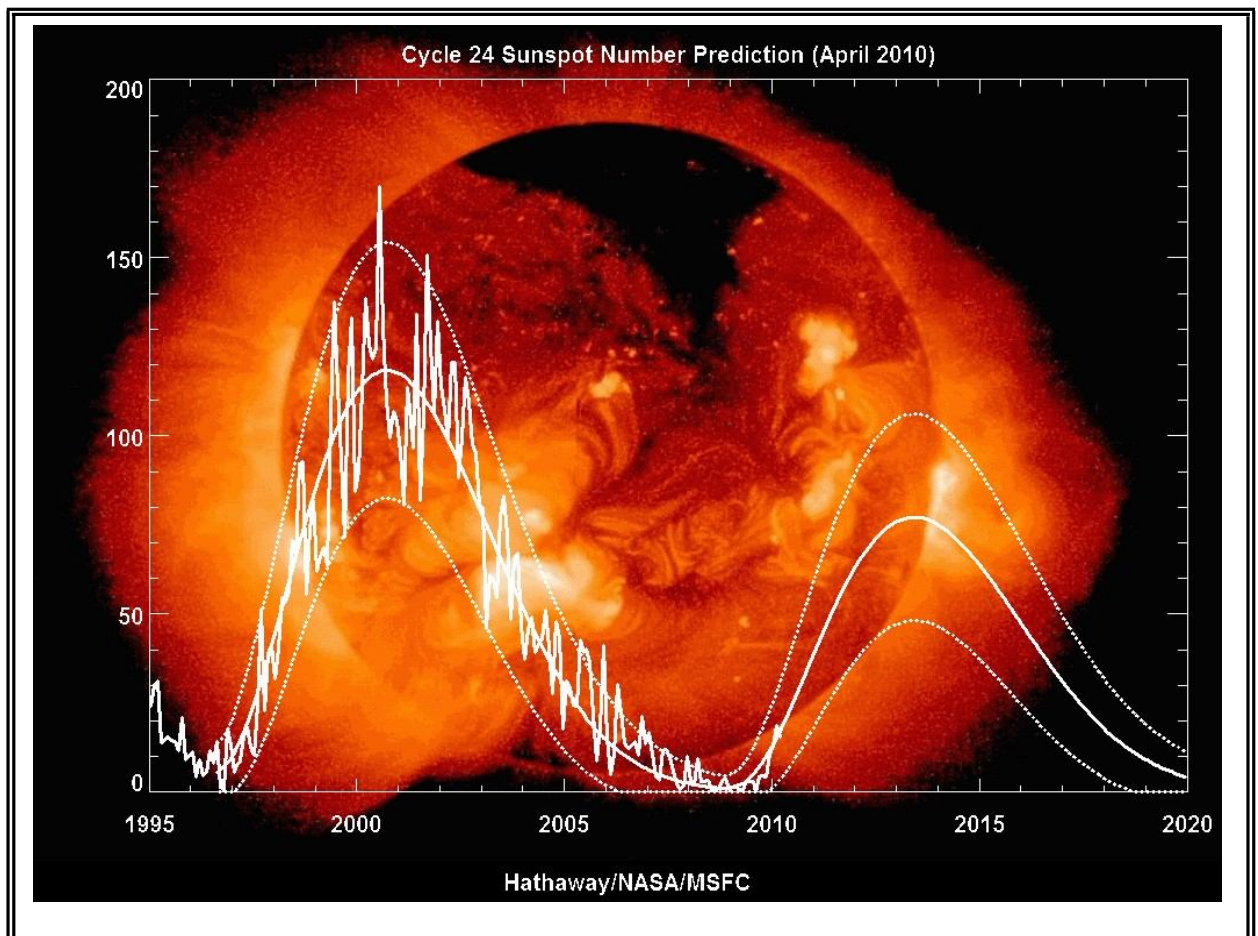
Отже, рівняння випромінювального балансу земної поверхні має вигляд:

$$E_{\Sigma} = (1 - a) E_{C\downarrow} + E_{A\downarrow} - \varepsilon\sigma(T_3^4 - T_A^4). \quad (5.8)$$

Загалом, середня інтенсивність сонячного випромінювання варіює від  $250 \text{ Вт/м}^2$  у субтропічних пустелях до  $80 \text{ Вт/м}^2$  у захмарених субполярних зонах); на інтенсивність сонячного випромінювання впливають пора року, час доби, широта, відстань між Сонцем та Землею, поглинання сонячного випромінювання земною атмосферою.

В середніх широтах значення інтенсивності сонячного випромінювання, усереднені за 24 години, становлять  $130\text{-}160 \text{ Вт/м}^2$ .

В Україні середня інтенсивність сонячного випромінювання варіює від  $185\text{-}215 \text{ Вт/м}^2$  (Крим) до  $115\text{-}145 \text{ Вт/м}^2$  (Полісся).



## 6. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ПРИРОДНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

### 6.1. Класифікація методів вимірювання сонячного випромінювання

В залежності від спектральної чутливості вимірювальних приладів відрізняють фотометри, радіометри та прилади для вимірювання фотосинтетично активного випромінювання (ФАВ).

Фотометри вимірюють освітленість в *лк* (люксах), радіометри – енергетичну освітленість в  $Вт/м^2$ , прилади для вимірювання ФАВ – густину потоку фотосинтетичних фотонів (ГПФФ), яка має одиницю вимірювання  $мкЕ \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$  або  $мкмоль \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$ .

Фотометри (люксметри) – це прилади, які мають максимальну чутливість в середині видимої області спектра, де людське око найбільш чутливе (рис. 6.1).

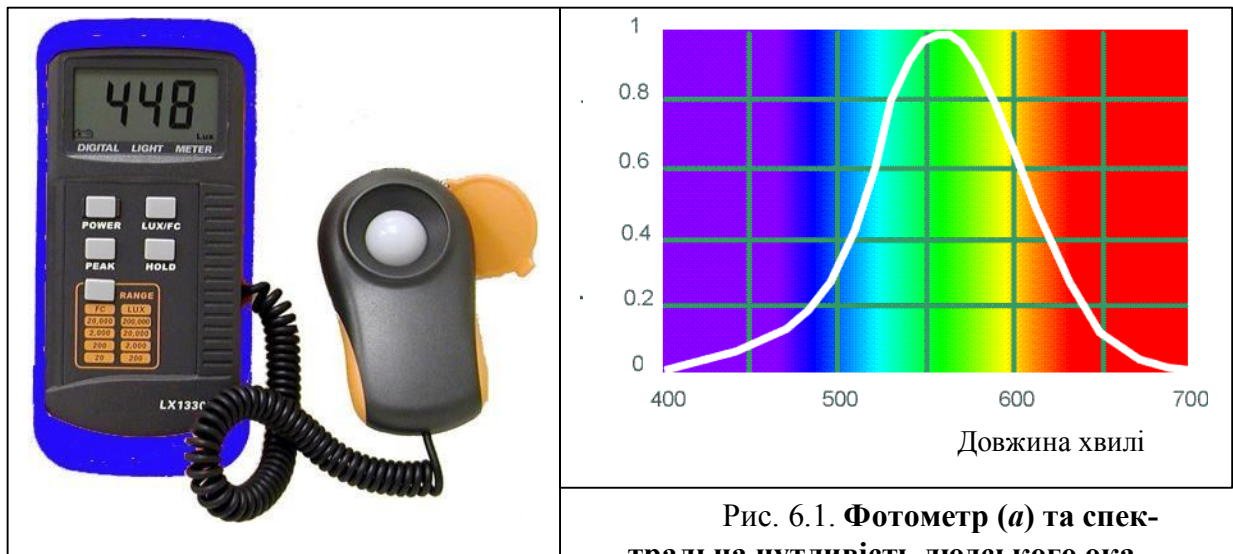


Рис. 6.1. Фотометр (а) та спектральна чутливість людського ока (б)

Радіометри призначені для вимірювання випромінювальної енергії в термінах абсолютної потужності. До їх складу відносяться термопари, термобатарей, термістори – пристрої, здатні поглинати випромінювання на всіх довжинах хвиль. Ультрафіолетові радіометри чутливі в області 220–480 нм.

Прилади для вимірювання ФАВ чутливі в області 400–700 нм, де поглинають важливі фотосинтетичні пігменти.

Спектральну чутливість цих приладів наведено на рис. 6.2.

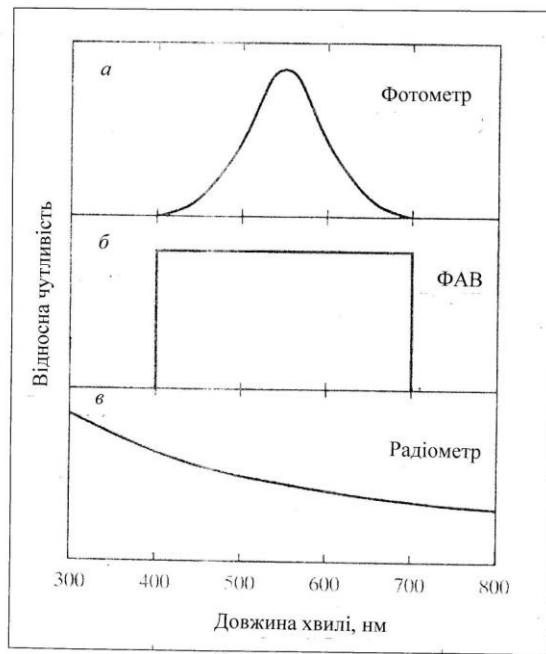


Рис. 6.2. Спектральна чутливість приладів для вимірювання сонячного випромінювання

### 6.2. Вимірювання прямого сонячного випромінювання

Для вимірювання прямого сонячного випромінювання використовують *піргеліометр*, поверхня детектора якого орієнтована перпендикулярно до потоку випромінювання. Прилад складається з металевого циліндра, на дні якого розташований детектор, системи діафрагм для попадання на детектор лише прямого сонячного випромінювання та металевих заслінок (рис. 6.3).

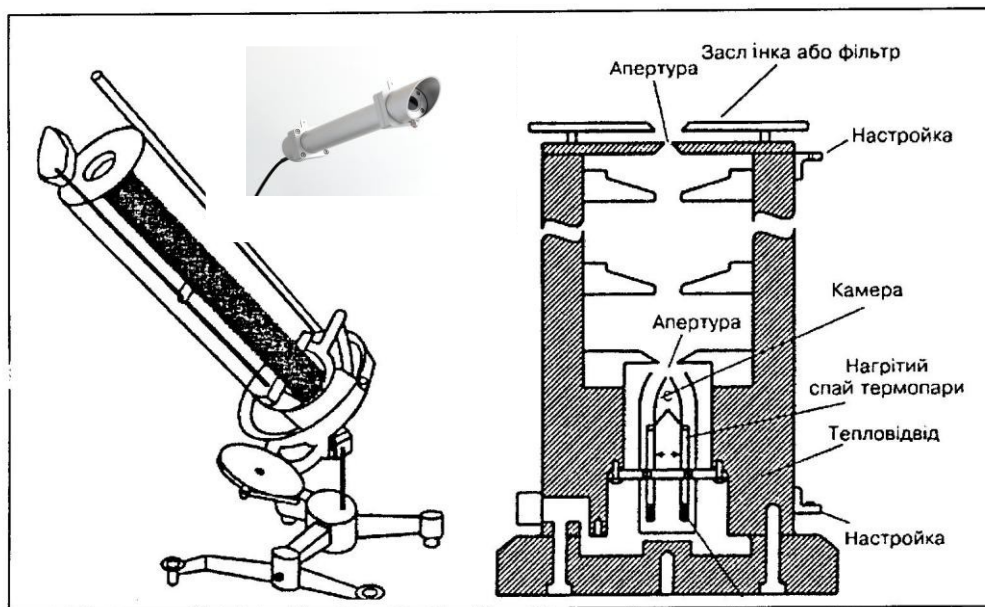


Рис. 6.3. Загальний вигляд та конструкція піргеліометра



Конструкції приладів передбачають застосування термопар або термобатарей як детекторів; схему такого піргеліометра наведено на рис. 6.3. Точність цих приладів становить  $\pm(0,4-0,5)\%$ , що обумовлює їх застосування як піргеліометрів першого або другого класів.

### 6.3. Вимірювання дифузного випромінювання

Прилад для вимірювання дифузного випромінювання обладнаний вузькою кільцеподібною стрічкою, яка затінює детектор від прямого сонячного випромінювання. Однак, ця стрічка повинна бути достатньо вузькою, щоб не заважати реєстрації дифузного випромінювання. Кільцеподібна стрічка приєднана до електродвигуна для того, щоб слідкувати за рухом Сонця (рис. 6.4). Перед вимірюванням прилад орієнтують за полюсом Землі. Модифікації приладу дають можливість одночасно вимірювати пряме, дифузне та глобальне сонячне випромінювання.



Рис. 6.4 . Радиометр, обладнаний кільцеподібною стрічкою, для вимірювання дифузного сонячного випромінювання

### 6.4. Вимірювання глобального випромінювання

Для вимірювання сонячного випромінювання, що потрапляє на горизонтальну поверхню з цілої півсфери (кут зору  $2\pi$  ср) використовують *піранометри*. Термін «піранометр» походить від грецьких слів  $\pi\tilde{\upsilon}\rho+\acute{\alpha}\nu\omega+\mu\acute{\epsilon}\tau\rho\upsilon\upsilon$  – вогонь+нагорі+міра. Піранометр містить зіркоподібний детектор (рис. 6.5), чутливими елементами якого є зафарбовані у чорний та білий колір термопари.

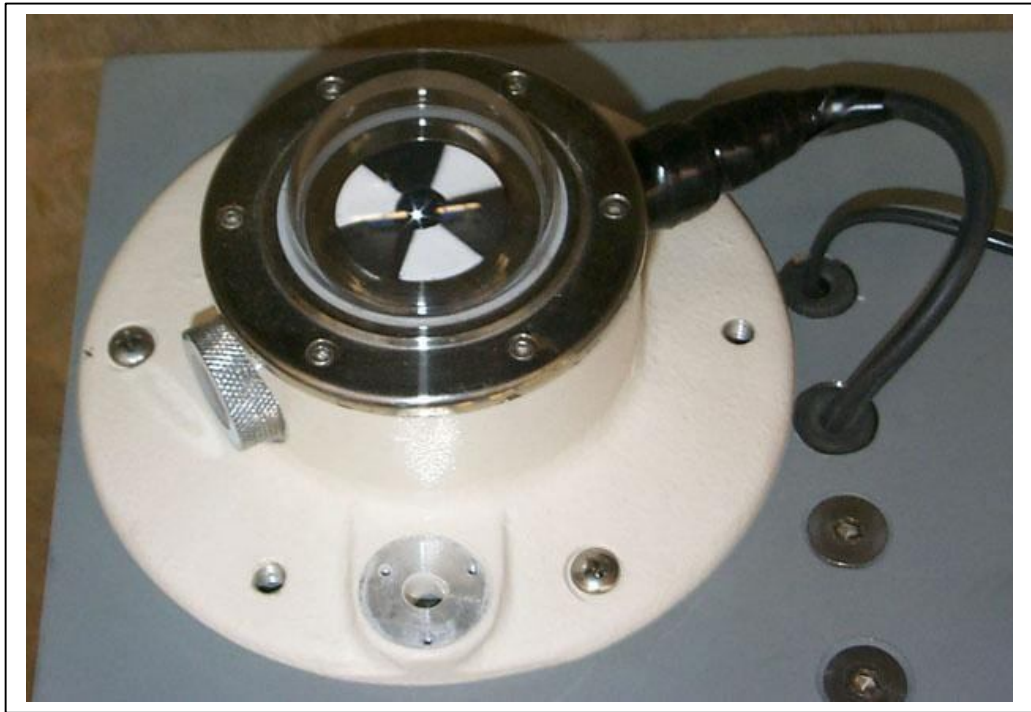


Рис. 6.5. Піранометр з чорно-білим детектором

Зовнішній вигляд піранометра наведено на рис. 6.6, а його будова – на рис. 6.7. Чорні поверхні поглинають сонячне випромінювання інтенсивніше, ніж білі поверхні. Контроль теплообміну між чорними та білими секторами детектора дає можливість оцінити сонячне випромінювання.

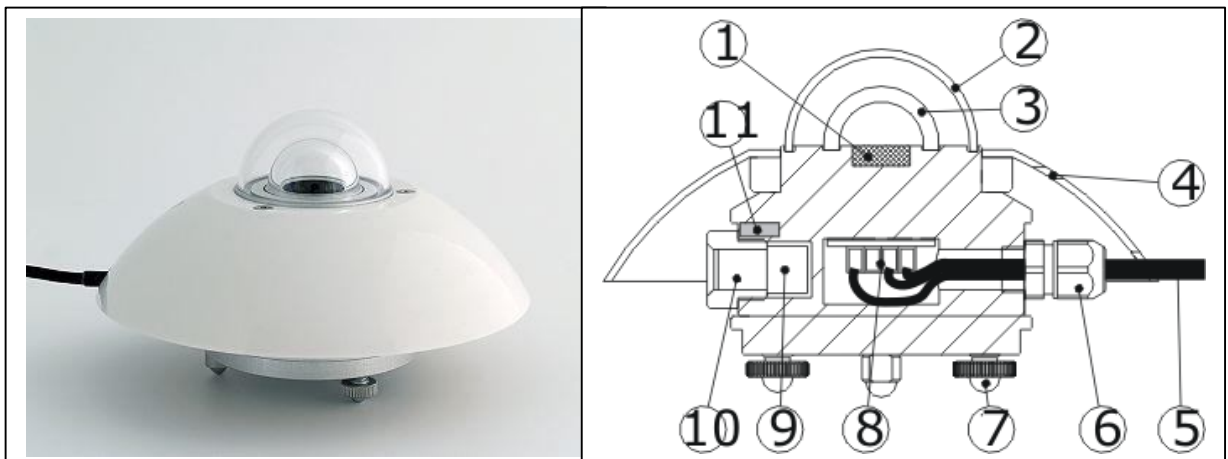


Рис. 6.6. Загальний вигляд піранометра

Рис. 6.7. Будова піранометра: 1 – сенсор; 2,3 – скляні оболонки; 4 – сонцезахисний екран; 5-6 –електричний кабель; 7 – гвинти регулювання; 8 – обезводнювач; 9,10 – система контролю рівноваги

Залежно від чутливості піранометри поділяють на класи: перший

( $\pm 0,1 \%$ ); другий ( $\pm 0,5 \%$ ) та третій ( $\pm 1,0 \%$ ). Слід зазначити, що величина електрорушійної сили, індукованої сонячним випромінюванням на кінцях термопар, досягає 10 мВ. Для вимірювання таких величин потрібні чутливі інструменти – такі як електронні потенціометри. Крім того, піранометри слід встановлювати на відкритих місцях або платформах.

Перевагою термоелектричних приймачів є їх здатність давати відліки у будь-якій ділянці спектра з постійною чутливістю. Прилади характеризуються високою лінійністю і дають відлік у абсолютних одиницях.

До недоліків належать невисока чутливість і велика інерційність. Прилади вимагають також частого контролю чистоти поверхні півсфер та якості осушувальної рідини між ними.

### **6.5. Вимірювання довгохвильового випромінювання**

Вимірювання довгохвильового випромінювання атмосфери та земної поверхні здійснюється за допомогою *піргеометра*, який являє собою піранометр, у якому скляні півсфери замінені на купол, що виконує функції інфрачервоного фільтра (рис. 6.8). Спектральна область пропускання цього фільтра становить 0,3–100 мкм. Звичайно використовують поліетиленову плівку або інтерференційні фільтри. Крім того, термопари приладу не фарбують. Чутливість приладу дорівнює  $\pm 10 \%$ .



Рис. 6.8. Піргеометр

### **6.6. Вимірювання сумарного випромінювання**

Для вимірювання сумарного випромінювання (коротко- та довгохвильового), що проходить крізь горизонтальну площину, використовують *піррадіометри*. Піррадіометр надає можливість визначити сумарний загальний потік випромінювання (сонячного, земної поверхні та атмосфери), який проходить через горизонтальну поверхню. Загальний вигляд пірраді-

ометра наведено на рис. 6.9. Піррадіометр працює у діапазоні довжин хвиль 0,3 – 3,0 мкм.



Рис. 6.9. Загальний вигляд піррадіометра

### **6.7. Вимірювання альbedo**

*Альbedo* є часткою сумарного випромінювання, що відбивається природною поверхнею. Для вимірювання альbedo необхідно два піранометри – один спрямований догори і вимірює сумарне випромінювання, тоді як інший спрямований до земної поверхні для вимірювання відбитого випромінювання. Внаслідок вимірювань визначають відношення відбитого до сумарного випромінювання, тобто альbedo. Конструктивно альбедометр не відрізняється від піррадіометра; різниця полягає у функціях приладів: піррадіометр визначає сумарний потік, тоді як альбедометр – відношення потоків.

### **6.8. Вимірювання енергетичного балансу**

Для вимірювання енергетичного балансу між вхідним короткохвильовим та довгохвильовим випромінюванням відносно відбитого від поверхні короткохвильового та вихідного довгохвильового випромінювання застосовують чотириелементний сумарний радіометр, який складається з двох пар піранометрів та піргеометрів, спрямованих у протилежні сторони. Принцип дії чотирикомпонентного радіометра пояснюється на рис. 6.10, а загальний вигляд приладу наведено на рис. 6.11.

Короткохвильове сонячне випромінювання вимірюється двома піранометрами. Один з них, призначений для вимірювання вхідного випромінювання, спрямований догори, а другий, що застосовується для вимірювання відбитого від земної поверхні випромінювання, спрямований донизу. Цю пару піранометрів використовують для оцінювання альbedo.

Довгохвильове випромінювання вимірюється двома піргеометрами, один з яких призначений для вимірювання інфрачервоного випромінювання атмосфери, а другий – для інфрачервоного випромінювання земної поверхні.

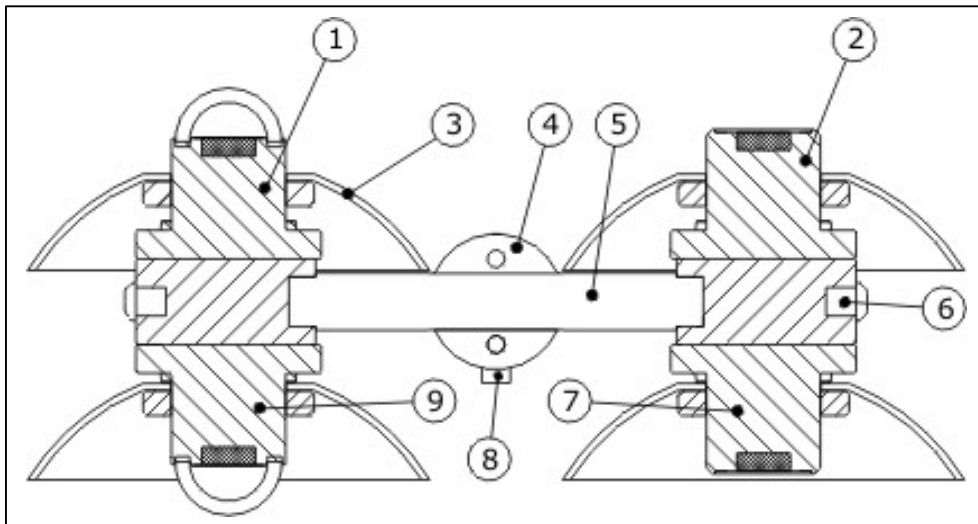


Рис. 6.10. **Схема чотирикомпонентного радіометра:** 1 - піранометр (короткохвильовий сенсор); 2 – піргеометр (довгохвильовий сенсор); 3 – радіаційний екран; 4,5 - система контролю та регулювання рівня у горизонтальній площині; 6 – температурний сенсор; 7 – піргеометр (довгохвильовий сенсор); 8 – система контролю та регулювання рівня у вертикальній площині; 9 – піранометр (короткохвильовий сенсор)



Рис. 6.11. **Чотирикомпонентний радіометр, що складається з двох пар піранометрів (з сферичними вікнами) та піргеометрів (з плоскими вікнами)**

Прилад може вимірювати або кожну компоненту випромінювання окремо, або сумарне випромінювання.

## 6.9. Спеціалізовані оцінки випромінювання

У біології розгляд деяких специфічних фотохімічних процесів, таких як фотосинтез, внаслідок якого відбувається перетворення світлової енергії у хімічну, або транспірація, що супроводжується втратою водяної пари рослиною, оптичне випромінювання видимої області спектра (400-700 нм) відіграє основну роль. Випромінювання цієї області спектра називається *фотосинтетично активним випромінюванням (ФАВ)*. Для оцінювання цього випромінювання вимірюють повну кількість фотонів, отриманих чи поглинутих у певній спектральній області, або загальну енергію випромінювання.

Кількість отриманих фотонів вимірюється в *ейнштейнах* (символ  $E$ ). Енергія одного моля фотонів дорівнює:

$$1 \text{ ейнштейн} = 1 E = N_A h\nu = 1 \text{ моль фотонів} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ фотонів}, \quad (6.1)$$

де  $N_A$  – число Авогадро ( $6,023 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>);  $h\nu$  – енергія одного фотона.

Для оцінювання співвідношення оптичного випромінювання з фотосинтетичною активністю рослин використовують *густину потоку фотосинтетичних фотонів (ГПФФ)*, яка має одиницю вимірювання  $\text{мкЕ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  або  $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Таким чином,  $1 \text{ мкЕ} = 1 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  відповідає  $6,022 \cdot 10^{17}$  фотонів, що падають на площу  $1 \text{ м}^2$  за  $1$  секунду.

Співвідношення між одиницями оптичного випромінювання можна знайти на сайті: <http://www.fb.u-tokai.ac.jp/WWW/hoshi/env/light.html>

Item	PRFD	PPFD	Illuminance
Unit	$\text{Wm}^{-2}$	$\text{umol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	lx

У табл.6.1 наведено співвідношення між одиницями оптичного випромінювання, що вимірюється у природних умовах.

6.1. Співвідношення між  $\text{мкЕ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  та  $\text{Вт}/\text{м}^2$

$E, \text{мкЕ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$E, \text{Вт}/\text{м}^2$	$E, \text{лк}$
10000	2500	595238
5000	1250	297619
3000	750	178571
2500	625	148809
2000	500	119047
1500	375	89285
1000	250	59523
500	125	29761



Квантовий сенсор для вимірювання фотосинтетичного випромінювання складається з кремнієвого фотодіода, набору кольорових скляних фільтрів та інтерференційного фільтра. За допомогою цих фільтрів формується крива спектральної чутливості сенсора, яка нагадує типовий спектральний відгук рослин (рис. 6.12). Загальний вигляд квантового сенсора наведено на рис. 6.13.

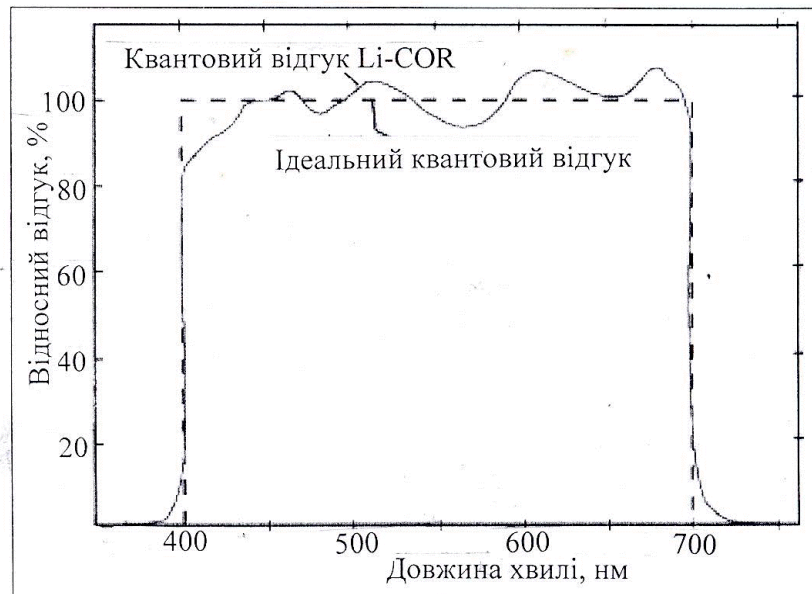


Рис. 6.12. Крива спектральної чутливості квантового сенсора



Рис. 6.13. Загальний вигляд квантового сенсора

### Контрольні запитання та завдання

1. Як вимірюється сонячна стала?
2. Що таке інсоляція?
3. Дати визначення енергетичній освітленості. У яких одиницях вона вимірюється?
4. Від чого залежать енергетична світність атмосфери та енергетична світність земної поверхні?
5. Записати та проаналізувати рівняння випромінювального балансу земної поверхні.
6. Для чого призначений піргеліометр?
7. Пояснити принцип дії приладу для вимірювання дифузного випромінювання.
8. Чим відрізняється піранометр від піргеометра?
9. За допомогою яких приладів вимірюють короткохвильове випромінювання? довгохвильове випромінювання?
10. Що таке фотосинтетично активне випромінювання?
11. Для чого використовують густину потоку фотосинтетичних фотонів? У яких одиницях вона вимірюється?

### СЕМІНАР

#### Ультрафіолетове випромінювання

Спектральний склад ультрафіолетового випромінювання. Зміни ультрафіолетового випромінювання, що досягає земної поверхні. Вплив ультрафіолетового випромінювання на здоров'я людини, рослинні організми, водні екосистеми, біогеохімічний цикл, якість повітря.





## 7. ТЕМПЕРАТУРНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА

### 7.1. Температура атмосфери

*Тепловим режимом* атмосфери називають характер розподілу та зміни температури в атмосфері. Перенесення тепла між поверхнею Землі та атмосферою відбувається за рахунок таких шляхів тепловіддачі як теплова конвекція, турбулентність, молекулярна теплопровідність та тепло-випромінювання.

Найважливішими є турбулентність і теплова конвекція. Суттєво впливає на розподіл температури приземного шару повітря рослинний покрив.

За характером зміни температури з висотою атмосферу поділяють на *тропосферу* (220 К), *стратосферу* (260 К), *мезосферу* (180 К), *термосферу* та *екзосферу* (2000 К). Розподіл температури атмосфери з висотою наведено на рис. 7.1.

Термін *тропосфера* походить від грецького слова *tropos*, що означає «змінювати». У цьому шарі, що займає висоту близько 10 км, відбувається вертикальне перемішування повітря завдяки нагріванню земної поверхні короткохвильовим сонячним випромінюванням.

Молекули двоокису вуглецю  $CO_2$ , метану  $CH_4$ , закису азоту  $N_2O$  та інших поглинають довгохвильове випромінювання земної поверхні та нагріваються.

У тропосфері температура зменшується з висотою через переміщення повітря в горизонтальному напрямку.

*Стратосфера* займає область 10–50 км. Ультрафіолетова компонента сонячного випромінювання здатна розщепити молекулу кисню  $O_2$  на синглетний кисень  $O$ , що взаємодіє з  $O_2$  та утворює  $O_3$ . Температура стратосфери збільшується з висотою. У температурному режимі стратосфери відіграє роль озон  $O_3$ , який поглинає короткохвильове сонячне випромінювання, що викликає нагрівання стратосфери. Озоновий шар займає область висот 10–50 км з максимумом на висоті 20–25 км. Температура стратосфери залежить від густини озону – де вона більша, температура вища.

У *мезосфері* (від грецького *mesos* – середній), що займає область висот 50–85 км, температура зменшується з висотою, оскільки тут відбува-

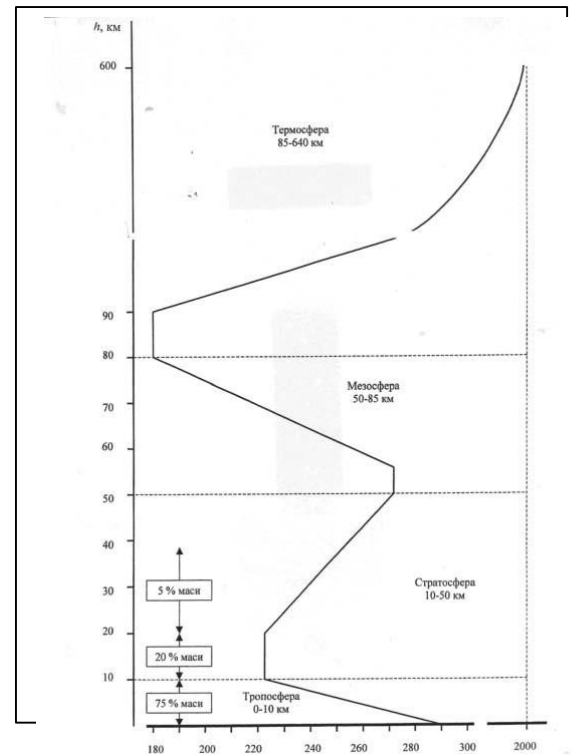


Рис. 7.1. Розподіл температури атмосфери з висотою

ється значне перемішування повітря завдяки вітру, швидкість якого досягає 150 м/с.

У *термосфері* (від грецького *thermos* – тепло), в області 85– 640 км та *екзосфері* (від грецького *exo* – зовні), в області 500– 1000 км температура зростає з висотою за рахунок високої кінетичної енергії молекул газів, що обумовлена поглинанням високоенергетичного сонячного випромінювання залишками кисню. Температура частинок термосфери може досягати 2000 °С, хоча там існує велика розрідженість повітря. Ультрафіолетове сонячне випромінювання викликає іонізацію молекул (іоносфера). Висока енергія частинок дає можливість покидати атмосферу.

## 7.2. Температура ґрунту

Температура ґрунту залежить від таких факторів як теплообмін з повітрям (теплопровідність і конвекція); тепловипромінювання; теплопровідність у ґрунті; хімічні і фізичні процеси, такі як випаровування, зволоження, конденсація.

Нагрівання та охолодження ґрунту залежить від його теплоємності і теплопровідності.

*Теплоємність тіла C* – величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно надавати даному тілу для нагрівання на 1 К:

$$C = Q/\Delta T, \quad (7.1)$$

де  $Q$  –кількість теплоти, передана тілу для нагрівання на  $\Delta T$  градусів.

Одиниця вимірювання теплоємності – $\text{Дж}\cdot\text{К}^{-1}$ .

*Питома теплоємність речовини c* – величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно надати даній речовині масою 1 кг для нагрівання на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}. \quad (7.2)$$

Одиниця вимірювання питомої теплоємності – $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ .

Теплоємність залежить від пористості і вологості ґрунту. Значення питомих теплоємностей повітря, води, ґрунту та основних компонентів ґрунту наведено в табл. 7.1.

### 7.1. Питомі теплоємності деяких компонентів

Компонент	Питома теплоємність, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Повітря	$1,05 \cdot 10^3$
Вода	$4,18 \cdot 10^3$
Лід	$2,09 \cdot 10^3$
Ґрунт сухий	$0,8 \cdot 10^3$
Ґрунт вологий	$1,48 \cdot 10^3$
Гумус	$1,67 \cdot 10^3$
Глина	$0,92 \cdot 10^3$
Кварц	$0,80 \cdot 10^3$
Слюда	$0,88 \cdot 10^3$
Граніт	$0,80 \cdot 10^3$
$\text{CaCO}_3$	$0,84 \cdot 10^3$
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$0,63 \cdot 10^3$
Крейда	$0,88 \cdot 10^3$

*Теплопровідність* – перенесення тепла від більш нагрітих тіл до менш нагрітих, що призводить до вирівнювання температури.

*Закон Фур'є:* кількість перенесеного шляхом теплопровідності тепла прямо пропорційна градієнту температури

$$\Delta Q = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot \Delta t, \quad (7.3)$$

де  $\Delta Q$  – кількість теплоти, що переноситься;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ );  $S$  – площа;  $\frac{\Delta T}{\Delta x}$  – градієнт температури;  $\Delta t$  – проміжок часу.

Значення коефіцієнта теплопровідності повітря, води, ґрунту та ґрунтових матеріалів наведено в табл. 7.2.

### 7.2. Значення коефіцієнта теплопровідності для ґрунтових матеріалів

Компонент	Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Повітря	0,021
Вода	0,544–0,586
Сухий ґрунт	0,125–0,209
Вологий ґрунт	0,836–1,674
Ґрунтові мінерали	1,255–12,5
Кварц	8,4–8,8
Граніт	4,2
Органічна речовина	0,25
Глина волога	2,1
Пісок сухий	1,0
Торф	0,84

Розглянемо фактори навколишнього середовища, які впливають на кількість енергії, яку отримує ґрунт і, отже, на його температуру.

*Сонячне випромінювання.* Потік випромінювання, що досягає земної поверхні, залежить від кута падіння сонячного випромінювання та від сумарної інтенсивності прямого та дифузного випромінювання. Кут падіння сонячного випромінювання залежить від широти місцевості, пори року, часу доби, кута і напрямку поверхневого схилу, висоти розташування поверхні. Так, у Північній півсфері південно-східні схили тепліші на початку літа, південні схили – у середині літа, південно-західні – восени. Відповідно, схили, що орієнтовані на захід, нагріваються сильніше, ніж ті, що орієнтовані на схід.

Земна поверхня відокремлюється від Сонця повітрям, водяною паром, пилом, смогом, опадами, рослинними покривами. В зонах помірного клімату земна поверхня одержує від 4,18 до 31,4 МДж/м<sup>2</sup> сонячної енергії.

*Атмосферне випромінювання.* Сонячне випромінювання, що відбивається хмарами (20 %) та розсіюється атмосферою (6 %), робить суттєвий внесок у нагрівання земної поверхні

*Конвекційні потоки.* Теплопровідність повітря незначна (табл. 7.2). Суттєвим цей процес перенесення теплоти може бути лише упродовж прямого контакту повітря з земною поверхнею. Охолодження чи нагрівання цієї поверхні здійснюється завдяки конвекційним потокам (вітру).

*Конденсація.* Перехід газу або насиченої пари в рідину внаслідок адіабатичного охолодження або стиснення – це є екзотермічний процес, який супроводжується виділенням теплоти. Під час конденсації водяної пари в атмосфері виділяється та ж сама кількість теплоти, що була витрачена на випаровування; отже земна поверхня нагрівається.

*Випаровування.* Цей процес є ендотермічним, що проходить з поглинанням теплоти та охолодженням земної поверхні. Енергія перетворення води у пару залежить від температури та становить  $2,45 \cdot 10^6$  Дж/кг при 20 °С та  $2,26 \cdot 10^6$  Дж/кг при 100 °С.

*Рослинні покриви.* Такі процеси, що відбуваються в рослинному організмі, як фотосинтез, транспірація, відбивання сонячного випромінювання призводять до зменшення температури мікроклімату рослини і, отже, ґрунту.

*Розподіл температури ґрунту з глибиною і часом.* На рис.7.2 наведено типові криві залежності температури ґрунту від часу та глибини. Видно, що максимальні зміни температури відбуваються на поверхні ґрунту, тоді як з глибиною амплітуда змін зменшується і набуває певний часовий зсув: якщо максимальна температура земної поверхні досягає близько 14 год, то з глибиною цей максимум “запізнюється” на 4 год для  $z = 12$  см і 7 год для  $z = 24$  см.

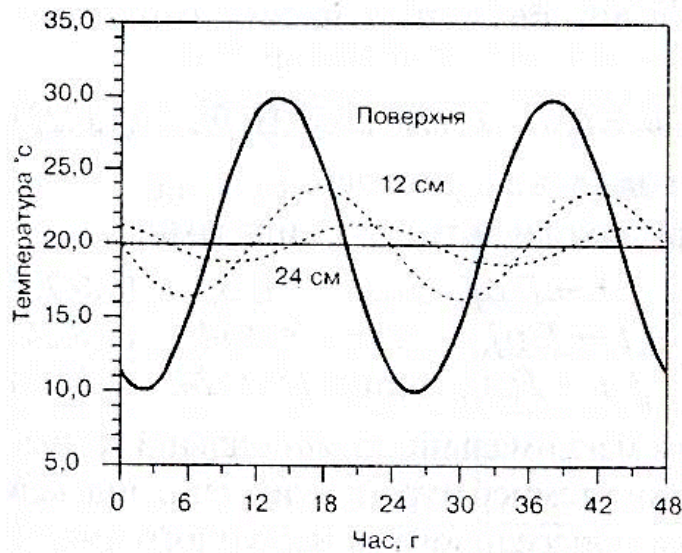


Рис. 7.2. Типові криві залежності температури ґрунту від часу і глибини

Розглянемо рівняння, що описує зміну температури в ґрунті, якщо відома температура поверхні. Ця модель передбачає, що властивості ґрунту однорідні за глибиною; крім того, враховується синусоїдний характер зміни температури з часом. З такими припущеннями рівняння, що моделює залежність температури ґрунту від глибини  $z$  і часу  $t$ , має вигляд:

$$T(z,t) = \langle T \rangle + A(0)\exp(-z/D)\sin[\omega(t-\delta) - z/D], \quad (7.4)$$

де  $\langle T \rangle$  – середня температура ґрунтової поверхні,  $A(0)$  – амплітуда зміни температури на поверхні,  $D$  – глибина загасання ( $D = 0,1$  м для вологого ґрунту і  $D = 0,03-0,06$  м для сухого ґрунту).

У багатьох випадках потрібно знати діапазон коливань температури на певній глибині. З врахуванням того, що функція синуса змінюється від  $-1$  до  $+1$ , останнє рівняння можна переписати так:

$$T(z,t) = \langle T \rangle \pm A(0)\exp(-z/D), \quad (7.5)$$

де знак “+” відповідає максимальній, а знак “-” – мінімальній температурі.

Щорічна зміна температури ґрунту з глибиною подібна за характером добовій зміні, за винятком іншої частоти ( $\omega = 2\pi/365$ ) за умову, що  $D$  становить близько 2 м.

Питома теплоємність (табл.7.1) та теплопровідність ґрунтів (табл.7.2) впливають на характер розподілу температури в ґрунті та в приповерхневому шарі повітря (рис. 7.3).

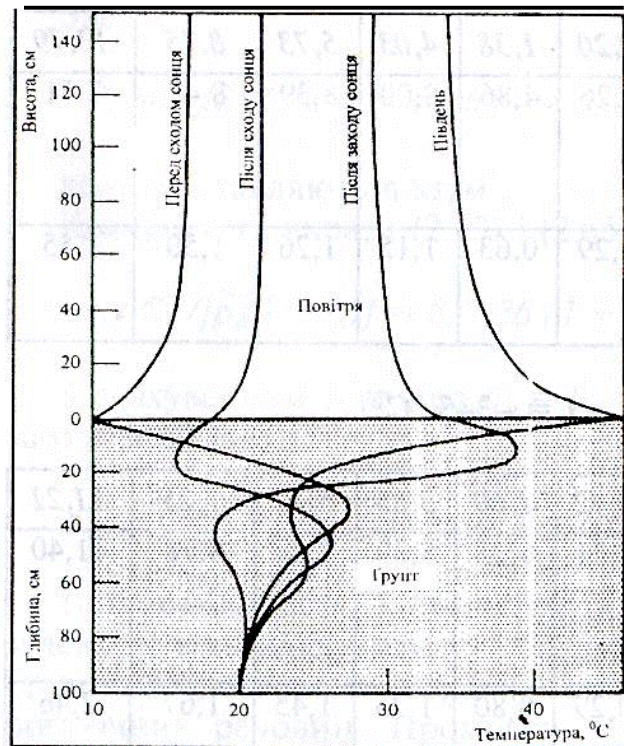


Рис. 7.3. Температурний профіль повітря і ґрунту поблизу ґрунтової поверхні протягом доби

### Приклад

На якій глибині температура вологого ґрунту не відрізняється на  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  від середньої щодобової температури земної поверхні, якщо амплітуда зміни температури на поверхні становить  $\pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

### Розв'язання

Перепишемо рівняння ( 7.4 ) у вигляді:

$$\frac{z}{D} = - \ln \frac{T(z) - \langle T \rangle}{A(0)}$$

Підставляємо числові дані:

$$\frac{z}{D} = - \ln \frac{0,5}{15} = 3,4.$$

Визначимо  $z$  для  $D = 0,1 \text{ м}$ :

$$z = 3,4D = 3,4 \cdot 0,1 = 0,41 \text{ м}.$$

### Контрольне завдання

Побудувати графік залежності коливань температури ґрунту від глибини (до 30 см), якщо максимальна і мінімальна температури на поверхні становлять  $T_{max} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $T_{min} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , а коефіцієнт загасання  $D = 0,1 \text{ м}$ .

*Визначення глибини загасання.* Рівняння (7.5) і (7.6) використовують для опису зміни температури ґрунту з глибиною. З врахуванням того, що під час вимірювання температура ґрунту не змінюється за синусоїдним законом, можна оцінити глибину загасання  $D$ . Розв'яжемо рівняння (7.6) відносно  $T(z, t) - \langle T \rangle$  для двох різних глибин  $z_1$  і  $z_2$ :

$$\left. \begin{aligned} T(z_1) &= \langle T \rangle \pm A(0)\exp(-z_1/D); \\ T(z_2) &= \langle T \rangle \pm A(0)\exp(-z_2/D); \end{aligned} \right\} \quad (7.6)$$

Припускаючи, що амплітуда зміни температури на відповідних глибинах становить

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= T(z_1) - \langle T \rangle; \\ A_2 &= T(z_2) - \langle T \rangle; \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

можна отримати вирази:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= A(0)\exp(-z_1/D); \\ A_2 &= A(0)\exp(-z_2/D). \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

Звідси, виключивши  $A(0)$ , знайдемо глибину загасання:

$$D = \frac{z_1 - z_2}{\ln A_1 - \ln A_2}. \quad (7.9)$$

### 7.3. Температура водойм

Вода характеризується унікальними теплофізичними властивостями, а саме:

1. Температура замерзання води становить 273,16 К (0 °С), а температура кипіння 373,16 К (100 °С).

2. Вода має надзвичайно високу теплоту випаровування ( $2,26 \cdot 10^6$  Дж/кг). Це означає, що молекули води поглинають велику кількість теплоти під час випаровування завдяки дії сонячного випромінювання та звільняють також велику кількість теплоти внаслідок конденсації та опадів на земну поверхню. Кожен день сонце примушує покидати біля 1230 км<sup>3</sup> води через випаровування з поверхні морів, озер, річок і ґрунту, а також транспірацію (дихання) рослин. Нагрівання сонячним випромінюванням водойм та водяної пари атмосфери призводить до зміни погодних і кліматичних умов.

3. Зміна температури у водоймах відбувається не так, як у ґрунті. Вода має надзвичайно високу теплоємність (4186 Дж/кг·К), яка в 3–4 рази вище теплоємності ґрунту. Через те, що вода повинна отримати більше тепла, ніж ґрунт для однакового нагрівання, вона дуже повільно нагрівається і охолоджується; отже, великі водні масиви позбавлені впливу швидких змін температури, що обумовлює підтримку помірного клімату на Землі.

Крім того, температурний режим водойми визначається сонячним випромінюванням, яке проникає в глибину і нагріває воду. Впливає на зміну температури та турбулентність, завдяки чому інтенсивність теплоперенесення значно зростає. В цілому, у водному середовищі через високу теплоємність не відбуваються різкі зміни температури; температурні умови тут стабільніші, ніж на суші.

4. Здатність води проводити тепло характеризується коефіцієнтом теплопровідності, який дорівнює  $0,599 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$  при  $20^\circ\text{C}$  і перевищує коефіцієнт теплопровідності повітря ( $0,0257 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$  при  $20^\circ\text{C}$ ). Завдяки цьому між сухим ґрунтом (коефіцієнт теплопровідності якого дорівнює  $0,125\text{--}0,209 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$  при  $20^\circ\text{C}$ ) та вологим повітрям атмосфери утворюється теплоізоляційний шар сухого повітря, який сприяє виникненню парникового ефекту.

5. Специфічною рисою води як середовища є безперервний рух частинок води і турбулентне їх перемішування. Завдяки цьому відбувається передача теплоти у глибокі шари.

У річках з повільною течією та озерах влітку поверхневі води нагріваються скоріше, ніж глибинні шари. Теплові випромінювання поглинаються шаром води завтовшки  $1\text{--}2 \text{ м}$ . Цей верхній теплий шар називається *епілімніоном*, тоді як холодний нижній – *гіполімніоном*. Між ними розташований проміжний шар *металімніон*, в якому температура змінюється дуже швидко при невеликих змінах глибини. Наявність таких шарів призводить до утворення температурного градієнта.

Озера мають характерну температурну стратифікацію, яка залежить від пори року (рис. 7.4). Взимку поверхневий лід має температуру  $0^\circ\text{C}$ , тоді як під ним вода має температуру  $3,94^\circ\text{C}$  (густина води при цьому максимальна).

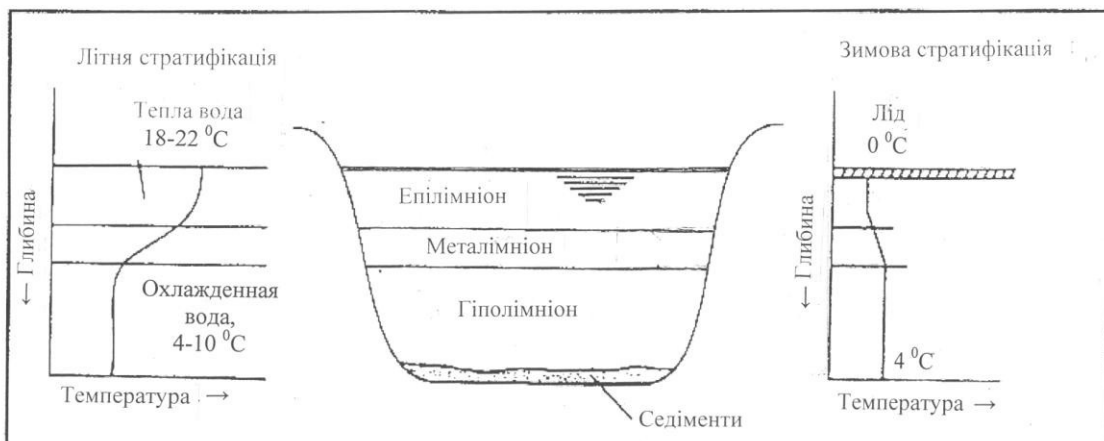


Рис. 7.4. Теплова стратифікація за глибиною озера влітку і зимою



Низька температура і зменшення проникності сонячного випромінювання призводить до пригнічення біологічної продуктивності озера. Влітку поверхнева вода нагрівається швидко і в верхніх шарах відбувається постійне перемішування води, що сприяє росту фітопланктону. Таким чином, продуктивність озер залежить від теплової стратифікації.

#### 7.4. Географічний розподіл температури.

Основним джерелом енергії на земній кулі є сонячне випромінювання; отже, географічний розподіл сонячного випромінювання визначає відповідний розподіл температури повітря. Зональний характер сонячного випромінювання зумовлює зменшення середньорічної температури повітря від екватора до полюсів.

Можна виділити п'ять теплових поясів – жаркий, два помірних та два холодних, границями між якими є *ізотерми* – лінії на географічній карті, які з'єднують точки з однаковим значенням температури.

На розподіл температури впливає неоднаковість нагрівання суходолу та водної поверхні, віддаленість даної території від океану, переміщення повітряних мас, морські течії, рельєф місцевості, хмарність та альbedo. Типовий світовий розподіл температури взимку та влітку наведено на рис. 7.5.

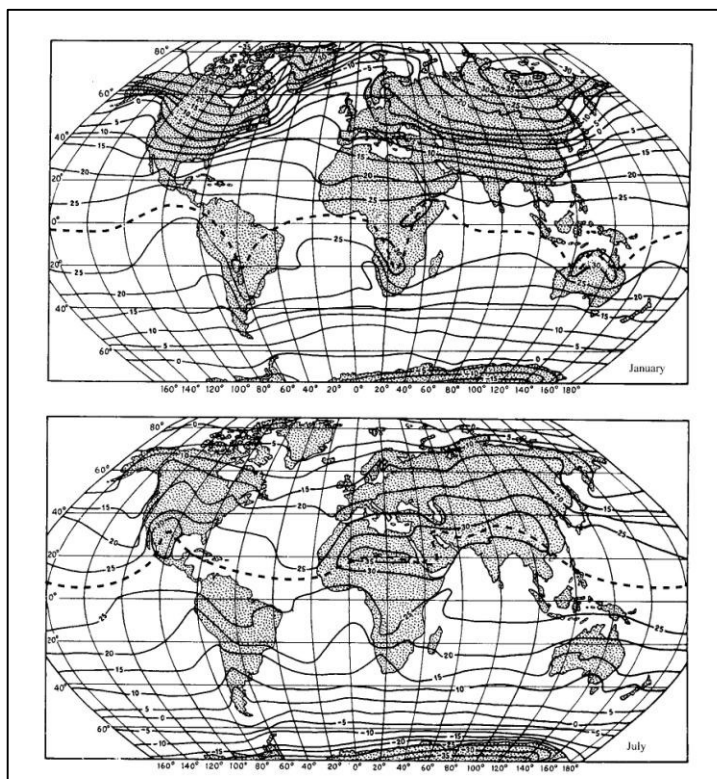


Рис. 7.5. Типовий світовий розподіл температури взимку та влітку [27]

## 7.5. Температурні стресові ситуації

*Заморозками* називаються зниження температури в приземному шарі повітря та на поверхні ґрунту до  $0^{\circ}\text{C}$  і нижче при позитивних середньодобових температурах. Причиною заморозків є нічне випромінювання тепла землею поверхнею або надходження холодних мас з півночі, або комбінація означених вище двох причин.

*Посуха* – це стан погоди, який призводить до тривалої і значної нестачі опадів порівняно з нормою при підвищених температурах повітря і випаровуванні. Розрізняють *ґрунтову посуху* (дефіцит вологи в ґрунті) і *повітряну* (надмірні випаровування води з поверхні рослин призводить до від'ємного водного балансу). Причиною ґрунтової посухи є відсутність опадів, повітряної – сухі вітри із швидкістю 5–10 м/с, що супроводжуються низькою (25–30%) відносною вологістю.

### *Екстремальні значення температури*

Максимальну температуру  $58^{\circ}\text{C}$  було зареєстровано в Ель Азізії (Лівія) на краю пустелі Сахара 13 вересня 1922 року.

Мінімальна температура  $-89,6^{\circ}\text{C}$  була відзначена на станції Восток в Антарктиді 21 липня 1983 року.

Цікаво відмітити суттєву різницю між абсолютним максимумом  $T_{\text{макс}}$  та абсолютним мінімумом  $T_{\text{мін}}$  температур в деяких регіонах: пустеля Каракуми ( $T_{\text{макс}} = +50^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{мін}} = -35^{\circ}\text{C}$ ), Мангишлак ( $T_{\text{макс}} = +42^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{мін}} = -40^{\circ}\text{C}$ ), пустеля Гобі ( $T_{\text{макс}} = +45^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{мін}} = -40^{\circ}\text{C}$ ).



## 8. ТЕПЛОВІ ПОТОКИ

### 8.1. Теплопровідність

Ще один шлях перенесення сонячної енергії – теплопровідність. Теплота переноситься углиб від земної поверхні через градієнт температури, якщо температура поверхні перевищує температуру глибинних шарів (позитивний потік теплоти через земну поверхню). І навпаки, теплота переноситься від глибинних шарів до поверхні, якщо температура углибині вища, ніж на поверхні (негативний потік теплоти через земну поверхню).

Фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності полягає в тому, що він характеризує теплоізоляційні властивості речовини – чим менший коефіцієнт теплопровідності, тим більша теплоізоляція, яка забезпечується речовиною. Величина коефіцієнта теплопровідності ґрунту залежить від фази ґрунту, текстури, об'ємної густини, вмісту води, структури, поверхневого контакту між ґрунтовими частинками, температури.

Дійсно, ґрунт складається з твердих частинок піску, глини, органічних речовин. Проміжки між ними заповнені або повітрям, або водою. Частинки піску мають неправильну форму і стикаються між собою лише в окремих точках. Якщо пісок сухий, то на тепловий режим впливатиме повітря з малим коефіцієнтом теплопровідності. Передача тепла від однієї частинки піску до другої буде йти повільно. Якщо пісок вологий, то коефіцієнт теплопровідності збільшується і передача тепла полегшується. Той же ефект має місце при ущільненні ґрунту. Малу теплопровідність мають торф'яні ґрунти через пухкість та великий вміст органічних речовин і повітря. Замерзання ґрунту викликає перетворення вільної води в лід з відповідним зростанням теплопровідності.

*Тепловий потік.* Величина, що визначається відношенням кількості теплоти, яка переноситься за одиницю часу, називається потоком теплоти. Одиниця вимірювання теплового потоку –  $\text{Дж/с}$ .

*Густина теплового потоку* – це є кількість теплоти, яка переноситься за одиницю часу через одиницю площі поверхні. Одиниця вимірювання густини теплового потоку –  $\text{Дж/м}^2 \cdot \text{с}$  або  $\text{Вт/м}^2$ .

Важливим фактором, який впливає на тепловий потік, що надходить у ґрунт, є колір останнього. Роль його зводиться в зміні альбедо і, таким чином, радіаційного балансу. Суттєво впливає на тепловий потік у ґрунті наявність ізолюючих шарів (ґравію, соломи тощо) на поверхні.

### 8.2. Відчутна теплота

Теплота, що викликає зміну температури об'єкта, називається *відчутною теплотою*. Відчутна теплота є тепла енергія, що переноситься між земною поверхнею та повітрям завдяки різниці температур між ними, тобто вертикальному температурному градієнту. Ми відчуваємо перенесення відчутної теплоти як зміну температури повітря. Спочатку перенесення відчутної теплоти здійснюється через теплопровідність під час зіткнення

молекул повітря. Коли повітря нагрівається, воно бере участь у циркуляції завдяки конвекції.

Коли об'єкт нагрівається, його температура підвищується, і навпаки. Величина відчутної теплоти визначається за виразом:

$$Q = mc(T - T_0), \quad (8.1)$$

де  $m$  – маса тіла;  $c$  – питома теплоємність;  $(T - T_0)$  – різниця температури тіла та опорної температури.

Відчутна теплота не викликає зміни фізичного стану речовини, але завжди супроводжується зміною температури; її можна оцінити за допомогою термометра.

Отже, для реалізації потоку відчутної теплоти необхідний температурний градієнт. Людина *відчуває* потік *відчутної* теплоти через зміну температури повітря.

Рівняння дифузії для відчутної теплоти має вигляд:

$$F_z(H) = -D_H \rho_a \cdot C_a \frac{dT_a}{dz}, \quad (8.2)$$

де  $D_H$  – коефіцієнт дифузії;  $\rho_a$  – густина повітря;  $C_a$  – питома теплоємність повітря;  $\frac{dT_a}{dz}$  – градієнт температури.

Знову припускаючи вимірювання швидкості вітру та температури поблизу поверхні та у приземному повітрі, можна записати рівняння перенесення потоку відчутної теплоти так:

$$H = K_H v_a \cdot (T_n - T_a), \quad (8.3)$$

де  $K_H$  – коефіцієнт перенесення відчутної теплоти, який визначається за виразом:

$$K_H = \frac{1,99 \cdot 10^{-4}}{\left[ \ln \left( \frac{z_a - z_d}{z_0} \right) \right]^2}, \quad (8.4)$$

де  $z_a$  – висота;  $z_d$  – зміщення нульової поверхні;  $z_0$  – параметр шорсткості.

Вимірюється цей коефіцієнт у  $\text{МДж}/\text{м}^3 \cdot \text{К}$ .

### 8.3. Прихована теплота

Кількість енергії у формі тепла, що звільняється або поглинається речовиною під час переходу з одного фазового стану до іншого, називається *прихованою (латентною) теплотою*. Походить від латинського *latere* – ховати.

Можливі фазові переходи: твердий стан  $\rightarrow$  рідина  $\rightarrow$  газ. Наприклад, перехід від твердого стану до рідкого називається *плавленням*, від рідкого стану до газоподібного – *випаровуванням*, від газу до рідини – *конденсацією*.

Процес переходу між фазовими станами може бути ендотермічним, коли система поглинає енергію (наприклад, під час переходу від твердого стану до рідини та газу) або екзотермічним, коли система звільняє енергію (перехід у зворотному напрямку).

Процес випаровування супроводжується *позитивним* потоком прихованої теплоти. Поверхня витрачає енергію, а повітря набуває, оскільки молекули води відносять енергію під час випаровування.

*Конденсація* – це процес зміни фазового стану, що супроводжується переходом від газу до рідини. Внаслідок цього переходу відбувається вивільнення прихованої теплоти від молекул води до оточуючого повітря, тобто перехід від прихованої теплоти до відчутної. Цей процес супроводжується нагріванням повітря.

Людина не здатна відчувати приховану теплоту, оскільки ця теплота не супроводжується зміною температури.

У загальному випадку прихована теплота визначається за виразом:

$$Q = mL, \quad (8.5)$$

де  $Q$  – кількість енергії, потрібної для зміни фази речовини (Дж);  $m$  – маса речовини (кг);  $L$  – питома латентна теплота конкретної речовини (Дж/кг), тобто кількість теплоти, що необхідна для перетворення одиниці маси речовини з рідкого стану у газоподібний без зміни температури.

Так, теплота випаровування води дорівнює  $2,26 \cdot 10^6$  Дж/кг при температурі  $100^\circ\text{C}$ ;  $2,4 \cdot 10^6$  Дж/кг при  $40^\circ\text{C}$ ;  $2,45 \cdot 10^6$  Дж/кг при  $20^\circ\text{C}$ ;  $2,5 \cdot 10^6$  Дж/кг при  $0^\circ\text{C}$ .

У глобальних масштабах транспортування прихованої теплоти відбувається тоді, коли холодне повітря рухається до екватора.

*Випаровування* – це пароутворення лише з поверхні рідини, під час якого рідину залишають найшвидші молекули, внаслідок чого рідина охолоджується. Отже, процес випаровування супроводжується зменшенням температури поверхні.

Втрата енергії тілом внаслідок випаровування визначається *прихованою теплотою випаровування*  $\lambda$ . Вона відповідає поглинутій кількості теплової енергії, яка необхідна для розриву водневих зв'язків під час випаровування.

Швидкість  $LE$ , з якою водяна пара переноситься з поверхні у повітря завдяки випаровуванню, залежить від температури тіла та повітря, від відносної вологості та дорівнює добутку густини води  $\rho_v$  (кг/м<sup>3</sup>), прихованої теплоти випаровування  $\lambda$  (Дж/кг) та швидкості випаровування  $E$  – швидкості випаровування – кількості втрат води з одиниці поверхні за одиницю часу (м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·с = м/с):

$$LE = \rho_e \cdot \lambda \cdot E. \quad (8.6)$$

Тут  $LE$  вимірюється у  $\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ .

Якщо  $E$  вимірюється у  $\text{кг}/\text{с}$ , то  $LE$  вимірюється у  $\text{Дж}/\text{с}$ , а останнє рівняння має вигляд:

$$LE = \lambda \cdot E. \quad (8.7)$$

Рівняння дифузії для прихованої теплоти має вигляд:

$$F_z(LE) = -D_V \lambda_v \cdot \frac{d\rho_v}{dz}, \quad (8.8)$$

де  $D_V$  – коефіцієнт дифузії;  $\lambda_v$  – прихована теплота випаровування води;  $\frac{d\rho_v}{dz}$  – градієнт концентрації водяної пари у повітрі.

Для визначення перенесення потоку прихованої теплоти необхідно провести вимірювання швидкості вітру та тиску пари на двох висотах  $z_1$  та  $z_2$ . Якщо вважати  $z_1$  як рівень земної поверхні (тобто  $z_1 = d + z_0$ ,  $v_1 = 0$ ,  $e = E$ ) та використати типові для земної поверхні умови ( $\lambda = 2,47 \cdot 10^6$  Дж/кг,  $\rho = 1,24$  кг/м<sup>3</sup>,  $p = 101,3$  кПа, то можна записати рівняння перенесення прихованої теплоти так:

$$LE = \rho_e \cdot \lambda \cdot K_{LE} \cdot v_a \cdot (e_n - e_a), \quad (8.9)$$

де  $K_{LE}$  – коефіцієнт перенесення прихованої теплоти;  $\rho_e$  – густина води;  $\lambda$  – прихована теплота випаровування;  $v_a$  – швидкість вітру;  $(e_n - e_a)$  – різниця пружності (парціального тиску) водяної пари поблизу земної поверхні  $e_n$  та у приземному повітрі  $e_a$ .

Коефіцієнт перенесення прихованої теплоти визначається за виразом:

$$K_{LE} = \frac{3,01 \cdot 10^{-3}}{\left[ \ln \left( \frac{z_a - z_d}{z_0} \right) \right]^2}. \quad (8.10)$$

Вимірюється цей коефіцієнт у  $\text{МДж}/\text{м}^3 \cdot \text{кПа}$ .

#### 8.4. Енергетичний баланс земної поверхні

Сумарне випромінювання  $R_{\text{сум}}$  земної поверхні описується рівнянням:

$$R_{\text{сум}} = E_{\text{кх}\downarrow} - E_{\text{кх}\uparrow} + E_{\text{ох}\downarrow} - E_{\text{ох}\uparrow} = (1-a) E_{\text{г}\downarrow} - \epsilon \sigma (T_S^4 - T_A^4), \quad (8.11)$$

де  $E_{\text{кх}\downarrow} = E_{\text{С}\downarrow}$  – короткохвильове сонячне випромінювання, що падає на земну поверхню ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $a$  – альbedo або частка сонячного випромінювання, що відбивається від земної поверхні (отже,  $-E_{\text{кх}\uparrow} = -a E_{\text{г}}$  – це короткохви-

льове сонячне випромінювання, що відбивається від земної поверхні); величина  $E_{\text{atm}\downarrow} = \epsilon\sigma T_A^4$  є довгохвильовим атмосферним випромінюванням, що падає на земну поверхню, тоді як  $E_{\text{atm}\uparrow} = \epsilon\sigma T_S^4$  є довгохвильовим випромінюванням земної поверхні (рис. 8.1). У формулі (8.11) позначки «мінус» характеризують втрати випромінювання.

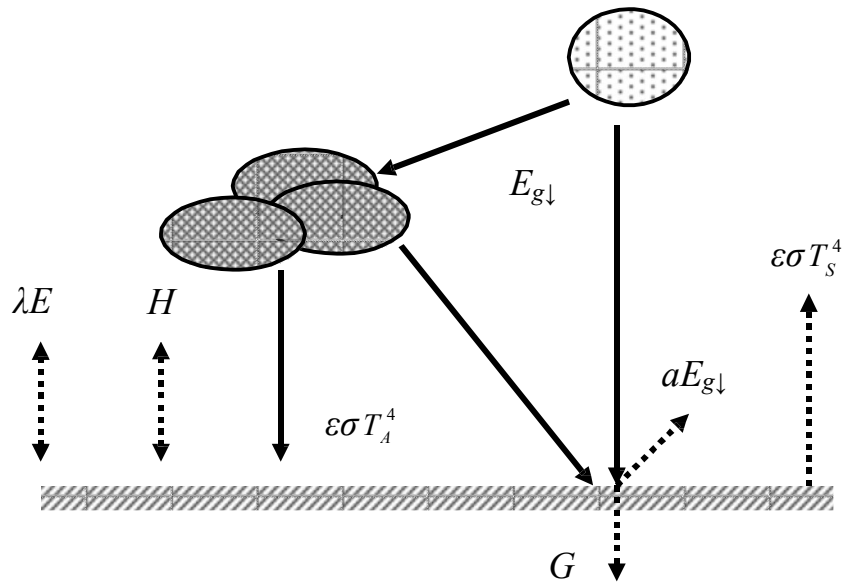


Рис. 8.1 - Енергетичний баланс земної поверхні

Отже, сумарне випромінювання  $R_{\text{сум}}$ , що одержано земною поверхнею, описується рівнянням:

$$R_{\text{сум}} = G + \lambda E + H, \quad (8.12)$$

де  $G$  – потік теплоти через земну поверхню завдяки теплопровідності;  $\lambda E$  – потік прихованої теплоти;  $H$  – потік відчутної теплоти.

Загальне рівняння енергетичного балансу земної поверхні матиме вигляд:

$$(1 - a) E_{\text{с}\downarrow} - \epsilon\sigma(T_S^4 - T_A^4) = G + \lambda E + H. \quad (8.13)$$

Сумарне випромінювання, що одержано земною поверхнею, витрачається на певні процеси, а саме:

1. Потік теплоти  $G$  через земну поверхню характеризується передачею теплової енергії углиб земної поверхні завдяки теплопровідності. Умовою реалізації цього процесу є наявність температурного градієнту між поверхневими та глибинними шарами ґрунту. Тепловий потік вважається додатним, якщо температура поверхні перевищує температуру ґрунту на глибині; в цьому випадку тепловий потік спрямований униз. Якщо

цей потік незначний у регіонах помірною та тропічного клімату, то в арктичних зонах він становить 10–20 % від сумарного випромінювання.

2. *Потік прихованої теплоти* – це потік теплоти від земної поверхні до атмосфери, який супроводжується випаровуванням води з поверхні або транспірацією з подальшою конденсацією водяної пари в тропосфері. Цей процес дуже важливий з точки зору забезпечення енергетичного бюджету Землі. Зазвичай прихована теплота передається в атмосферу через конвекцію і становить близько 16 % від загальних втрат енергії земною поверхнею.

3. *Потік відчутної теплоти* – це процес перенесення теплової енергії з земної поверхні до атмосфери завдяки теплопровідності або конвекції (після чого цей потік може рухатися горизонтально завдяки циркуляції атмосфери). Але оскільки теплопровідність повітря невисока, основним процесом перенесення відчутної теплоти є конвекція.

Перенесення енергії позначається стрілками, які показують напрямок перенесення. Потоки енергії від поверхні вважаються позитивними, а до поверхні – негативними.

Коли земна поверхня тепліша за атмосферу, відбувається *позитивний* потік відчутної теплоти; у цьому випадку відбувається нагрівання повітря та охолодження земної поверхні. Якщо земна поверхня холодніша за повітря, потік відчутної теплоти вважається *негативним*. При цьому повітря охолоджується, а земна поверхня нагрівається.

Виражається цей потік як кількість теплоти, що переноситься через одиницю площі за одиницю часу ( $\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ).

У глобальних масштабах транспортування відчутної теплоти відбувається у формі теплого повітря, що рухається до полюсів.

Типові значення відчутної теплоти становлять близько 5 % від загальних втрат енергії земною поверхнею.

Енергетичний баланс земної поверхні залежить від часу доби. Так, отримання енергії завдяки сумарному випромінюванню та втрати її через потік прихованої теплоти (випаровування у повітря) та потік відчутної теплоти (конвекції) максимальні вдень. Вночі втрати теплоти пов'язані з сумарним випромінюванням, тоді як потоки прихованої теплоти (процеси конденсації) та відчутної теплоти (зворотна конвекція) забезпечують накопичення теплоти.

Удень енергія одержується земною поверхнею як сумарне випромінювання  $R_{\text{сум}}$ . Втрати теплоти визначаються потоком латентної теплоти  $\lambda E$  завдяки випаровуванню води з поверхні, потоком відчутної теплоти  $H$ , та невеликим потоком теплоти  $G$  завдяки теплопровідності (рис. 8.2). Удень сумарне випромінювання, що одержане земною поверхнею, позитивне, оскільки енергія сонячного випромінювання перевищує витрати енергії земною поверхнею. Енергія сонячного випромінювання витрачається удень на випаровування; відчутна теплота переноситься угору, тоді як потік теплоти через теплопровідність спрямований углибину.



Уночі енергія витрачається за рахунок сумарного випромінювання, яке є від'ємним. Одержання енергії здійснюється через конвективний потік повітря (яке тепліше, ніж у ґрунті), потоки латентної теплоти (якщо вода конденсується у вигляді роси) та потік теплопровідності у ґрунт (який тепліший, ніж повітря) (рис. 8.3). Уночі всі процеси мають протилежний напрям; сумарне випромінювання – негативне. Земна поверхня охолоджується і тепла енергія переноситься повітря до земної поверхні.

Якщо сонячне випромінювання поглинається земною поверхнею, температура останньої підвищується. Але, коли сонячне випромінювання поглинається водною поверхнею, частина енергії, що здійснює нагрівання води, витрачається на випаровування. В результаті, за однаковим постачанням сонячної енергії земній та водній поверхням, земля нагрівається більше, ніж вода.

Рис. 8.2 - Енергетичний баланс на рівні земної поверхні удень

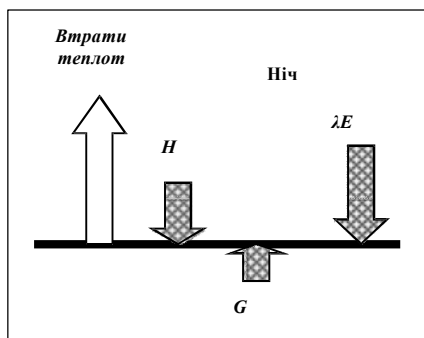
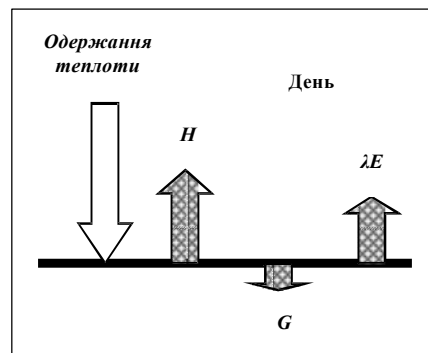


Рис.8.3 - Енергетичний баланс на рівні земної поверхні вночі

## 9. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ

### 9.1. Вимірювання температури

#### 9.1.1. Термометри опору

Прилади, принцип яких заснований на властивості матеріалів змінювати електричний опір під впливом температури, називаються термометрами опору. Провідники в таких вимірюваннях називаються *терморезисторами*, а напівпровідники – *термісторами*.

Для провідників залежність опору від температури має вигляд:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (9.1)$$

де  $R$  – опір провідника при температурі  $T$ ;  $R_0$  – опір при температурі  $T_0$ ;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору провідника;  $\Delta T = T - T_0$  (де  $T_0 = 273,16 \text{ K} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Для терморезисторів використовують такі метали як платина, нікель, мідь. Опір платини та інших чистих металів збільшується на 0,4-0,5 % від своєї величини при зміні температури на один градус Цельсія. Платина характеризується стабільністю параметрів в умовах корозії, дії хімічних сполук. Платина не окислюється, піддається механічній обробці, має високу температуру плавлення і відзначається високим рівнем чистоти. Всі ці фактори впливають на стабільність залежності опору платинового провідника від температури. Платинові терморезистори характеризуються малими габаритами та компактністю (рис. 9.1).

Перевагою мідних терморезисторів є широкі зміни опору при зміні температури та практично лінійний відгук на температуру. Нікель має нелінійний характер залежності опору від температури. Нікель і мідь характеризуються меншою вартістю порівняно з платиною.

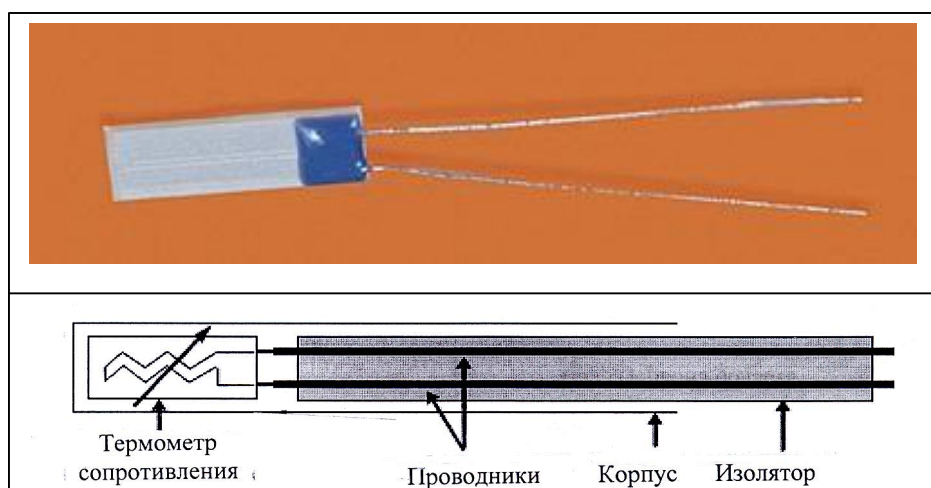


Рис. 9.1. Платиновий терморезистор  
[[http://www.omega.com/pptst/TFD\\_RTd.html](http://www.omega.com/pptst/TFD_RTd.html)]

Для напівпровідників опір зменшується з підвищенням температури за формулою:

$$R = ae^{b/T}, \quad (9.2)$$

де  $a$  і  $b$  – сталі, що залежать від напівпровідника;  $T$  – температура.

Типовими напівпровідниками, які використовуються як термістори, є кремній та германій. Розміри термісторів можуть досягати 0,2 мм. Термістори є більш чутливими до зміни температури порівняно з терморезисторами: вони можуть реагувати на зміни температури близько  $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ . Інтервал температур, які вимірюють термістори, становить від  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 9.1.2. Термоелектричні термометри

Ці прилади використовують термоелектричні явища, які проявляються у взаємозв'язку теплових та електричних процесів у твердих тілах. Одним із таких термоелектричних явищ є *ефект Зеебека* – виникнення електрорушійної сили (е.р.с.) в електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників, контакти яких мають різну температуру (рис. 9.2).

Типові термопари складаються з металів або сплавів, таких як мідь-константан, залізо-константан, платина-платина/родій.

Температурні інтервали таких термоелектричних термометрів визначаються вибором певної термопари: хромель-алюмель – від  $-200 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; залізо-мідь – від  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+750 \text{ }^\circ\text{C}$ ; мідь-константан – від  $-200 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+350 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Недоліком таких термометрів є невисока точність (яка перевищує  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), а також невеликі значення електрорушійної сили, що виникає в електричному ланцюзі.

Подолати цей недолік можна за рахунок послідовного з'єднання декількох термопар, які утворюють у цьому разі *термобатарею*.

### 9.1.3. Біметалевий термометр

*Біметалевий термометр* заснований на тепловому розширенні твердих тіл, зокрема на деформації біметалевої пластини (наприклад, інвар і сталь) під впливом температури (рис. 9.3).

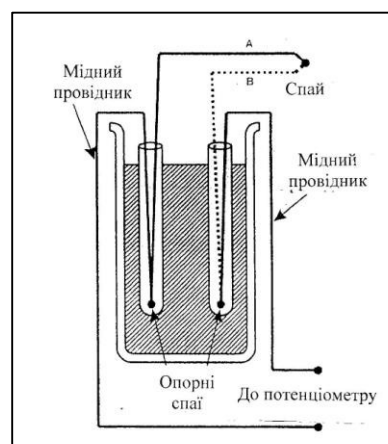


Рис. 9.2. Термоелектронний термометр

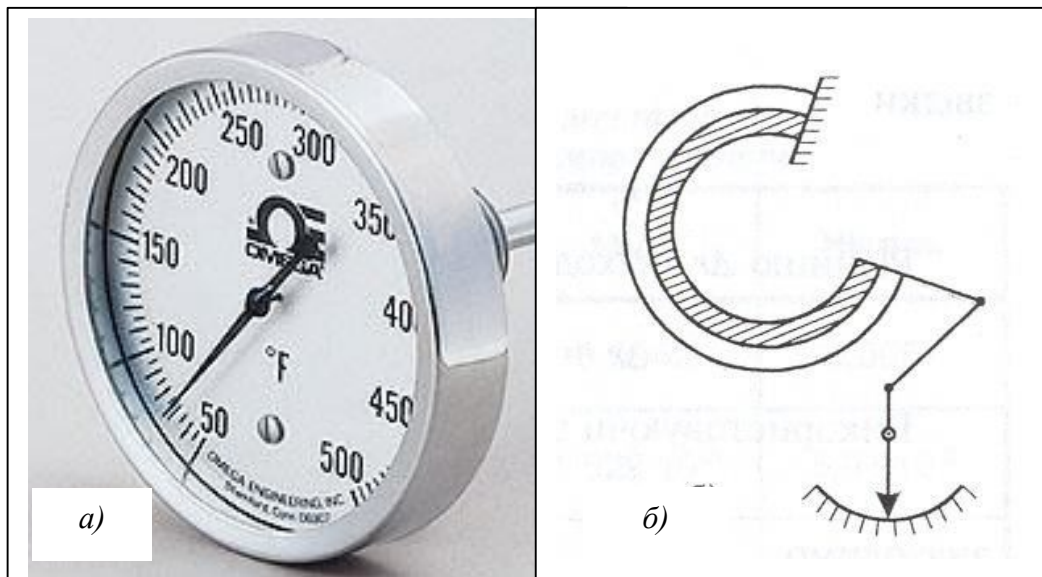


Рис. 9.3. Біметалевий термометр:  
 а – зовнішній вигляд; б – біметалева пластина

Оскільки метали мають різні значення коефіцієнтів об'ємного розширення, пластина при зміні температури буде деформуватися. Залежність переміщення кінця біметалевої пластини від температури лінійна, а шкала приладу – рівномірна.

Малі габарити та вага приладу дають можливість застосувати його у радіозондах для дистанційного вимірювання температури атмосфери.

#### 9.1.4. Метод інфрачервоної термометрії

Прилад, призначений для дистанційного вимірювання інфрачервоного випромінювання природних поверхонь, називається *радіотермометром*. Ці прилади використовуються для вимірювання температури ґрунту, листя, рослинних покривів тощо. Відомо, що енергетична яскравість природної поверхні визначається за виразом:

$$L_e = \varepsilon \sigma T_s^4, \quad (9.3)$$

де  $\varepsilon$  – випромінювальна здатність поверхні ( $0 < \varepsilon < 1$ );  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ );  $T_s$  – температура поверхні.

Отже, вимірювання енергетичної яскравості природної поверхні дає можливість оцінити її температуру.

На практиці вимірюють енергетичну яскравість у смузі довжин хвиль, звичайно в області 8–13 мкм, де спостерігається вікно прозорості атмосфери і випромінювальна здатність тіл максимальна. Через це температура атмосфери не впливає на результати вимірювань температури по-

верхні, а випромінювання Сонця цілком поглинається атмосферою і також не заважає вимірюванням.

Звичайно радіометри складаються з оптичної системи (лінз, дзеркал, фільтрів), яка фокусує потік випромінювання певної довжини хвилі на детектор – термістор або термобатарею.

Цей потік підвищує температуру детектора, вихідний електричний сигнал з виходу якого проградуєований в одиницях температури. Застосування інфрачервоної відеокамери, яка здатна реєструвати спектральний розподіл температури (рис. 9.5), дає можливість утворювати теплові зображення об'єкта, що досліджується.

Для обмеження сигналу, що відповідає власній температурі детектора, використовують другий компенсаційний детектор і систему диференційного підсилення та порівняння сигналів з виходу двох детекторів (рис.9.4а). Підвищити чутливість вимірювальної системи можна за рахунок модулювання оптичного випромінювання (рис.9.4б).

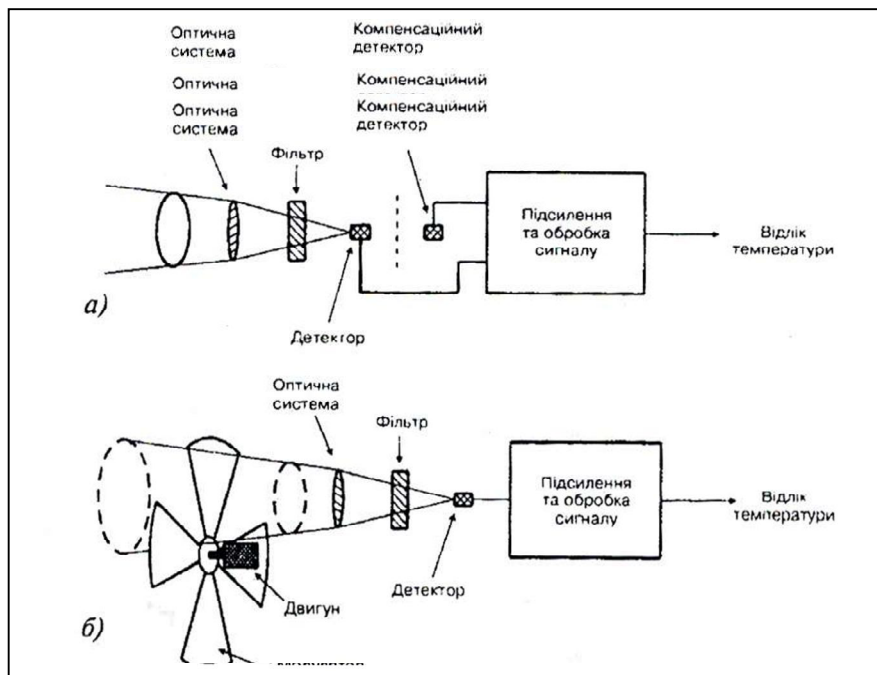


Рис. 9.4. Радіотермометр: а – статичний радіотермометр; б – радіотермометр з модульованим оптичним випромінюванням

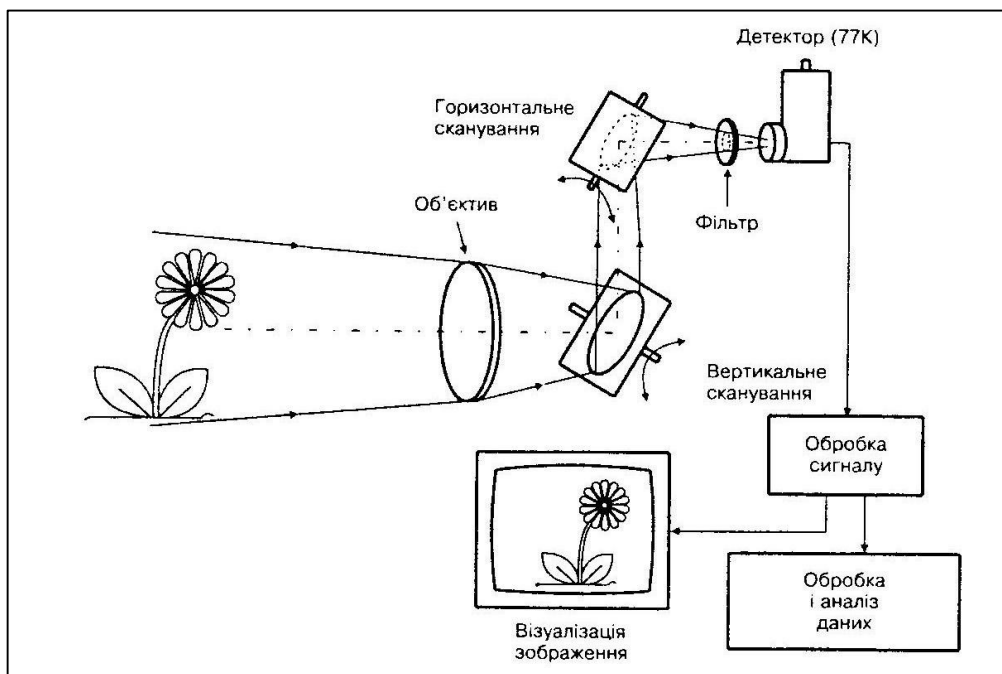


Рис. 9.5. Інфрачервона відеокамера для реєстрації спектрального розподілу температури

Зовнішній вигляд інфрачервоного радіотермометра наведено на рис. 9.6.



Рис. 9.6. Зовнішній вигляд інфрачервоного радіотермометра

### 9.1.5. Кварцовий п'єзоелектричний термометр

Прилад цього типу являє собою цифровий прилад, в основі якого лежить вимірювання резонансної частоти п'єзокристала. Кожний кристал має свою власну резонансну частоту, яка залежить від температури. Кварцові п'єзоелектричні термометри характеризуються високою чутливістю та

роздільною здатністю ( $10^{-4}$  °C). Діапазон температур, що вимірюються, становить від  $-40$  °C до  $+230$  °C. До недоліків належать складність електронної системи та відповідна висока вартість приладів.

### 9.1.6. Дистанційні вимірювання температури

Вимірювання температури повітря на висоті здійснюється за допомогою супутників або радіозондів. Типовий вертикальний профіль температури повітря наведено на рис. 9.7. Форма спектру комбінаційного розсіювання азоту, що присутній в атмосфері, залежить від температури, яку можна оцінити шляхом вимірювання інтенсивності комбінаційного розсіювання на двох довжинах хвиль. Детальну інформацію щодо методів дистанційного зондування довкілля можна знайти у розділі VI.

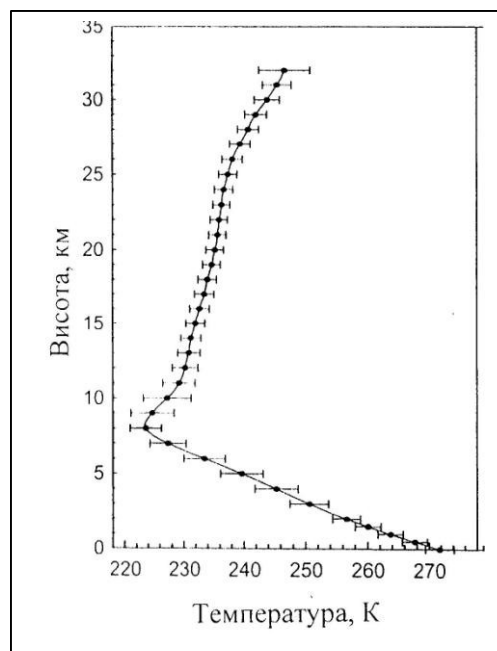


Рис. 9.7. Типовий вертикальний профіль температури повітря

## 9.2. Методи вимірювання теплових потоків

### 9.2.1. Сенсор теплових потоків

Цей прилад є перетворювач, призначений для вимірювання перенесення теплоти завдяки теплопровідності, конвекції та випромінюванню, який генерує електричний сигнал, пропорційний загальному тепловому потоку, що проходить через поверхню сенсора.

Сенсор теплових потоків (типу RC01) складається з двох детекторів; поверхня одного з них, яка покрита золотом, чутлива лише до конвекційних теплових потоків; поверхня другого детектора чорного кольору призначена для реєстрації як конвекційних, так і радіаційних теплових потоків (рис. 9.8).

Під поверхнею детектора знаходиться термопара, що виконана з сплаву хромель-алюмель (хромель містить 90 % нікелю та 10 % хрому; алюмель – 95 % нікелю, 2 % магнію, 2 % алюмінію та 1 % кремнію). Чут-

лівість такої термопары становить  $41 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$ . Розміри сенсора  $22 \times 10 \times 3$  мм; розміри всього приладу  $65 \times 65 \times 13$  мм.

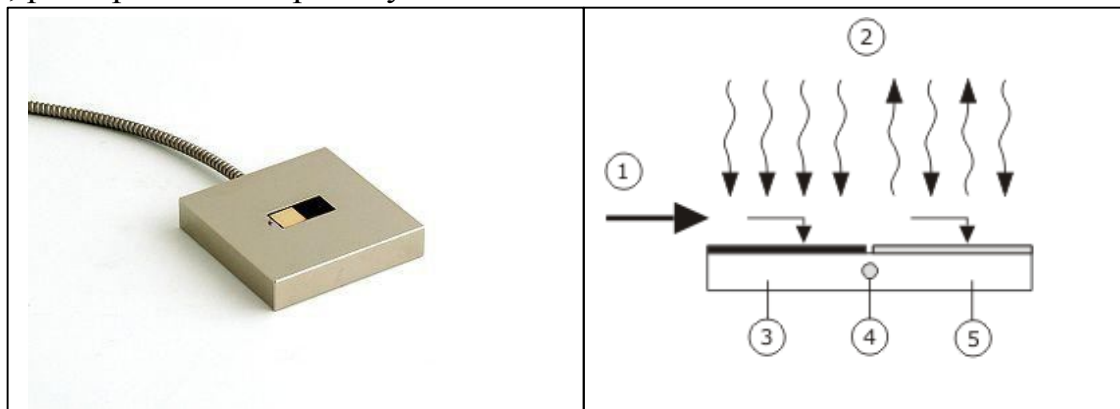


Рис. 9.8. Сенсор теплових потоків RC01: а – загальний вигляд; б - принцип дії сенсора RC01: 1 – конвекційний потік; 2 – радіаційний потік; 3 – сенсор теплового потоку з зачорненою поверхнею; 4 – температурний сенсор; 5 – сенсор теплового потоку з золотою поверхнею

Ще один різновид сенсорів теплових потоків (типу HFP01) містить термопару (наприклад, мідь-константан), яку занурено у керамічно-пластмасову обойму (рис. 9.9). Ця термопара вимірює різницеву температуру, що утворюється на граничних площинах сенсора. Вихідний сигнал сенсора, який вимірюється у мілівольтах, пропорційний локальному тепловому потоку, що проходить через сенсор.

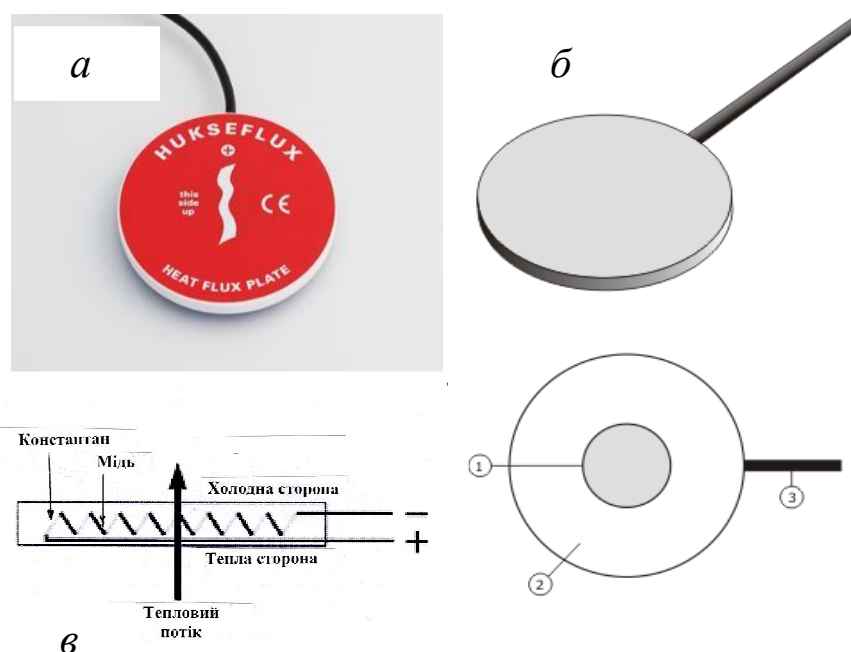


Рис. 9.9. Сенсор теплових потоків HFP01: а – загальний вигляд; б – конструкція сенсора: 1 – сенсор; 2 – керамічно-пластмасова обойма; 3 – кабель; в – принцип дії сенсора.



Сенсор теплових потоків може бути представлений електричним аналогом, що складається з опору  $R$  та ємності  $C$ . Часовий відгук сенсора  $\tau$  визначається за виразом:

$$\tau = RC = \frac{d^2 \rho C_p}{k}, \quad (9.5)$$

де  $d$  – товщина сенсора;  $C_p$  – теплоємність;  $k$  – теплопровідність. Важливими характеристиками сенсора є лінійність температурної залежності та інтервал температур (для сенсора типу RC01 діапазон температур становить  $-200$  °C -  $+1250$  °C).

### 9.2.2. Метод сцинтилометрії

Під час поширення оптичного випромінювання вздовж атмосфери воно може спотворювати свої характеристики – інтенсивність, поляризацію, фазу. Серед основних чинників, що впливатимуть на ці характеристики, є розсіювання та поглинання випромінювання газами та частинками атмосфери, які забирають енергію променя і, таким чином, призводять до його загасання. Найбільш важливим фактором, що впливає на інтенсивність випромінювання, що поширюється в атмосфері, є процес розсіювання, а найсерйознішим механізмом взаємодії випромінювання з атмосферою є малі флуктуації показника заломлення повітря  $n$ . Ці турбулентні флуктуації показника заломлення спричиняють відповідні флуктуації оптичного випромінювання, відомі під назвою *сцинтиляції*.

Турбулентність атмосфери відбувається у тривимірному просторі як рух повітря у вигляді завихрень розмірами від кількох міліметрів до десятків метрів. Турбулентність атмосфери є одним з найефективніших механізмів транспортування теплоти та водної пари.

Показник заломлення залежить від температури повітря, його вологості та густини. Під час транспортування теплоти та водної пари показник заломлення також набуває флуктуацій, що призводять до сцинтиляцій оптичного випромінювання.

Отже, тепла шаруватість та турбулентність атмосфери викликає флуктуації показника заломлення повітря. Якщо пропускати світловий промінь через такий приземний шар повітря, то він набуває відповідні просторові флуктуації інтенсивності. Реєстрація сцинтиляцій (мерехтінь) світлового променя може надати інформацію щодо структури атмосферних шарів та наявності в них теплових та рефракційних градієнтів.

Прилад, призначений для визначення теплової та турбулентної структури приземних шарів атмосфери, називається *сцинтилометром* [28,29].

Складається цей прилад з передавача та приймача. Передавач генерує оптичне випромінювання, яке набуває флуктуацій під час проходження приземного шару атмосфери. Ці флуктуації реєструються приймачем. Оскільки ці флуктуації викликаються температурними флуктуаціями, стає можливим реєструвати потоки відчутної та прихованої теплоти вздовж довжини поширення оптичного променя, яка варіює від 100 до 5000 м.

Схему сцинтилометра наведено на рис. 9.10. Передавач випромінює світловий промінь певної довжини хвилі  $\lambda$ . На певній відстані  $L$  приймач аналізує флуктуації інтенсивності  $C_n^2$ , що характеризують турбулентні вихори. Крім того, на рисунку зображено діаметр променя  $D$ , різні розміри завихрень, а також висота розташування сцинтилометра  $z$  над поверхнею.

Якщо апертура сцинтилометра достатньо велика, тобто перевищує розміри великих вихорів, приймач здатний усереднювати одержаний по всій апертурі сигнал. Це означає, що дрібні флуктуації оптичного сигналу, які являють собою темні та світлі плями, будуть компенсувати одна одну в межах апертури сцинтилометра.

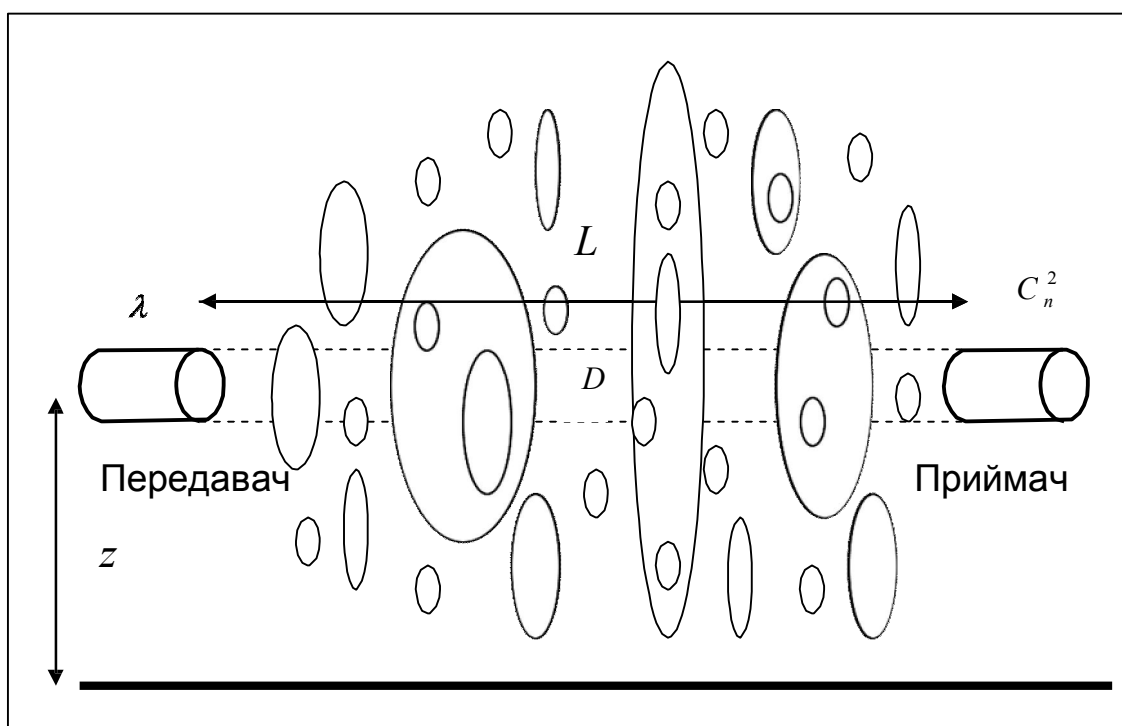


Рис. 9.10. Схема, що пояснює принцип діє сцинтилометра: передавач генерує оптичне випромінювання, яке проходить через турбулентний шар атмосфери, а приймач аналізує флуктуації інтенсивності  $C_n^2$ , що характеризують турбулентні вихори [28]

Оскільки зона вимірювань сцинтилометра з великою апертурою (близько 5000 м) перевищує відповідну зону комплексу для оцінювання вихрової коваріації, метод сцинтилометрії дає можливість вимірювати вертикальні теплові потоки, усереднені в межах одного пікселя (якщо порівняти з супутниковими вимірюваннями).

Рис. 9.11. Зовнішній вигляд сцинтилометра [29]



### Контрольні запитання та завдання

1. Як розподіляється температура атмосфери з висотою?
2. Що таке конвекція, конденсація, випаровування?
3. Чим відрізняється зміна температури у водоймах та в ґрунті?
4. Назвати основні температурні стресові ситуації.
5. Дати визначення тепловому потоку; густині теплового потоку.
6. Пояснити різницю між відчутною та прихованою теплотою.
7. Як змінюється сумарне випромінювання земної поверхні вдень та вночі?
8. Назвати переваги платинового терморезистора.
9. Пояснити принцип дії термоелектричного термометра.
10. Де застосовують біметалевий термометр?
11. Пояснити суть дистанційного вимірювання температури на основі реєстрації комбінаційного розсіювання.
12. Як працює сенсор теплових потоків?
13. Пояснити метод сцинтилометрії.

### Конструктивні тести

1. Температурний коефіцієнт опору  $\alpha$  можна визначити як:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt},$$

де  $R$  – опір при температурі  $T$ . Припускаючи, що  $\alpha$  є стала величина, показати, що:

- а. залежність опору від температури має вигляд:

$$R = R_0 e^{\alpha(T - T_0)},$$

де  $R_0$  – опір при температурі  $T_0$ ;

- б. Використовуючи розкладання експоненціальної функції в ряд ( $e^x \approx 1 + x$ ;  $x \ll 1$ ), довести, що:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \text{ для } \alpha(T - T_0) \ll 1.$$



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

### МОДЕЛЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІН ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ

Температурний профіль над однорідною поверхнею у стаціонарних умовах описується рівнянням:

$$T(z) = T_0 - \frac{H}{0,4\rho c v^*} \ln \frac{z-d}{z_H}, \quad (1)$$

де  $T(z)$  – середня температура повітря на висоті  $z$ ;  $T_0$  – аеродинамічна температура земної поверхні;  $H$  – тепловий потік від поверхні до повітря;  $\rho c$  – об'ємна теплоємність повітря ( $1200 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot(^{\circ}\text{C})^{-1}$  при  $20^{\circ}\text{C}$  на рівні моря);  $d$  – зміщення нульової поверхні;  $v^*$  – швидкість тертя;  $z_H$  – параметр шорсткості для перенесення теплоти.

Для плоскої гладкої поверхні  $d = 0$ . Однорідний рослинний покрив характеризується такими співвідношеннями:

$$z_H \cong 0,02h; \quad d \cong 0,6h, \quad (2)$$

де  $h$  – висота рослинного покриву.

#### Приклад

Результати вимірювання температури над рослинним покривом висотою 10 см в ясний день наведено у таблиці.

Висота $z$ , м	0,2	0,4	0,8	1,6
Температура, $^{\circ}\text{C}$	26	24	23	21

Визначити аеродинамічну температуру  $T_0$  земної поверхні.

#### Розв'язання

Використовуючи співвідношення (2), визначимо величини – параметра шорсткості та зміщення нульової поверхні:  $z_H = 0,002 \text{ м}$ ;  $d = 0,06 \text{ м}$ .

Обчислюємо величини  $(z-d)/z_H$  та  $\ln(z-d)/z_H$ ; результати заносимо у таблицю.

Висота $z$ , м	0,2	0,4	0,8	1,6
Температура, $^{\circ}\text{C}$	26	24	23	21
$(z-d)/z_H$	70	170	370	770
$\ln(z-d)/z_H$	4,25	5,14	5,91	6,65

Будуємо графік  $\ln(z-d)/z_H = f[t(z)]$  (рис. 1), звідки знаходимо аеродинамічну температуру  $T_0$  земної поверхні (перетинання прямої з віссю абсцис). Отже,  $T_0 = 35^{\circ}\text{C}$ .

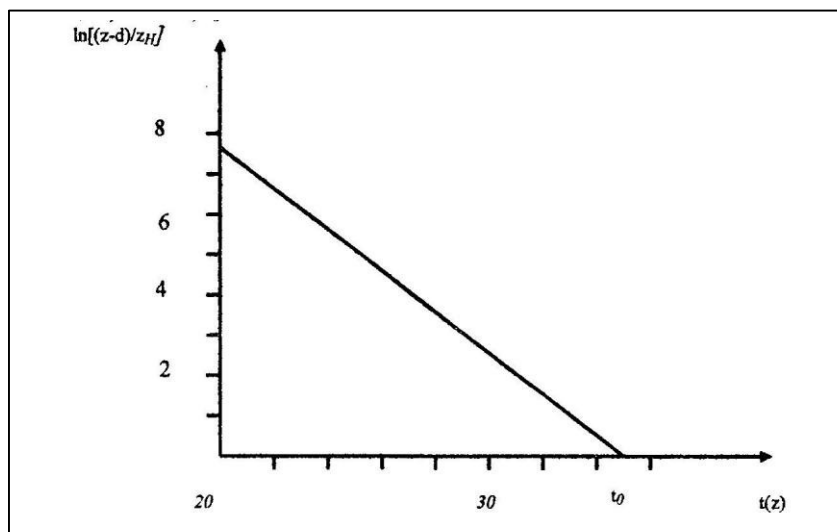


Рис. 1. Графік  $\ln(z - d)/z_H = f[T(z)]$

### Приклад

Середня температура повітря на висоті 2 м над землею поверхнею дорівнює  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а на висоті 1 м температура дорівнює  $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чи замерзає рослинний покрив, якщо його висота 50 см? Знайти термодинамічну температуру земної поверхні. Розв'язати завдання алгебраїчно та графічно.

### Алгебраїчне розв'язання

Враховуємо, що  $H/(0,4\text{срв}^*)$  є величина стала для всіх висот. Тоді рівняння (1) можна записати для двох температур так:

$$3 = T_0 - A \ln \frac{2 - 0,6 \cdot 0,5}{0,02 \cdot 0,5} = T_0 - 5,14A;$$

$$1 = T_0 - A \ln \frac{1 - 0,6 \cdot 0,5}{0,02 \cdot 0,5} = T_0 - 4,25A,$$

де  $A = H/(0,4\text{срв}^*)$ .

Виключаємо з рівняння  $t_0$ :

$$3 = T_0 - 5,14A;$$

$$1 = T_0 - 4,25A;$$

$$3 + 5,14A = 1 + 4,25A;$$

$$2 = -0,89A;$$

$$A = -2,25\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Звідси термодинамічна температура земної поверхні дорівнює:

$$T_0 = 1 + 4,24(-2,25\text{ }^{\circ}\text{C}) = -8,6\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Звідки

$$t(0,5) = -8,6 + 2,25 \ln \frac{0,5 - 0,6 \cdot 0,5}{0,02 \cdot 0,5} = -1,9\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Отже, вершина рослинного покриву знаходиться в умовах замерзання.

### Графічне розв'язання

Складаємо таблицю для трьох температур:

Висота $z$ , м	2	1	0,5
Температура $T$ , °C	3	1	?
$(z - d)/z_H$	170	70	20
$\ln(z - d)/z_H$	5,14	4,25	3,0

Будуємо графік  $\ln(z - d)/z_H = f(T)$  (рис. 2):

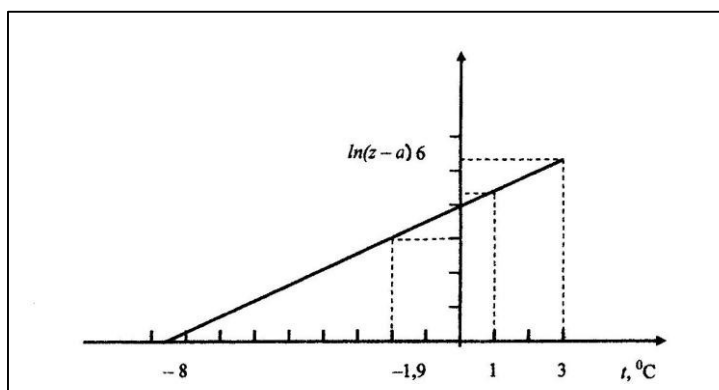


Рис. 2. Графік  $\ln(z - d)/z_H = f(T)$

Звідси знаходимо середню температуру повітря на висоті 0,5 м:  $T(0,5) = -1,9$  °C. Аеродинамічну температуру  $T_0$  земної поверхні знаходимо як перетин прямої  $\ln(z - d)/z_H = f(T)$  з віссю абсцис. Отже,  $T_0 = -8,6$  °C.

### Контрольне завдання

Використовуючи дані таблиці, виконати такі завдання.

Висота $z$ , м	Середня температура повітря, °C
6,4	31,08
3,2	31,72
1,6	32,37
0,8	33,05
0,4	33,80
0,2	34,91
0,1	36,91

1. Побудувати графік залежності  $\ln(z - d)/z_H = f(T)$ , припускаючи  $h = 0,15$  м.
2. Знайти за допомогою графіка аеродинамічну температуру повітря  $T_0$ .
3. Визначити тепловий потік  $H$  від поверхні до повітря, якщо  $v^* = 0,2$  м/с.

### ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОКУ ВІДЧУТНОЇ ТЕПЛОТИ

Температурний профіль над однорідною поверхнею у стаціонарних умовах описується рівнянням:

$$T(z) = T_0 - \frac{H}{0,4\rho c v^*} \ln \frac{z - d}{z_H}, \quad (3)$$

Враховуємо, що  $H/(0,4c\rho v^*)$  є величина стала для всіх висот. Тоді рівняння (1) можна записати для двох температур так:

$$T(z_1) = T_0 - A \ln \frac{z_1 - d}{z_H}; \quad (4)$$

$$T(z_2) = T_0 - A \ln \frac{z_2 - d}{z_H}; \quad (5)$$

де  $T(z)$  – середня температура повітря на висоті  $z$ ;  $T_0$  – аеродинамічна температура земної поверхні;  $H$  – потік відчутної теплоти від поверхні до повітря;  $\rho c$  – об'ємна теплоємність повітря ( $1200 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot(^{\circ}\text{C})^{-1}$  при  $20^{\circ}\text{C}$  на рівні моря);  $d$  – зміщення нульової поверхні;  $v^*$  – швидкість тертя;  $z_H$  – параметр шорсткості для перенесення теплоти;  $A = H/(0,4c\rho v^*)$ .

Виключаючи з рівнянь (4) та (5) аеродинамічну температуру, можна отримати вираз:

$$T(z_1) - T(z_2) = A \left[ \ln \frac{z_1 - d}{z_H} - \ln \frac{z_2 - d}{z_H} \right]; \quad (6)$$

або

$$T(z_1) - T(z_2) = A \ln \frac{z_1 - d}{z_2 - d}. \quad (7)$$

Звідси можна визначити потік відчутної теплоти:

$$H = A \cdot 0,4c\rho v^* = [T(z_1) - T(z_2)] / \ln \frac{z_1 - d}{z_2 - d} \cdot 0,4c\rho v^* \quad (8)$$

Розглянемо приклад вимірювань температури на двох висотах над рослинним покривом висотою 50 см. Середня температура повітря на висоті  $z_1 = 2$  м над рослинним покривом дорівнює  $T_1 = 3^{\circ}\text{C}$ , а на висоті  $z_2 = 1$  м температура дорівнює  $T_2 = 1^{\circ}\text{C}$ ;  $v^* = 0,15$  м/с. Знайдемо потік відчутної теплоти  $H$  від поверхні до повітря.

Для земної поверхні зміщення нульової поверхні  $d$  дорівнює нулю; для однорідного рослинного покриву висотою  $h$  зміщення нульової поверхні  $d \cong 0,6h$ .

Підставимо числові дані у рівняння (8)

$$1 - 3 = A \ln \frac{2 - 0,6 \cdot 0,5}{1 - 0,6 \cdot 0,5} = A \ln \frac{1,7}{0,7} = A 2,43.$$

Звідки  $A = H/(0,4c\rho v^*) = -2,25^{\circ}\text{C}$ .

Тоді потік відчутної теплоти від поверхні до повітря дорівнює:

$$H = 0,4 \cdot 1280 \cdot 0,15 \cdot (-2,25) = -173 \text{ Вт/м}^2.$$



## 10. АТМОСФЕРНИЙ ТИСК

*Атмосферний тиск* визначається як сила, що діє на одиницю площі, викликана вагою стовпа повітря атмосфери над цією поверхнею.

Середнє значення атмосферного тиску на рівні моря становить 1013,25 гПа. Величина атмосферного тиску над земною поверхнею залежить від висоти, а також набуває змін у просторі та часі.

### 10.1. Вертикальний розподіл тиску

Уявлення про те, що молекули повітря рівномірно розподілені по об'єму, помилкове – ці молекули знаходяться у полі тяжіння Землі. Крім того, на них впливає тепловий рух. Сумісна дія поля тяжіння та теплового руху призводять до такого стану, при якому концентрація та тиск газу зменшуються зі зростанням висоти над земною поверхнею.

### 10.2. Атмосферне повітря як ідеальний газ

Атмосферне повітря може бути розглянуте як ідеальний газ, який описується рівнянням:

$$p_A V_A = \frac{m_A}{M_A} R T_A, \quad (10.1)$$

$p_A$  – тиск;  $V_A$  – об'єм;  $m_A$  – маса повітря;  $M_A$  – молярна маса атмосферного повітря (для сухого повітря  $M_a = 0,029$  кг/моль, для водної пари  $M_e = 0,018$  кг/моль);  $R = 8,314$  Дж/К·моль;  $T_A$  – абсолютна температура повітря.

### 10.3. Гідростатична рівновага

Розглянемо елементарний об'єм повітря у формі куба. На нього діють три сили: сила, зумовлена тиском повітря, що знаходиться над цим об'ємом:

$$F_{\downarrow} = p_{\downarrow} S, \quad (10.2)$$

де  $S$  – площа основи елементарного об'єму.

Одночасно на цей об'єм діє сила з боку газу, розташованого нижче; ця сила спрямована у протилежному напрямку:

$$F_{\uparrow} = -p_{\uparrow} S. \quad (10.3)$$

Третя сила, що діє на елементарний об'єм, – це вага тіла:

$$P = \rho g V = \rho g S h, \quad (10.4)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $V$  – елементарний об'єм;  $h$  – довжина ребра куба.



Баланс цих сил при умові, що повітря нерухоме, має вигляд:

$$F_{\downarrow} + F_{\uparrow} + P = p_{\downarrow}S - p_{\uparrow}S + \rho gSh = 0 \quad (10.5)$$

або

$$p_{\downarrow} - p_{\uparrow} = -\rho gh. \quad (10.6)$$

Для нескінченно малих змін тиску останнє рівняння можна записати у диференційній формі:

$$dp = -\rho gdh. \quad (10.7)$$

#### 10.4. Барометрична формула

Густина  $\rho_A$  атмосферного повітря визначається за виразом:

$$\rho_A = \frac{m_A}{V_A} = \frac{M_A p_A}{RT_A}. \quad (10.8)$$

Густина повітря дорівнює  $1,29 \text{ кг/м}^3$  ( $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) та  $1,19 \text{ кг/м}^3$  ( $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Зі зміною висоти від рівня  $h$  до  $h + dh$  атмосферний тиск зменшується відповідно за рівнянням (10.7):

$$\frac{dp_A}{dh} = -\rho_A g. \quad (10.9)$$

Комбінуючи рівняння (10.8) та (10.9), можна одержати вираз:

$$\frac{dp_A}{p_A} = -\frac{M_A g}{RT_A} dh, \quad (10.10)$$

яке після інтегрування набуває вигляду *барометричної формули*:

$$p(h) = p(0) \exp\left(-\frac{M_A g h}{RT}\right) = p(0) \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right), \quad (10.11)$$

де  $p(0)$  – тиск на рівні моря;  $m$  – маса молекули газу;  $k$  – стала Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ). Залежність атмосферного тиску від висоти наведено на рис. 10.1.

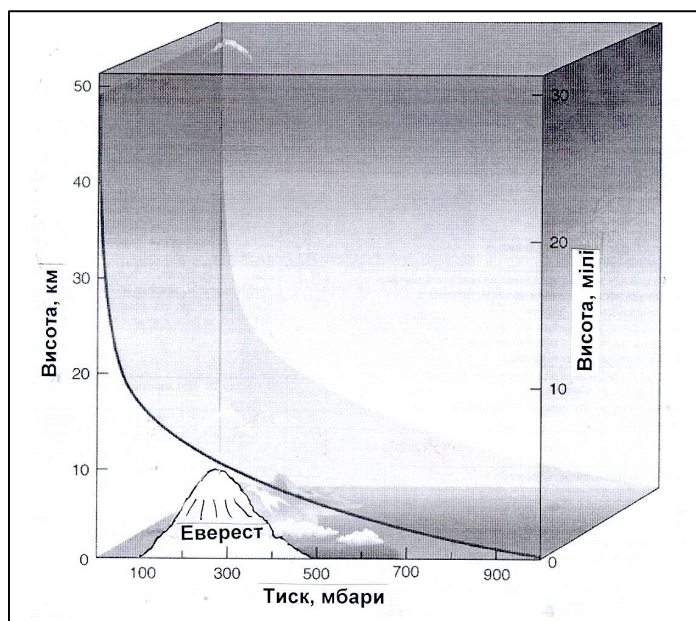


Рис.10.1. Залежність атмосферного тиску від висоти

Якщо розглядати атмосферне повітря як ідеальний газ (див. рівняння стану ідеального газу), то можна визначити такі співвідношення між тиском, температурою та густиною цього газу: всі молекули газу знаходяться у стані теплового руху (рис. 10.2 а). Збільшення густини за сталою температурою призводить до збільшення зіткнень між молекулами та відповідного збільшення тиску (рис. 10.2 б). Якщо густина газу стала, то збільшення температури викликає збільшення швидкості руху молекул та відповідне збільшення тиску (рис. 10.2 в).

### 10.5. Горизонтальний розподіл тиску

Горизонтальний розподіл атмосферного тиску визначається поверхневим рухом мас атмосферного повітря.

*Изобари* – це поверхні, лінії рівного тиску; на географічній або синоптичній карті – лінії, які з’єднують місця з однаковим атмосферним тиском у певні періоди часу.

Изобари характеризують тиск відносно рівня моря у мілібарах (рис.10.3).

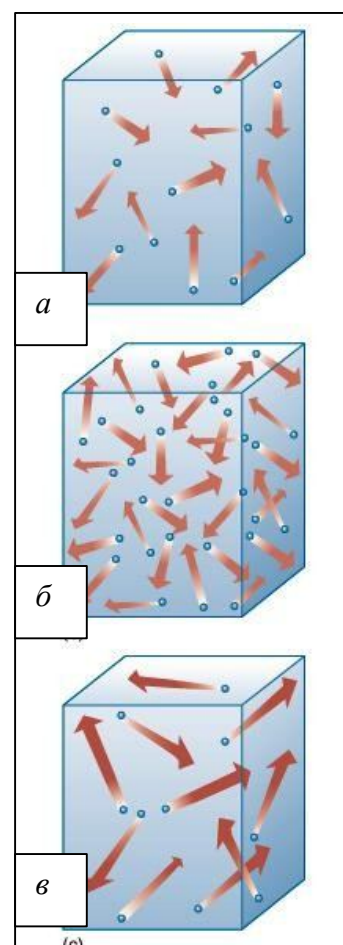


Рис. 10.2. Співвідношення між тиском, температурою та густиною газу

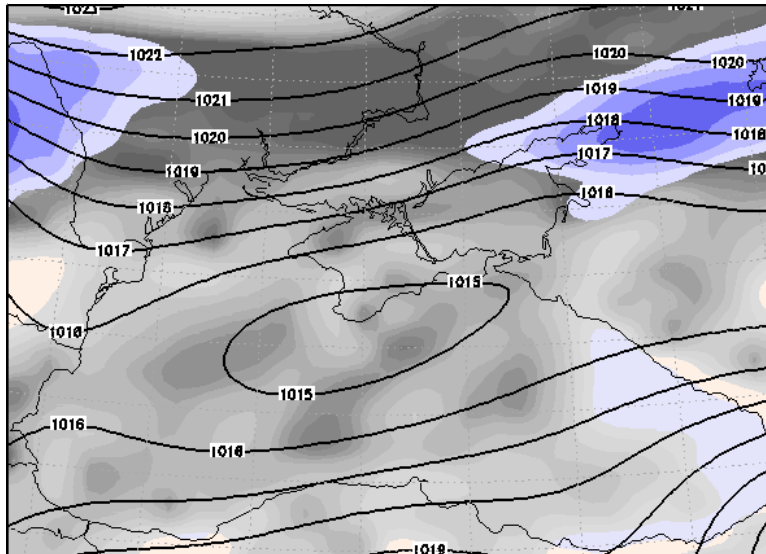


Рис. 10. 3. Карта ізобар в регіоні Чорного моря

Поверхневі карти ізобар корисні для визначення зон *високого* та *низького* тисків (з точки зору циклонів та антициклонів), а також *градієнтів тиску* (що спричиняють вітер).

#### 10.6. Однорідний розподіл температури та тиску

Якщо температура та тиск атмосфери розподілені однорідно по земній поверхні, вітер не виникає (рис. 10.4).

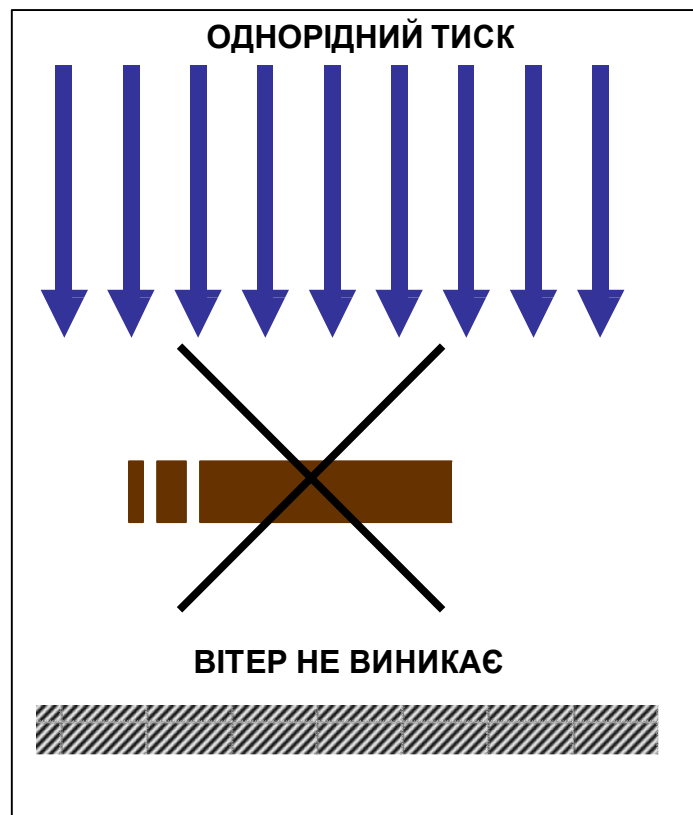


Рис. 10. 4. Однорідний розподіл температури та тиску

### 10.7. Неоднорідний розподіл температури та тиску

У реальній ситуації надлишкове нагрівання окремих зон земної поверхні викликає неоднорідний розподіл температури повітря, що викликає розподіл атмосферного тиску (рис.10.5).

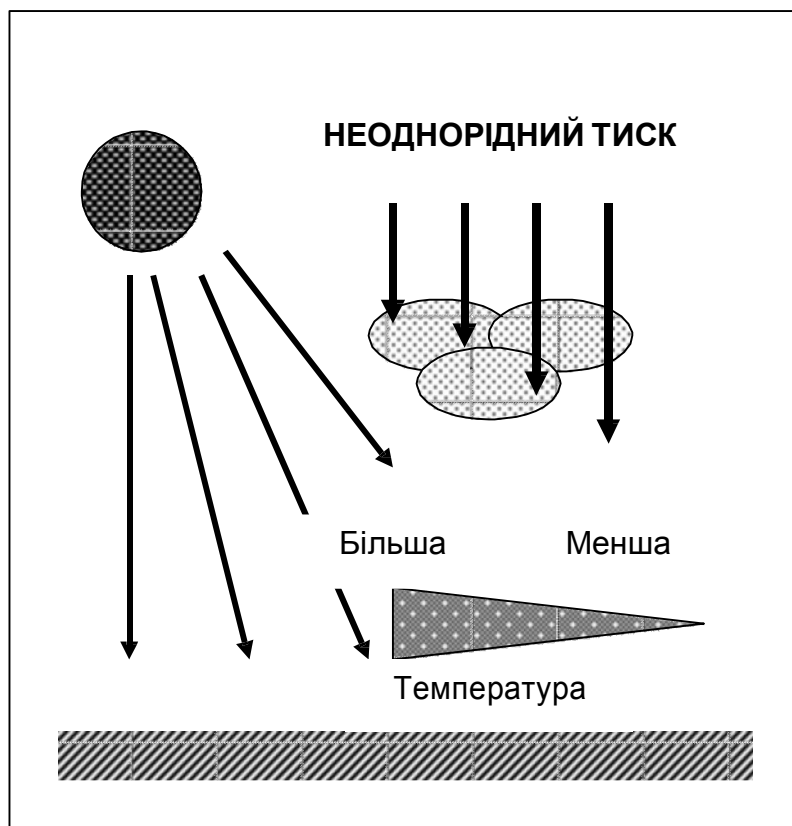


Рис.10.5. Неоднорідний розподіл температури та тиску

#### *Екстремальні значення атмосферного тиску*

Максимальний атмосферний тиск 1094 мбар зареєстровано у 1968 р. у північному Сибіру (СРСР); мінімальний – 850 мбар – під час смерчу в Південній Дакоті, США, у 2003 р.

## 11. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ

**11.1. Традиційні методи вимірювання атмосферного тиску** *Манометр* – це прилад для вимірювання тиску. Манометри можуть бути *сифонного* (рис. 11.1) або *чашечкового* (рис.11.2) типів. Манометр сифонного типу являє собою *U* – подібну скляну трубку, заповнену водою або ртуттю. Один з кінців манометра запаятий і позбавлений повітря; відкритий кінець пов'язаний з атмосферним повітрям. Різниця рівнів рідини у двох колінах трубки проградуєвана у одиницях тиску.

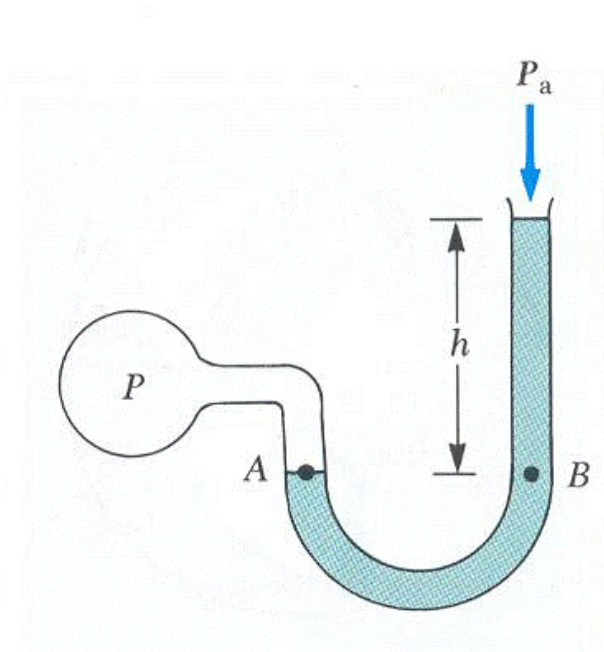


Рис. 11.1. Манометр сифонного типу [Serway, 1992]

Євангеліста Торрічеллі (1608-1647), видатний італійський фізик і математик, першим розробив ртутний манометр чашечкового типу у 1643 році. Манометр чашечкового типу містить вертикальну скляну трубку, запаяну зверху і заповнену рідиною. Нижній кінець трубки занурений у резервуар, що частково заповнений рідиною. Тиск, що утворюється стовпчиком рідини у трубці, зрівноважується атмосферним тиском. Атмосферний тиск, що вимірюється рідинним манометром, дорівнює  $p_A = \rho gh$ , де  $h$  – висота рідинного стовпчика при нормальній температурі.

Вибір робочої рідини визначався з міркувань її густини: густина води (4 °C) становить  $1000 \text{ кг/м}^3$ . У 1646 р. Б. Паскаль (м. Руан, Франція) повторив дослід Торрічеллі, але з вином, яке у Франції дешевше, ніж вода. Густина вина варіює від  $993,1$  до  $1116,4 \text{ кг/м}^3$  (густина сухого вина за рахунок спирту на 10-13 % менша, ніж густина води).

Але з водою або вином висота трубки досягала 14 м. Тоді Торрічеллі запропонував використати як робочу рідину манометра ртуть. Густина ртуті дорівнює  $13600 \text{ кг/м}^3$ . Отже, атмосферний тиск, що вимірюється ртутним манометром, дорівнює:

$$p_A = \rho gh = (13,595 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3)(9,80665 \text{ м/с}^2)(0,76 \text{ м}) = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па.} \quad (11.1)$$

Висока точність вимірювання манометра чашечкового типу (0,1 мм рт ст.) дозволяє використовувати його як стандартний прилад для перевірки анероїдних барометрів та висотомерів.

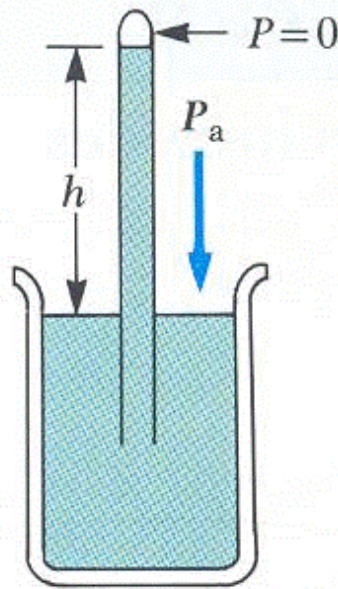
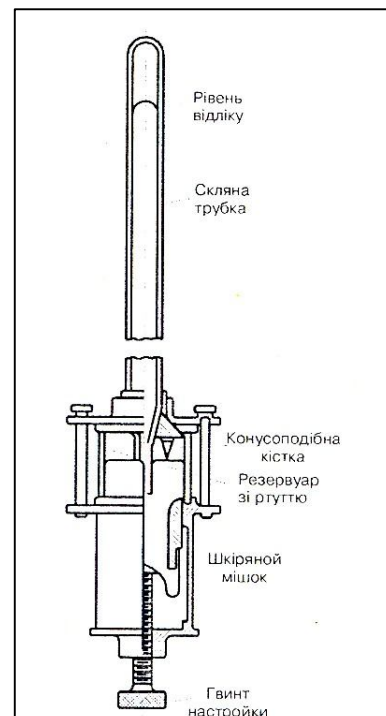


Рис.11.2. Манометр чашечкового типу [Serway, 1992]

Зовнішній вигляд ртутного манометра наведено на рис.11.3. Він містить скляну трубку, заповнену ртуттю, і занурену у резервуар зі ртуттю. Рівень ртуті у резервуарі контролюється за допомогою конусоподібної кістки. Точність вимірювання тиску ртутного манометра становить 0,1 гПа.

Відповідно до директиви Європейського Союзу від 5 червня 2007 було прийнято обмеження продажу ртуті, що практично зупинило виробництво нових ртутних барометрів в Європі.

Рис. 11.3. Ртутний манометр





*Барометр-анероїд* містить анероїдну капсулу, що складається з двох тонких (0,2 мм товщиною) металевих гофрованих мембран (рис.11.4). В середині капсули повітря відкачано (тиск становить  $10^{-2}$  гПа) або капсулу заповнюють інертним газом при тиску 65 гПа.

Кількість капсул в сучасних приладах може досягати 14. Мембрани знаходяться у напруженому стані завдяки гофрованій поверхні та дії пружини.

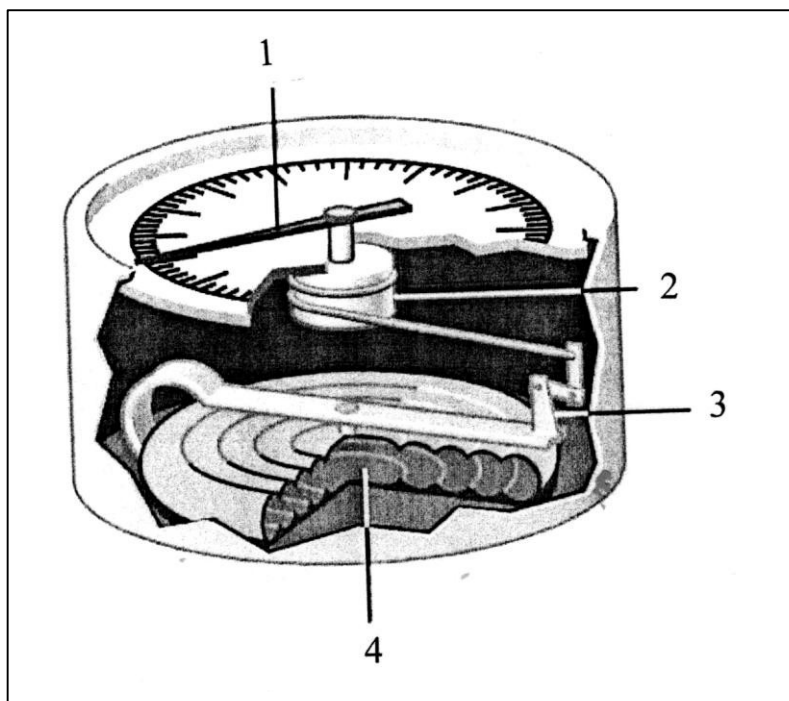


Рис.11.4. **Барометр-анероїд**: 1 – стрілка; 2 – шків; 3 – важіль; 4 – вакуумна камера[[www.stuffintheair.com](http://www.stuffintheair.com)]

Барометр-анероїд БАММ-1 має діапазон вимірювань 80-106 кПа, а похибки вимірювань  $\pm 0,2$  кПа. Барометр-анероїд М-67 характеризується параметрами: діапазон вимірювань 610-790 мм рт.ст., похибки вимірювань –  $\pm 0,8$  мм рт. ст.

Перевагою барометра-анероїда є його компактність, механічна міцність, здатність до транспортування. Ці прилади можуть бути застосовані в системах автоматичного вимірювання тиску, оскільки механічні переміщення анероїдних капсул легко перетворити у електричний сигнал. Недоліком барометра-анероїда є менша порівняно з ртутним барометром точність вимірювань.

*Трубка Бурдона* являє собою плоску викривлену трубку, яка випрямляється при зміні атмосферного тиску (рис. 11.5). Ця трубка еліптичного перерізу є чутливим елементом деформаційного типу. Один кінець цієї трубки відкритий для реєстрації тиску, що вимірюється, тоді як другий жорстко прикріплений до корпусу.

Визначення тиску по деформації трубчастої пружини було запатентовано у 1849 році французьким годинникарем Еженом Бурдоном, іменем якого цю трубчасту пружину називають трубкою Бурдона.

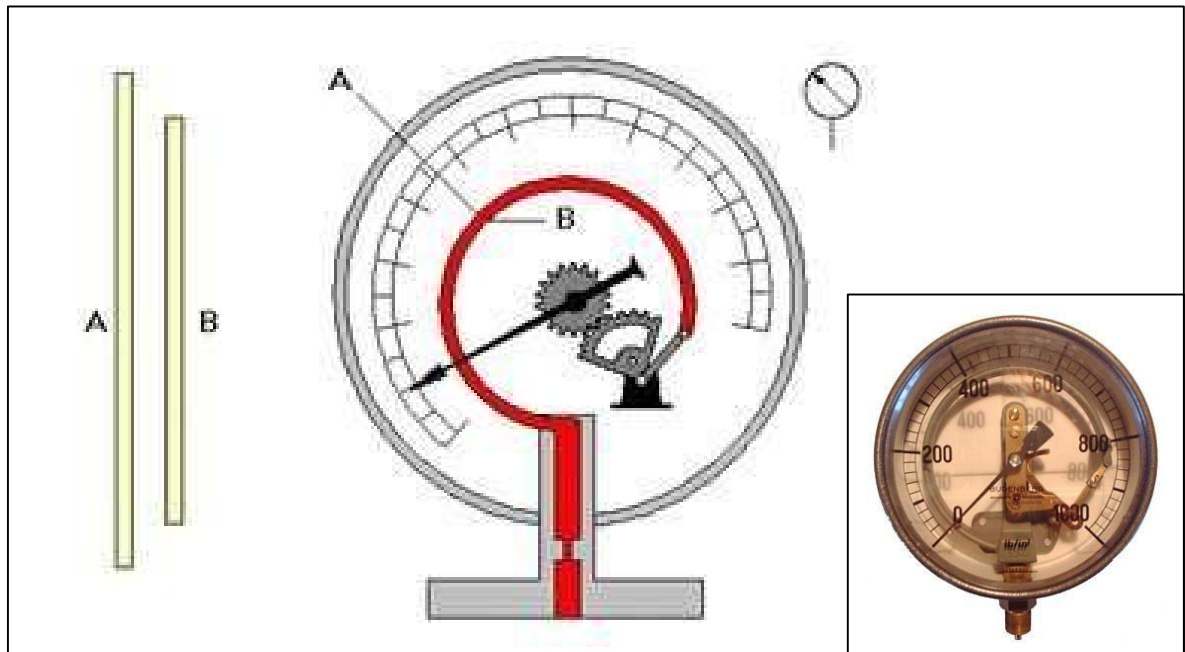


Рис. 11.5. Трубка Бурдона

[[http://images.search.yahoo.com/search/images?\\_adv\\_prop=image&fr=yfp-t-701&va=Bourdon+tube](http://images.search.yahoo.com/search/images?_adv_prop=image&fr=yfp-t-701&va=Bourdon+tube)]

Діапазон вимірювання такого манометра складає — від 10 Па до 1000 МПа. Точність вимірювань трубки Бурдона становить  $\pm 2\%$  від діапазону.

## 11.2. Методи автоматизованого вимірювання атмосферного тиску

*Барограф* — це прилад, що використовується для безперервної реєстрації тиску повітря. Він складається із стовпчика анероїдних коробок, поєднаного зі стрілкою самописа (рис. 11.6).

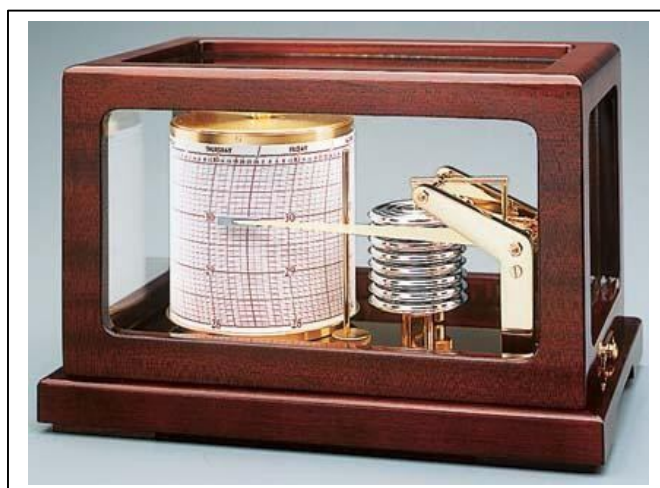


Рис. 11.6. Барограф [[http://www.robertwhite.com/cgi-local/shop.pl?type=item&item=1ba-baltic&categ=rw\\_barographs&nav\\_bar=weather](http://www.robertwhite.com/cgi-local/shop.pl?type=item&item=1ba-baltic&categ=rw_barographs&nav_bar=weather)]



Кожна анероїдна капсула складається з двох тонких (0,2 мм товщиною) металевих гофрованих мембран. Всередині капсули повітря відкачано (тиск становить  $10^{-2}$  гПа) або капсулу заповнюють інертним газом при тиску 65 гПа. Кількість капсул у сучасних приладах може сягати 14. Мембрани знаходяться у напруженому стані завдяки гофрованій поверхні та дії пружини.

*Сенсор на основі вібруючого проводу.* Відомо, що власна частота натягнутої струни збільшується з напругою. Математично відношення між резонансною частотою струни і силою натягу струни визначається за формулою:

$$F = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (11.2)$$

де  $F$  – основна резонансна частота струни (Гц);  $L$  – довжина струни (м);  $T$  – сила натягу струни (Н);  $\mu$  – маса одиниці довжини струни (кг/м).

Механічні переміщення такого проводу під впливом змінного тиску перетворюються в електромагнітні коливання котушки індуктивності внаслідок руху магніту, з'єднаного з проводом (рис.11.7). Для сенсорів такого типу використовують вольфрам, індій або високоеластичну сталь, а також такі сплави, як "елінвар".

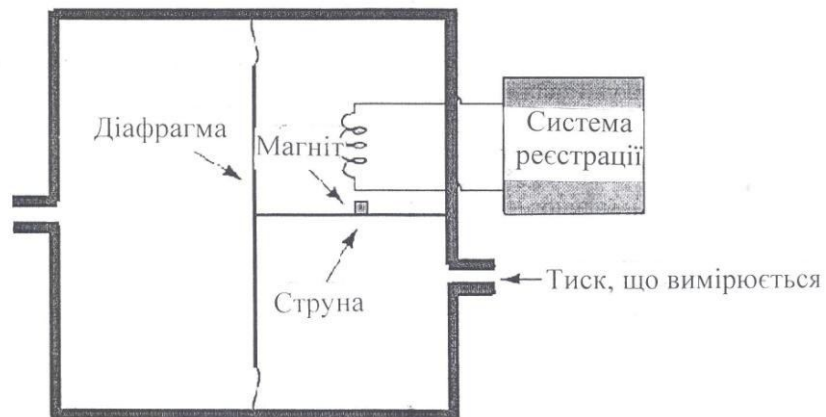


Рис. 11.7. Сенсор на основі вібруючого проводу [Learning Instrumentation and Control Engineering <http://instrumenttoolbox.blogspot.com/2011/02/vibrating-wire-sensors.html>]

Конструкцію одного з таких сенсорів наведено на рис. 11.8. Збільшення тиску на діафрагму знижує силу натягу проводу, що призводить до зменшення резонансної частоти. Резонансна частота коливань проводу зменшується із збільшенням тиску.

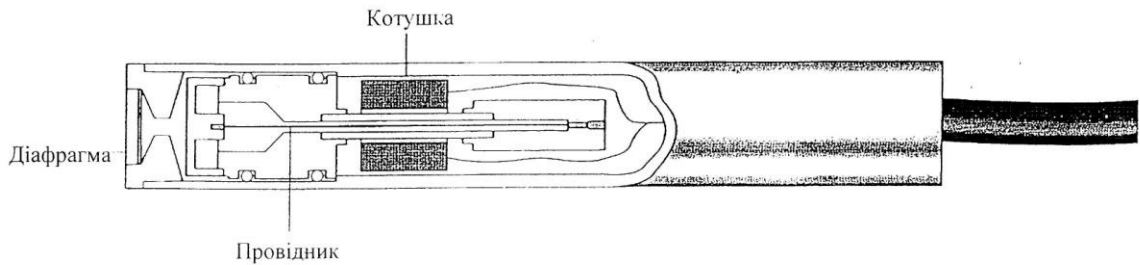


Рис. 11.8. Схема приладу, що діє на основі вібруючого проводу [Vibrating Wire Interface Model AVW100 [http://s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b\\_avw100.pdf](http://s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b_avw100.pdf)]

Ємнісний сенсор тиску складається з тонкої діафрагми, виконаною з металу або кварцу з напиленими металевими поверхнями. Діафрагма утворює з металевими поверхнями два конденсатори, які в сукупності з ще двома конденсаторами C1 і C2 утворюють електричний міст (рис. 11.9).

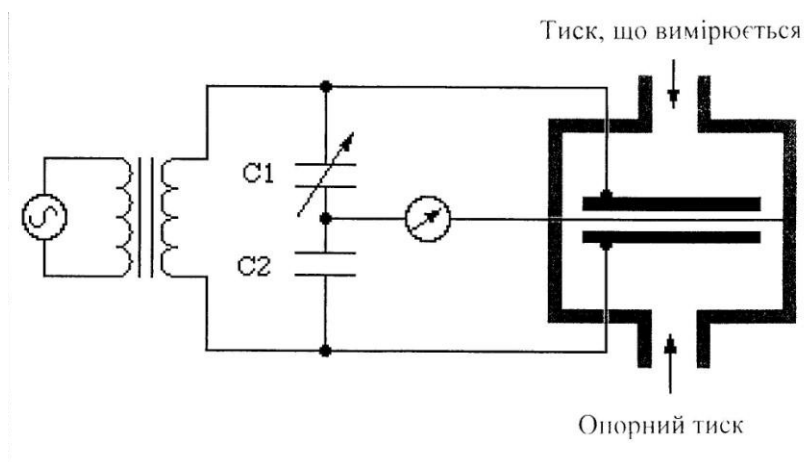


Рис. 11.9. Ємнісний сенсор тиску [Capacitive Pressure Sensors <http://newton.ex.ac.uk/teaching/CDHW/Sensors/>]

Зміни зовнішнього тиску викликають вигин діафрагми і відповідні зміни ємності конденсаторів, утворених діафрагмою і пластинами, розташованими по обидва боки діафрагми. Ці зміни ємності (які можуть досягати декілька відсотків від початкової ємності) призводять до зміни частоти сигналу системи реєстрації, шкала якої проградуєвана в одиницях тиску.

*Цифровий барометричний сенсор тиску.* Цей прилад, виготовлення якого стало можливим завдяки сучасним технологіям, складається з двох кремнієвих пластинок зі сплавів, з'єднаних між собою прошарком діоксиду кремнію (рис. 11.10). Кремнієві сплави виконують функції обкладинок конденсатора, в якому товщина діоксиду кремнію та відповідно ємність конденсатора залежать від прикладеного атмосферного тиску. Ємність

конденсатора  $C$  залежить від відстані  $d$  між обкладками ( $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$ ), яка в свою чергу залежить від атмосферного тиску.

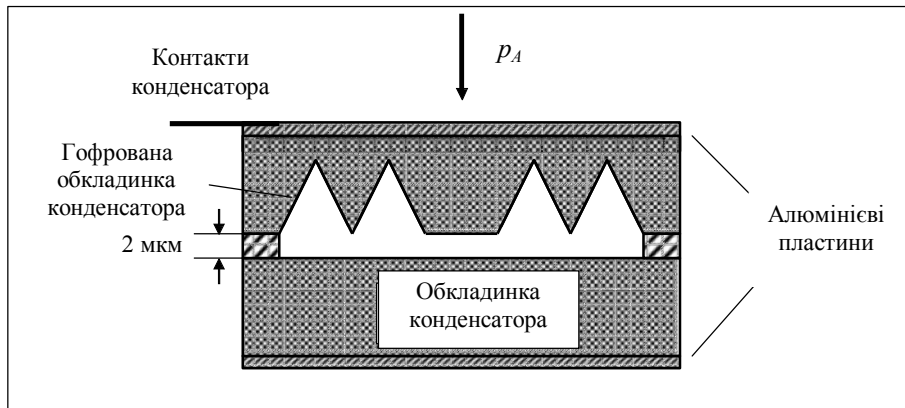


Рис.11.10. Цифровий барометричний сенсор тиску

Діапазон вимірювань тиску барометричним сенсором тиску РТВ210 фірми Vaisala (Фінляндія) –500-1100 гПа; температурний інтервал від –40 °С до +60 °С; загальна точність  $\pm 0,15 - 0,35$  гПа; вага 110 г; розміри 122 мм.

*П'єзоелектричний сенсор тиску.* Кристалічні речовини, в яких при стисненні або розтягненні у певних напрямках виникає електрична поляризація навіть за відсутності електричного поля, називаються *п'єзоелектриками*. Явище виникнення зарядів на поверхні п'єзоелектрика під впливом механічних деформацій називається *прямим п'єзоелектом*, а поява механічних деформацій під впливом електричного поля – *оберненим п'єзоелектом*. До п'єзоелектриків належать кварц, дигідрофосфат амонію (АДР), сульфат літію, сегнетова сіль, титанат барію тощо. П'єзоелектричні перетворювачі знайшли застосування як датчики механічних коливань та вібрацій. Схему п'єзоелектричного сенсора тиску наведено на рис. 11.11.

### П'єзоелектричний сенсор тиску

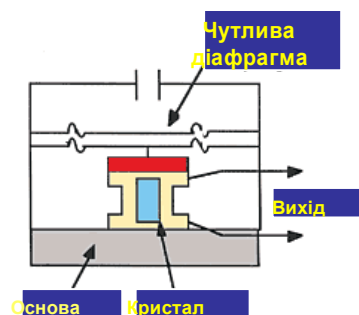


Рис. 11.11. Схе-  
ма п'єзоелектричного  
сенсора тиску

Перевагою п'єзоелектричних сенсорів є компактність, лінійна залежність електричного сигналу від механічного навантаження, здатність мати високу стабільність у широкому температурному діапазоні (до 1000 °С).

### Контрольні запитання та завдання

1. Пояснити, чому тиск атмосфери зменшуються із зростанням висоти над землею поверхнею.
2. Що таке гідростатична рівновага?
3. Записати та пояснити барометричну формулу.
4. Що називають ізобарою?
5. Пояснити рух повітря при однорідному та неоднорідному розподілах температури та тиску.
6. Як працює барограф?
7. Пояснити принцип дії та переваги цифрового барометричного сенсора тиску.
8. Визначити атмосферний тиск на висоті:
  - а. вершини Евересту (8848,82 м);
  - б. траси реактивного лайнера (10650 м);
  - в. вершини Ельбрусу (5633 м);
  - г. нижньої границі стратосфери (20 км).
9. На якій висоті атмосферний тиск зменшується до 0,5 атм? Температура повітря 260 К.
10. Підрахувати вагу повітря в вашій аудиторії, якщо густина повітря дорівнює  $d = 1,2 \text{ кг/м}^3$ .
11. Провести порівняльний аналіз всіх відомих вам барометрів

**Конструктивне питання**

Чим пояснити експоненціальний розподіл атмосферного тиску? Чому атмосферні молекули та частинки не осідають на земну поверхню під дією сили тяжіння?



### Конструктивний тест

1. До яких висот справедлива барометрична формула? Пояснити.

## 12. ВІТЕР

### 12.1. Параметри вітру

До основних параметрів вітру належать швидкість, напрямок та поривчастість.

*Швидкість вітру* вимірюється у м/с, хоча можуть застосовуватися такі одиниці як вузол або км/г.

Залежно від швидкості руху  $v$  розрізняють вітер: помірний ( $v = 5-8$  м/с); сильний ( $v > 14$  м/с); штормовий ( $v = 20-25$  м/с); ураганний ( $v > 30$  м/с). В Антарктиці швидкість вітру сягає 65 м/с, у тропіках – 110 м/с. Швидкість вітру  $v$  залежить від висоти  $h$  над рівнем моря:  $v = 5$  м/с ( $h = 20$  м);  $v = 20-25$  м/с ( $h = 300$  м);  $v = 60-80$  м/с ( $h = 10-17$  км).

*Напрямок вітру* визначають відносно сторін світу та позначають або у *румбах* (загалом їх 16): північний, північно-східний, східний тощо, або у *поділках*: одна поділка має  $5^0$  або  $10^0$  залежно від необхідної точності вимірювань.

*Поривчатість вітру* – це скачкоподібні підсилення та послаблення швидкості  $\Delta v$  вітру;  $\Delta v = \pm 3$  м/с при  $v = 5-10$  м/с; ;  $\Delta v = \pm 5-7$  м/с при  $v = 11-15$  м/с.

### 12.2. Причини виникнення вітру

Рух повітря відносно земної поверхні називається *вітром*. Утворення повітряних потоків відбувається завдяки дії таких причин:

1. *Граденти тиску*, які забезпечують рух повітря від області високого тиску до області низького тиску.

2. *Гравітаційна сила*, яка прискорює рух повітря до величини  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>. Дія вертикального градієнта тиску зрівноважується гравітаційною силою.

3. *Сила тертя*, яка визначається як:

$$F = -\mu v, \quad (12.1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт внутрішнього тертя, який залежить від характеру підстилаючої поверхні;  $v$  – швидкість вітру. Сила тертя пропорційна швидкості вітру та має протилежний останньому напрямок.

4. *Сила Коріоліса*, яка відхиляє напрямок руху повітря (вправо у північній півкулі, вліво – в південній). Визначається ця сила за виразом:

$$F_k = 2\rho v\omega \sin\varphi, \quad (12.2)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $v$  – швидкість руху повітря;  $\omega$  – кутова швидкість обертання Землі ( $7,3 \cdot 10^{-5}$  рад/с);  $\varphi$  – широта місцевості.

Розглянемо причини виникнення сили Коріоліса. У системі відліку, що обертається, матеріальна точка, яка рухається не паралельно до осі цьо-

го обертання, відхиляється за напрямком, перпендикулярним до її швидкості (рис. 12.1). На Землі цей ефект, зумовлений її добовим обертанням, призводить до того, що вільно падаючі тіла відхиляються до сходу, а тіла, що рухаються вздовж земної поверхні, відхиляються в північній півкулі вправо від напрямку руху, у південній – вліво (рис. 12.2). На екваторі  $\sin\varphi = 0$  і  $F_k = 0$ ; на полюсах  $\sin\varphi = 1$ , отже сила Коріоліса максимальна.

5. Відцентрова сила, яка визначається за формулою:

$$F_c = \frac{mv^2}{r}, \quad (12.3)$$

де  $r$  – радіус криволінійної траєкторії. При великих швидкостях та малих радіусах кривизни  $F_c$  може значно перевищувати градієнтну силу (тропічні циклони, смерчі).

Швидкість вітру оцінюється за допомогою *шкали Бофорта*.

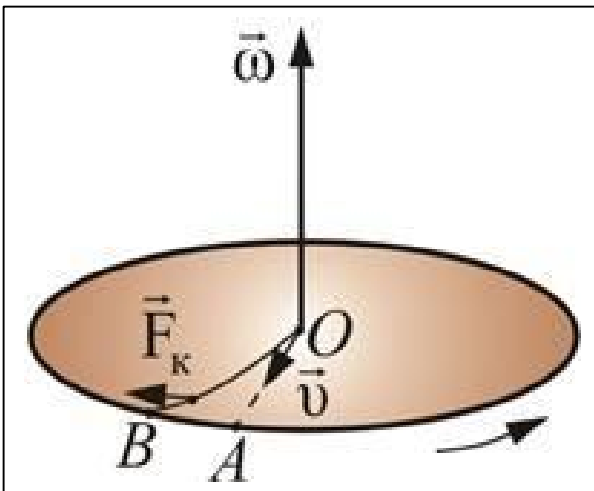


Рис. 12.1. Відхилення матеріальної точки, яка рухається не паралельно до осі обертання, за напрямком, перпендикулярним до її швидкості

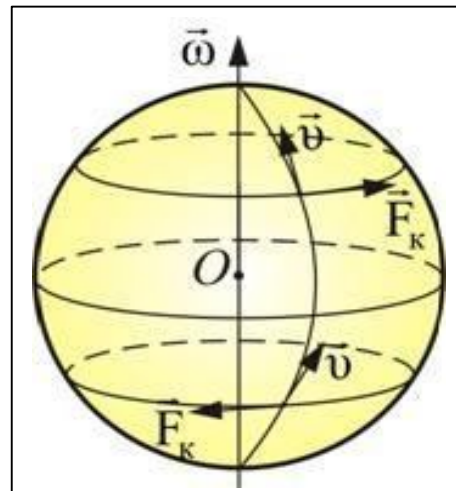


Рис. 12.2. Відхилення тіл, що рухаються вздовж земної поверхні, вправо від напрямку руху в північній півкулі, вліво – у південній

### 12.3. Тиск та вітер

Звичайно під терміном «вітер» ми розуміємо горизонтальний рух повітря. Баланс сил, що характеризує цей рух, визначається рівністю сили  $F_p$ , що викликається градієнтом тиску, та сили Коріоліса  $F_k$ :

$$2\rho v \omega \sin\varphi = \frac{dp}{dn}, \quad (12.4)$$

де  $\frac{dp}{dn}$  – градієнт тиску, тобто зміна тиску відносно ізобари на відстані  $n$ .

Останнє рівняння визначає появу *геострофічного* вітру – ідеалізованої ситуації, яка близька до реальної на висотах від 600 до 1000 м над землею поверхнею (рис. 12.3). Вітер у цьому випадку спрямований вздовж ізобар. Поблизу земної поверхні починає діяти сила тертя, яка залежить від шорсткості та нерівності поверхні. Завдяки цій силі швидкість вітру зменшується, через що сила Коріоліса також зменшується та вже не зрівноважує силу  $F_p$ , що викликається градієнтом тиску. Останню силу зрівноважують дві сили – сила тертя  $F_m$  та сила Коріоліса  $F_k$  (рис. 12.4).

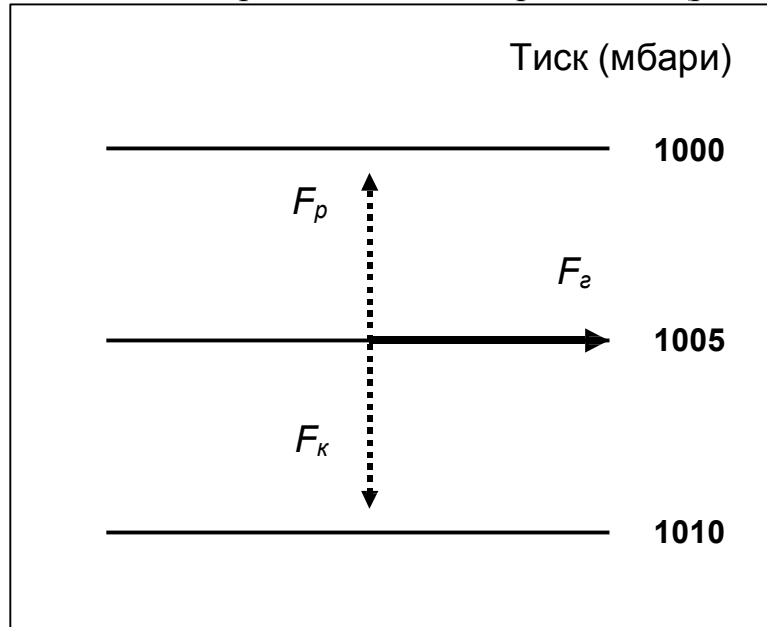


Рис. 12.3. Баланс сил у горизонтальній площі на висоті 600-1000 м над землею поверхнею

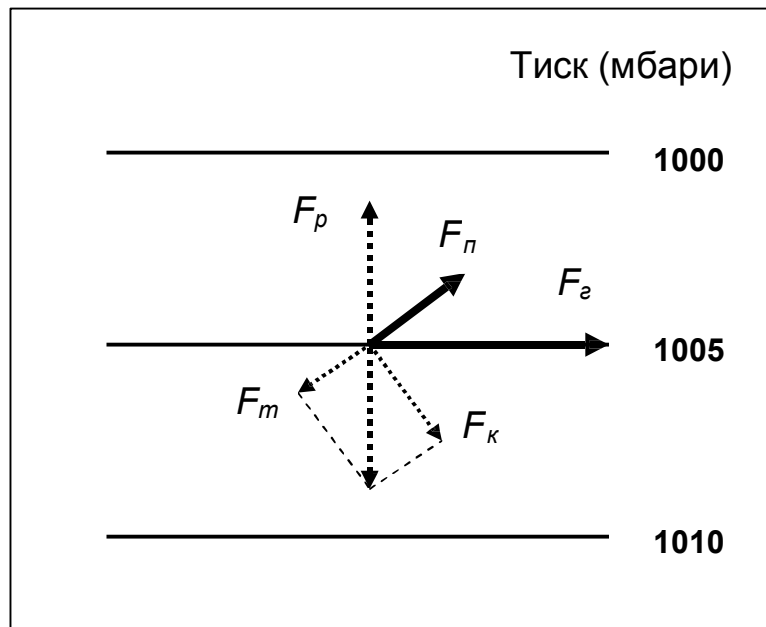


Рис. 12.4. Баланс сил у горизонтальній площі біля земної поверхні

## 13. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІТРУ

### 13.1. Анемометри

Прилади, що визначають швидкість руху повітряних потоків, називаються *анемометрами*. Принцип їхньої дії полягає у перетворенні енергії поступального руху повітря на механічне обертання різноманітних вертушок, вітрових коліс або гвинтів. Найпоширенішими є анемометри чашечкового та пропелерного типів.

Анемометр *чашечкового типу* складається з трьох-чотирьох напівсферичних чашок (рис. 13.1). Порогова чутливість чашечкового анемометра становить від 90 мм/с до 2,24 м/с. Анемометри цього типу прості та чутливі. Анемометр *пропелерного типу* містить три-чотирилопатевий пропелер, вісь якого вказує напрямку вітру (рис. 13.2). Гранична чутливість пропелерного анемометра становить 1,1 м/с; використовують ці прилади для вимірювання швидкості вітру до 90 м/с. Перевагою анемометра пропелерного типу порівняно з чашечковим є його мала вага (пропелер може бути виготовлений з пластмаси), у три рази більша швидкість обертання та можливість вимірювань слабких повітряних потоків.



Рис. 13.1. Анемометр чашечкового типу



Рис. 13.2. Анемометр пропелерного типу

Для перетворення механічних обертань на сигнал, що інформує відносно швидкості вітру, використовують електричні генератори, оптоелектричні або ємнісні перетворювачі.

Передача інформації щодо напрямку вітру в сучасних приладах здійснюється за допомогою потенціометру, зміна положення реохорду в якому призводить до відповідної зміни електричного струму, який проходить через статор приймальної системи, викликаючи обертання ротора цієї системи та стрілки індикатора (рис. 13.3). Точність визначення напрямку вітру потенціометричною системою становить  $\pm 3^{\circ}$ . Збільшити точність можна використовуючи *сільсинову систему* [ 15 ]. Обертання ротора сільсиндавача викликає появу електрорушійної сили, пропорційної синусу кута



обертання, яка призводить до появи електричного струму в статорі сельсин-приймача, відповідного магнітного поля, яке примушує обертатися ротор приймача, що пов'язаний з індикатором.

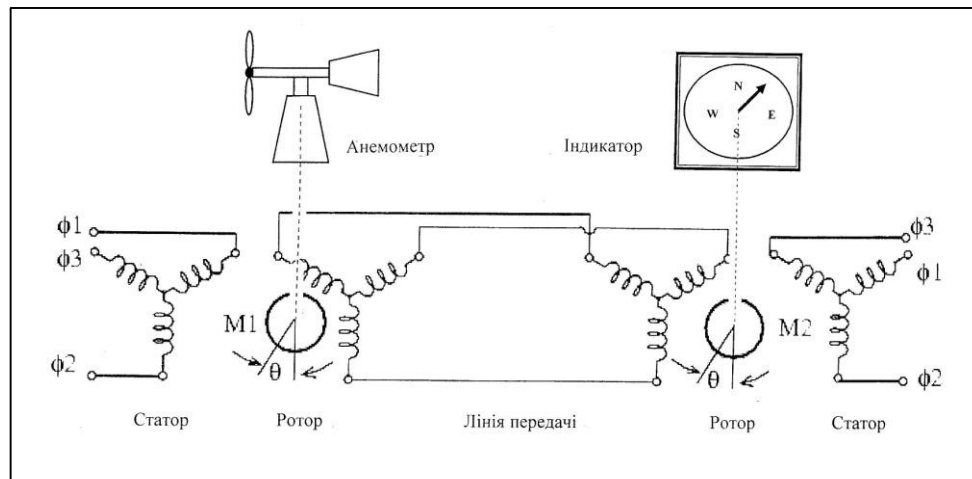


Рис. 13.3. Передача інформації щодо напрямку вітру за допомогою потенціометра

Для одночасного вимірювання швидкості та напрямку руху повітря використовують *анеморумбометр*. Кількість обертань повітряного гвинта цього приладу перетворюється на послідовність електричних імпульсів, частота яких пропорційна швидкості вітру, а фазовий зсув залежить від напрямку.

### 13.2. Термоанемометр

Прилад заснований на реєстрації впливу повітряного потоку на температуру нагрітого провідника або тіла. Анемометри цього типу складаються з тонкого (близько кількох мікрметрів) провідника, по якому пропускають електричний струм. Опір провідника залежить від температури; під час дії вітру температура провідника та його опір зменшуються. Вимірювання опору провідника дає можливість оцінити швидкість вітру.

Термоанемометр більш чутливий, ніж чашечковий анемометр.

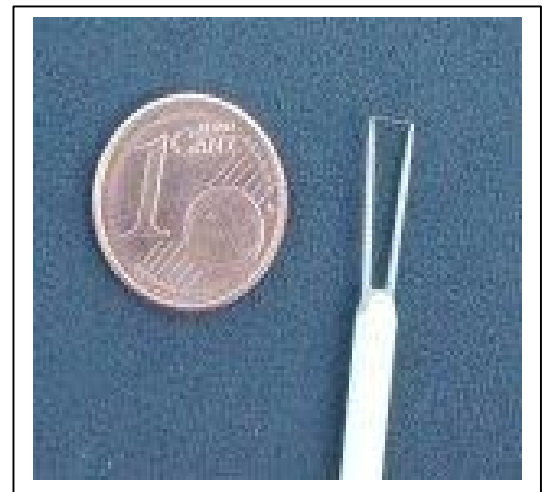


Рис. 13.4. Термоанемометр

### 13.3. Ультразвуковий анемометр

Цей прилад використовує той факт, що звук (ультразвук) поширюється швидше у напрямку, в якому діє вітер.

Ультразвуковий анемометр вимірює три компоненти вітрового вектора у тривимірному просторі (рис. 13.4).

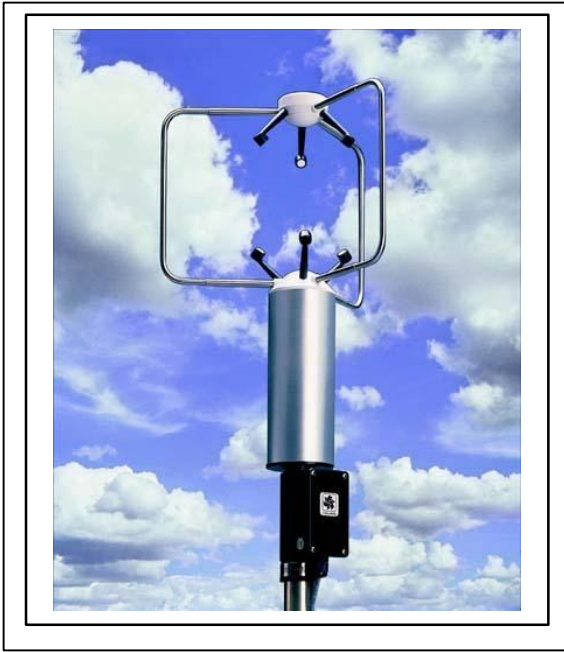


Рис. 13.4. Ультразвуковий анемометр

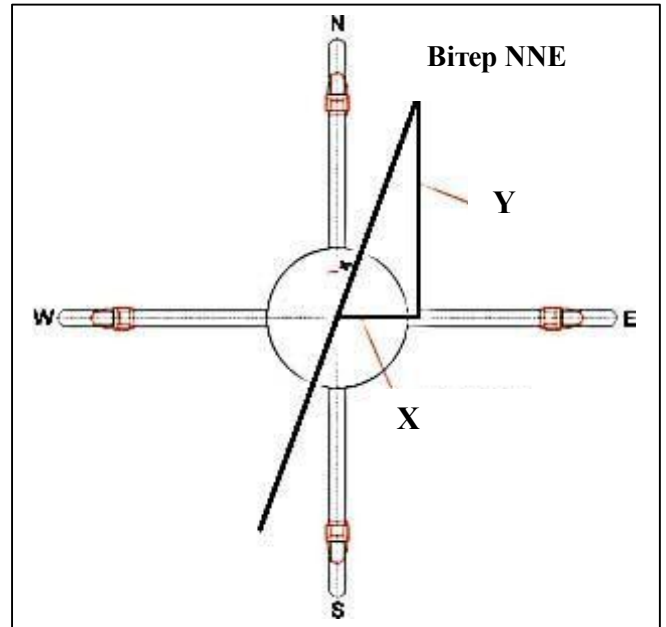


Рис. 13.5. Орієнтація перетворювачів відносно напрямку вітру

Вздовж кожної осі розташовано дві-три пари «передавач-приймач» на відстані 0,1–0,5 м (рис. 13.5).

Передавач посилає неперервні або імпульсні ультразвукові хвилі. Швидкість вітру, яку вимірюють ультразвукові анемометри, сягає 30 м/с.

Час проходження хвилею відстані між передавачем та приймачем залежить від того, збігається чи ні напрямок поширення вітру з ультразвуковою хвилею. Ультразвук поширюється швидше, якщо напрямок його поширення збігається з напрямком вітру, та більш повільно у протилежному випадку. Крім того, ультразвуковий анемометр чутливий до фазових зсувів, які залежать від орієнтації перетворювачів відносно напрямку вітру.

Дистанційне визначення параметрів вітру можна здійснювати за допомогою содарів, лідарів та супутників.

### 13.4. Содар

Ультразвуковий анемометр, призначений для дистанційного вимірювання параметрів вітру, називають також *содаром* (від англ. (**S**ound **D**etection **A**nd **R**anging)). В основі роботи цього приладу лежить так званий *ефект Доплера*: при опромінюванні об'єкта, який рухається зі швидкістю  $v$ , ультразвуковою хвилею певної довжини хвилі  $\lambda$  відбувається розсіювання хвилі, причому частота (довжина хвилі) розсіяної ультразвукової хвилі залежить від швидкості руху об'єкта. Доплерівський зсув  $\Delta\Omega$  частото-

ти ультразвукової хвилі, розсіяної під кутом  $\theta$  об'єктом, що рухається зі швидкістю  $v$ , описується виразом:

$$\Delta\Omega = \frac{4\pi v}{\Lambda} \sin\frac{\theta}{2} \cos\varphi, \quad (13.1)$$

де  $\varphi$  – кут між напрямком швидкості  $v$  і напрямком поширення ультразвукової хвилі. Доплерівські анемометри здатні вимірювати швидкість вітру на висотах до 1 км; точність вимірювання становить 5 %.

Содар, що розташований на земній поверхні, посилає ультразвукові імпульси угору; частота відбитих від атмосфери сигналів набуває доплерівського зсуву, величина якого пропорційна швидкості поширення вітру. Застосування содара надає можливість вимірювати параметри вітру через кожний кілометр висоти до 17 км над рівнем моря.

Недоліком ультразвукових анемометрів є залежність швидкості поширення ультразвуку від температури, вологості, атмосферного тиску, що потребує відповідної калібрування приладів. Крім того, електронне обладнання підвищує вартість приладів цього типу.

### 13.5. Лідар

Лідар (від англ. *LIght Detection And Ranging*) на відміну від содара генерує та реєструє лазерні імпульси. Принцип дії лідара під час дистанційного визначення параметрів вітру полягає у розсіюванні лазерного випромінювання на аерозолях повітря (пилу, краплинах води, частинках пилу або забруднень, пилку або кристалах солей), що рухаються зі швидкістю вітру, та подальшою реєстрацією доплерівського зсуву. Такі лазерні системи дозволяють вимірювати та оцінювати швидкість та напрямок руху вітру та турбулентність повітря на значних висотах (рис.13.6).

Розроблені впродовж останніх років оптоволоконні лазерні системи характеризуються надзвичайно високою ( $10^{-12}$ ) чутливістю.

### 13.6. Супутники

Дистанційне зондування вітру за допомогою супутників дозволяє побудувати карту вітрів на земній поверхні, а також вивчати потоки повітря в атмосфері. Так, у 2012 році Американська космічна агенція (NASA) запустила п'ять ракет з інтервалом 80 с для вивчення високошвидкісних потоків повітря у верхніх шарах атмосфери. Проект отримав назву ATREX (Anomalous Transport Rocket Experiment). Старт відбувся на території випробувального центру на острові Уоллопс у штаті Вірджинія.

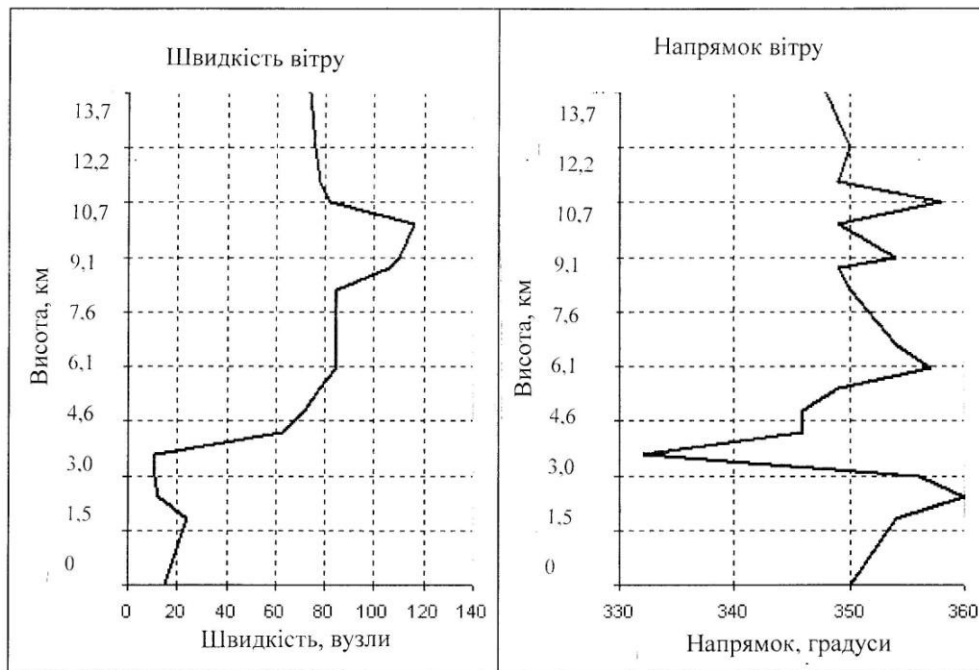


Рис.13.6. Залежність швидкості та напрямку поширення вітру від висоти (Каліфорнія, США)

На висоті близько 80 кілометрів ракети повинні викинути спеціальний реагент (триметилалюміній), який вступає в реакцію з киснем, яка супроводжується світінням (продукти такої реакції – оксид алюмінію, вуглекислий газ і водяна пара – нешкідливі). Спостереження за світінням дозволить вченим спостерігати за повітряними потоками. Найбільший інтерес для вчених становлять високошвидкісні потоки (сотні кілометрів на годину) на висотах 100-110 кілометрів, тобто майже на кордоні з космосом. Традиційними методами вивчати ці потоки складно, оскільки густина повітря на та- ких висотах досить низька.

### 13.7. Визначення напрямку вітру

Визначення напрямку вітру здійснюється *флюгерами*, які являють собою металеву пластину прямокутної форми, що обертається навколо вертикальної осі (рис. 13.7). Для одночасного вимірювання швидкості і напрямку руху повітря використовують *анеморумбометр*. Кількість обертань повітряного гвинта цього приладу перетворюється в послідовність електричних імпульсів, частота яких пропорційна швидкості вітру, а фазовий зсув залежить від напрямку.



Рис. 13.7. Флюгер [<http://tamutimes.tamu.edu/tag/weather-vane/>]

*Вітропоказчик* (показчик напрямку вітру) призначений для візуального визначення напрямку вітру. Складається з тканинної панчохи, яка має форму усіченого конуса, формотворного каркаса і кріпильних елементів (рис. 13.8). Встановлюється на щоглі. Вітропоказчики зазвичай використовуються в аеропортах і на хімічних підприємствах, де є ризик витоку газоподібних речовин.

Рис. 13.9. Вітропоказчик  
[<http://en.wikipedia.org/wiki/Windsock>]



Для визначення домінуючого напрямку вітру використовується *роза вітрів* – векторна діаграма, що характеризує швидкість та напрямок вітру у даному місці за даними багаторічних спостережень. Вона виглядає як багатокутник, у якого довжини променів, що розходяться від центра діаграми в різних напрямках (румбах), пропорційні повторюваності вітрів цих напрямків (рис. 13.10).

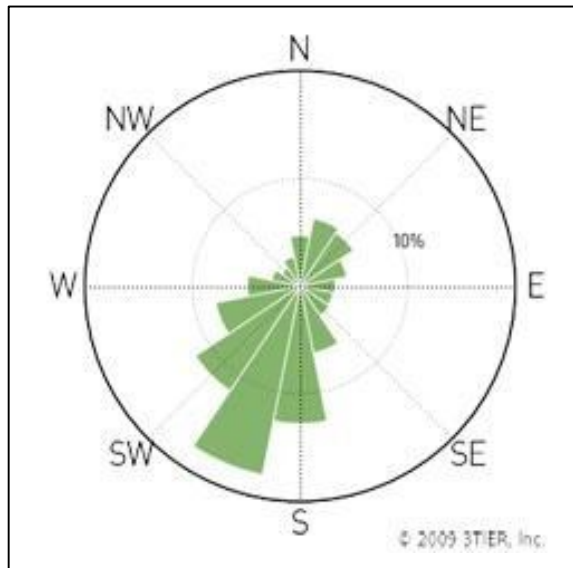


Рис. 13.10. **Роза вітрів** [[http://www.3tier.com/en/package\\_detail/wind-prospecting-tools/](http://www.3tier.com/en/package_detail/wind-prospecting-tools/)]

### ***Екстремальні значення вітру***

Найбільш вітряне місце – це море Співдружності в Антарктиді: швидкість вітру тут сягає 320 км/г.

Найдужчий вітер на земній поверхні – швидкість вітру в 371 км/г зареєстрована на горі Вашингтон (1916 м над рівнем моря), штат Нью-Гемпшир, США, 12 квітня 1934 р.

Рекордна швидкість вітру (333 км/г) на рівнині (44 м над рівнем моря) була зафіксована 8 березня 1972 року на базі ВВС США в Тулі, Гренландія.

Найвища швидкість вітру у смерчі (459 км/г) була зареєстрована в Уїчіто-Фолс, штат Техас, США, 2 квітня 1958 року.

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Назвати основні параметри вітру.
2. Пояснити основні причини виникнення вітру.
3. Як пов'язані тиск та вітер?
4. Що таке геострофічний вітер?
5. Зробити порівняльний аналіз анемометрів чашечкового та пропелерного типів.
6. Пояснити принцип дії термоанемометра.
7. Як працює ультразвуковий анемометр?
8. Пояснити принцип дії содару; лідару.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

### Моделювання зміни швидкості вітру поблизу земної поверхні

Теоретично визначення профілю середньої швидкості вітру у турбулентному граничному шарі було розроблено Прандтлом (Prandtl, 1920) [30]. Відповідно до його теорії флуктуації швидкості у горизонтальному напрямку пов'язані з флуктуаціями швидкості у вертикальному напрямку.

Рівняння, яке описує зміну швидкості вітру з висотою, має вигляд:

$$v(z) = \frac{v^*}{0,4} \ln \frac{z}{z_m}, \quad (1)$$

де  $v^*$  – швидкість тертя (стала величина для поверхневого шару атмосфери (50–100 м));  $z_m$  – параметр шорсткості;  $z$  – висота;  $0,4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  – стала Кармана.

#### Приклад

Розглянути залежність швидкості вітру від висоти над землею поверхнею, якщо швидкість тертя  $v^* = 0,35 \text{ м/с}$ , а параметр шорсткості  $z_m = 0,005 \text{ м}$ .

#### Розв'язання

Будуємо графік  $\ln z = f[v(z)]$  для інтервалу висот  $z$  від  $0,005 \text{ м}$  до  $6 \text{ м}$ .

$z, \text{ м}$	$\ln z$	$\ln(z/z_m)$	$v(z) = 0,875 \ln(z/z_m), \text{ м/с}$
6	1,79	7,09	6,20
4	1,39	6,68	5,85
3	1,10	6,40	5,60
2	0,69	5,99	5,24
1	0	5,30	4,64
0,5	-0,69	4,60	4,03
0,1	-2,3	2,99	2,62
0,05	-2,99	2,30	2,01
0,01	-4,61	0,69	0,61
0,005	-5,30	0	0

Величину  $v^*$  можна знайти з графіка  $\ln(z/z_m) = f[v(z)]$  як нахил залежності  $\ln(z/z_m)$  від  $v(z)$  (рис. 1):

$$\Delta y / \Delta x = \ln(z/z_m) / v(z) = 7,09 / 6,20 = 1,14 = 0,4 / v^*.$$

Звідки  $v^* = 0,4 / 1,14 = 0,35 \text{ м/с}$ .

Величину  $z_m$  можна визначити з графіка  $\ln z = f[v(z)]$ : перетин прямої залежності з віссю ординат дає (рис. 2):

$$\ln z_m = -5,3.$$

Звідки  $z_m = e^{-5,3} = 0,005$ .

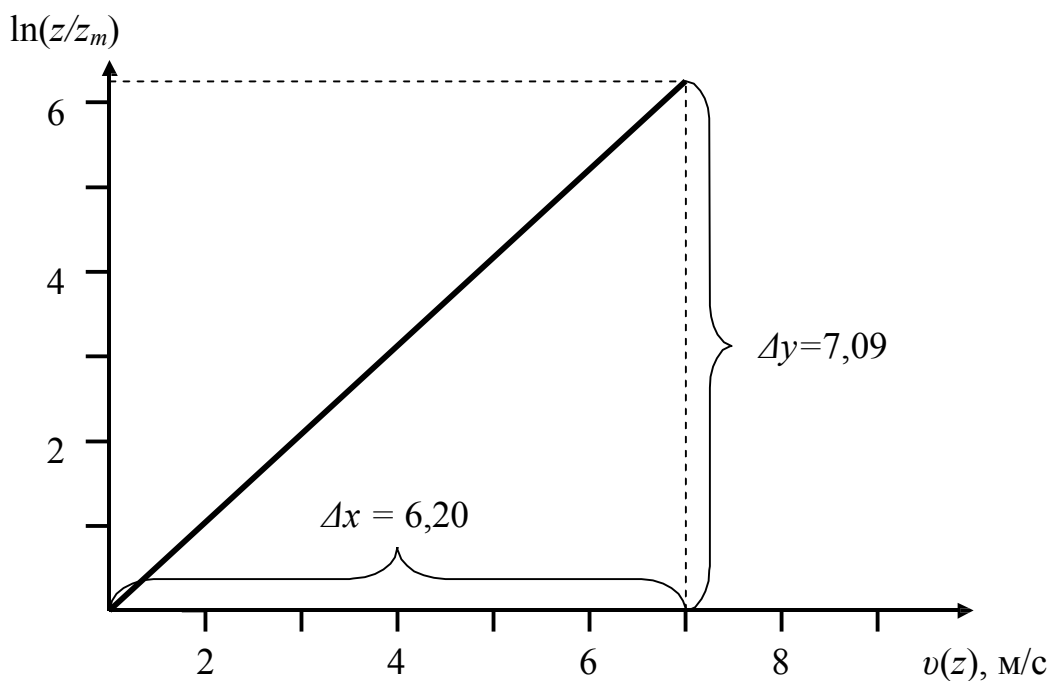


Рис. 1. Розподіл швидкості вітру поблизу земної поверхні: графік залежності  $\ln(z/z_m) = f[v(z)]$

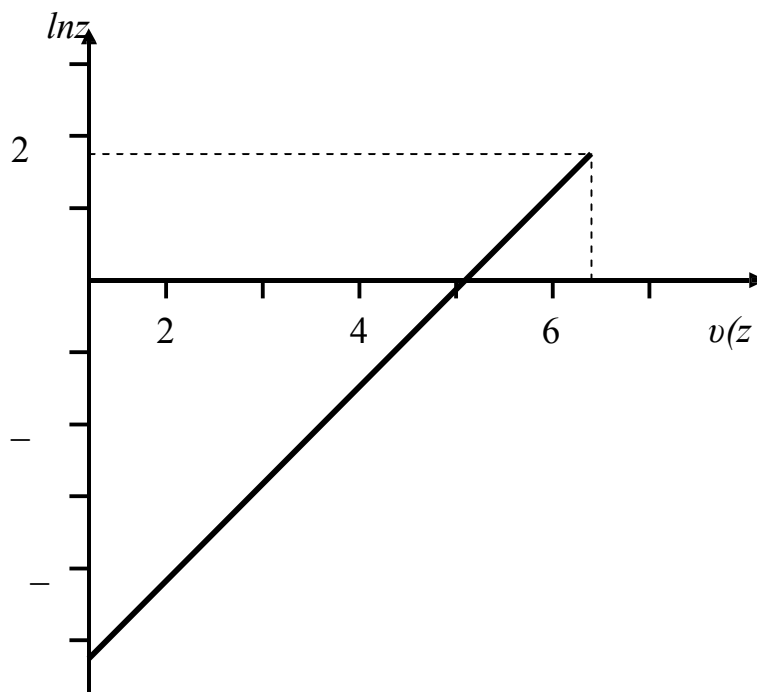


Рис. 2. Розподіл швидкості вітру поблизу земної поверхні: графік залежності  $\ln z = f[v(z)]$

Таким чином, можна дійти таких висновків:

1. Дослідження швидкості вітру поблизу земної поверхні дає можливість знайти величину  $v^*$  з графіка  $\ln(z/z_m) = f[v(z)]$  як нахил кривої  $\Delta y / \Delta x = \ln(z/z_m) / v(z)$ .
2. Дослідження швидкості вітру поблизу земної поверхні дає можливість визначити з графіка  $\ln z = f[v(z)]$  величину  $z_m$ : перетин прямої залежності з віссю ординат дає  $\ln z_m$ .



## Моделювання зміни швидкості вітру у рослинному покриві

Розглянемо рух повітряних потоків у рослинному покриві. Припустимо, що швидкість вітру на поверхні ґрунту дорівнює нулю, збільшується з висотою до постійного значення. Рівняння, яке описує зміну швидкості вітру з висотою, має вигляд:

$$v(z) = \frac{v^*}{0,4} \ln \frac{z-d}{z_m}, \quad (2)$$

де  $d$  – зміщення нульової поверхні.

Рівняння (2) правильне за умови, що  $z \geq z_m - d$ . Параметр  $v^*$  має розмірність швидкості.

### Приклад

Чому дорівнює швидкість тертя, якщо швидкість вітру на висоті 2 м над картопляним полем висотою 60 см становить 4 м/с, параметр шорсткості дорівнює  $4 \cdot 10^{-2}$ , а зміщення нульової поверхні дорівнює 1,2 м.

### Розв'язання

Підставляємо числові дані у рівняння (2):

$$v(z) = \frac{v^*}{0,4} \ln \frac{2,6-1,2}{0,04} = \frac{v^*}{0,4} \ln 35 = v^* \cdot 8,9 = 4 \text{ м/с.}$$

Звідки:

$$v^* = \frac{4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{8,9} = 0,45 \text{ м/с.}$$

### Приклад

Побудувати графіки залежності  $\ln[(z-d)/z_m] = f[v(z)]$ ,  $\ln(z-d) = f[v(z)]$  та  $z = f[v(z)]$  для таких параметрів: параметр шорсткості  $z_m = 0,2$  м; зміщення нульової поверхні  $d = 1,4$  м; швидкість тертя  $v^* = 0,9$  м/с. Інтервал зміни висоти  $z$  від 1,6 м до 6 м. Знайти графічно величини зміщення нульової поверхні  $d$ , параметр шорсткості  $z_0$  та швидкість тертя  $v^*$ .

### Розв'язання

Підставляємо у рівняння (2) числові дані, починаючи з  $z = 6$  м:

$$v(z) = \frac{v^*}{0,4} \ln \frac{z-d}{z_m} = \frac{0,9 \text{ м/с}}{0,4 \text{ м/с}} \ln \frac{6-1,4}{0,2} = 2,25 \ln 23 = 2,25 \cdot 3,135 = 7,05 \text{ м/с.}$$

Визначаємо величини:  $z-d = 6-1,4 = 4,6$  м;  $\ln(z-d) = \ln 4,6 = 1,53$ ;  
 $\ln[(z-d)/z_m] = \ln(4,6/0,2) = 3,1$ .

Аналогічні розрахунки проводимо для  $z = 4$  м; 3 м; 2 м; 1,75 м; 1,6 м; результати зводимо у таблицю:

$z$ , м	$v(z)$	$z-d$ , м	$\ln(z-d)$	$\ln[(z-d)/z_m]$
6	$2,25 \cdot 3,135 = 7,05$	$6-1,4 = 4,6$	$\ln 4,6 = 1,53$	$\ln(4,6/0,2) = 3,1$
4	5,76	2,6	0,96	2,56
3	4,69	1,6	0,47	2,08
2	2,47	0,6	-0,51	1,1
1,75	1,26	0,35	-1,05	0,56
1,6	$x = 0$	0,2	-1,61	0

Будуємо залежність  $\ln[(z-d)/z_m] = f[v(z)]$ , з нахилу якої знайти швидкість тертя  $v^*$   
 (рис. 3):  $v^* = \frac{0,4v(z)}{\ln \frac{z-d}{z_m}} = \frac{0,4}{0,44} = \frac{0,4}{0,44} = 0,9 \text{ м/с.}$

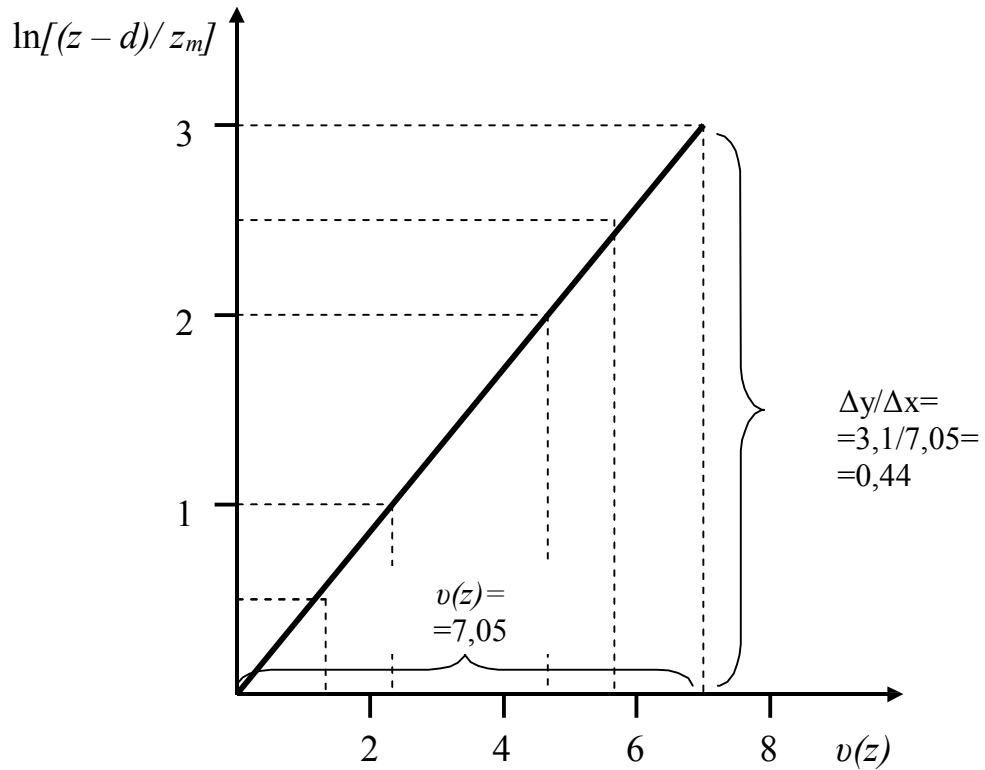
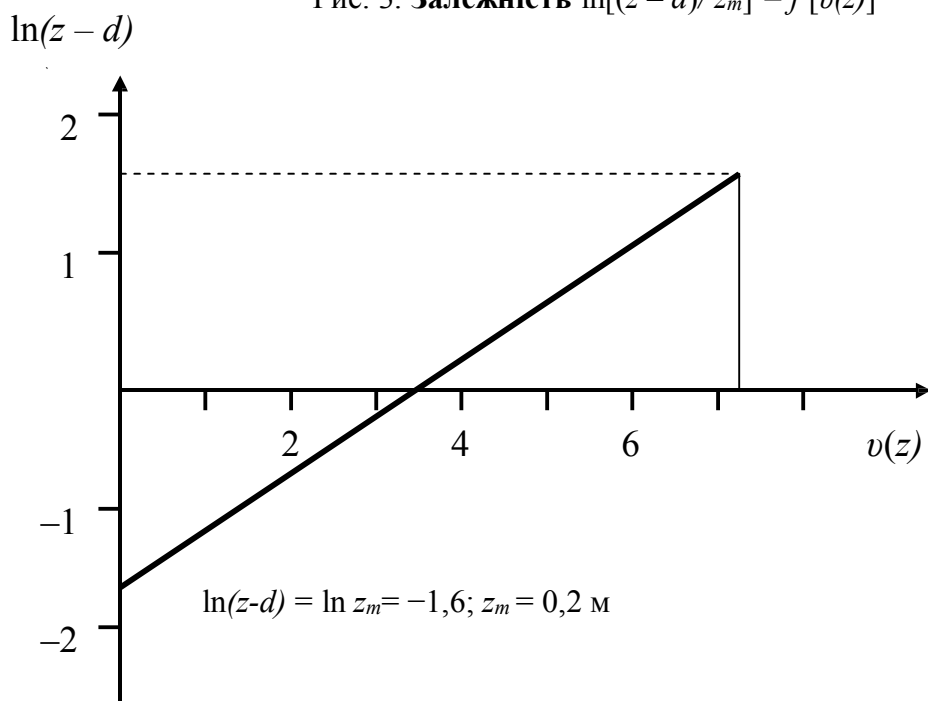


Рис. 3. Залежність  $\ln[(z-d)/z_m] = f[v(z)]$



Будуємо графік залежності  $\ln(z-d) = f[v(z)]$  (рис. 4).

Профіль швидкості вітру над рослинним покривом  $z = f[v(z)]$  наведено на рис. 5.

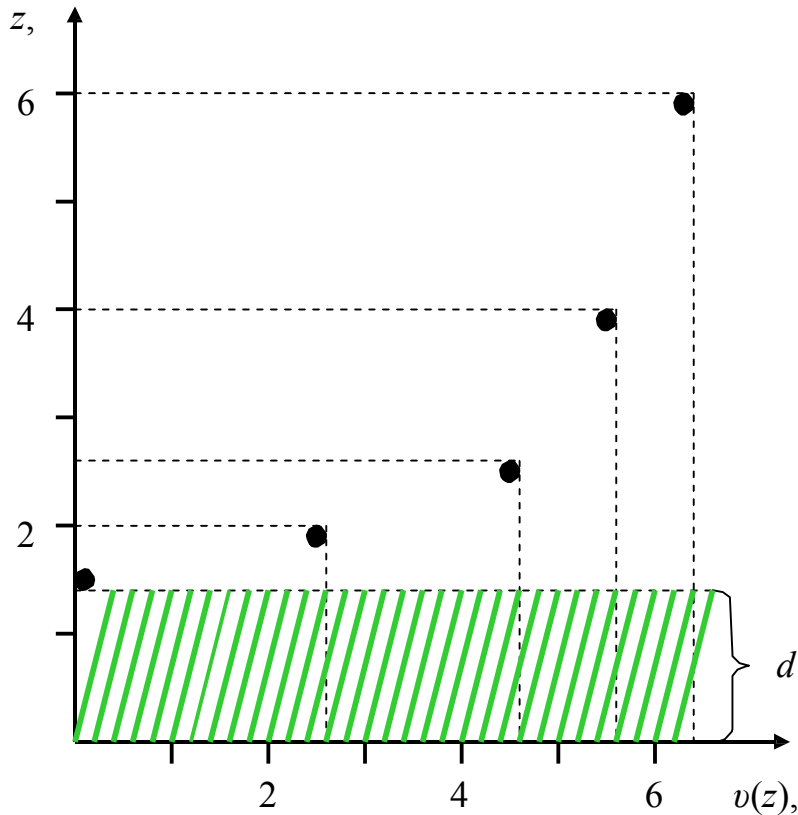


Рис. 5. Профіль швидкості вітру над рослинним покривом

Знаходимо значення  $\ln(z - d)$ , що відповідає  $v(z) = 0$ :

$$0 = \frac{v^*}{0,4} \ln \frac{z - d}{z_m} = \frac{0,9 \text{ м/с}}{0,4 \text{ м/с}} [\ln(z - d) - \ln z_m] = 2,25 [\ln(z - d) - \ln z_m]$$

Звідси:

$$\ln(z - d) = \ln z_m = -1,6; \quad z_m = 0,2 \text{ м.}$$

Отже, можна дійти таких висновків:

1. Якщо земна поверхня покрита рослинним покривом висотою  $h$ , можна припустити, що нульовий рівень підійметься на висоту  $d < h$ .

2. Величина параметра  $v^*$  пропорційна швидкості вітру на висоті  $z$ ; величину  $v^*$  можна знайти з графіка  $\ln[(z - d)/z_m] = f[v(z)]$ , як  $v^* = \frac{0,4v(z)}{\ln \frac{z - d}{z_m}} = \frac{0,4}{\text{tg} \frac{\Delta y}{\Delta x}}$ .

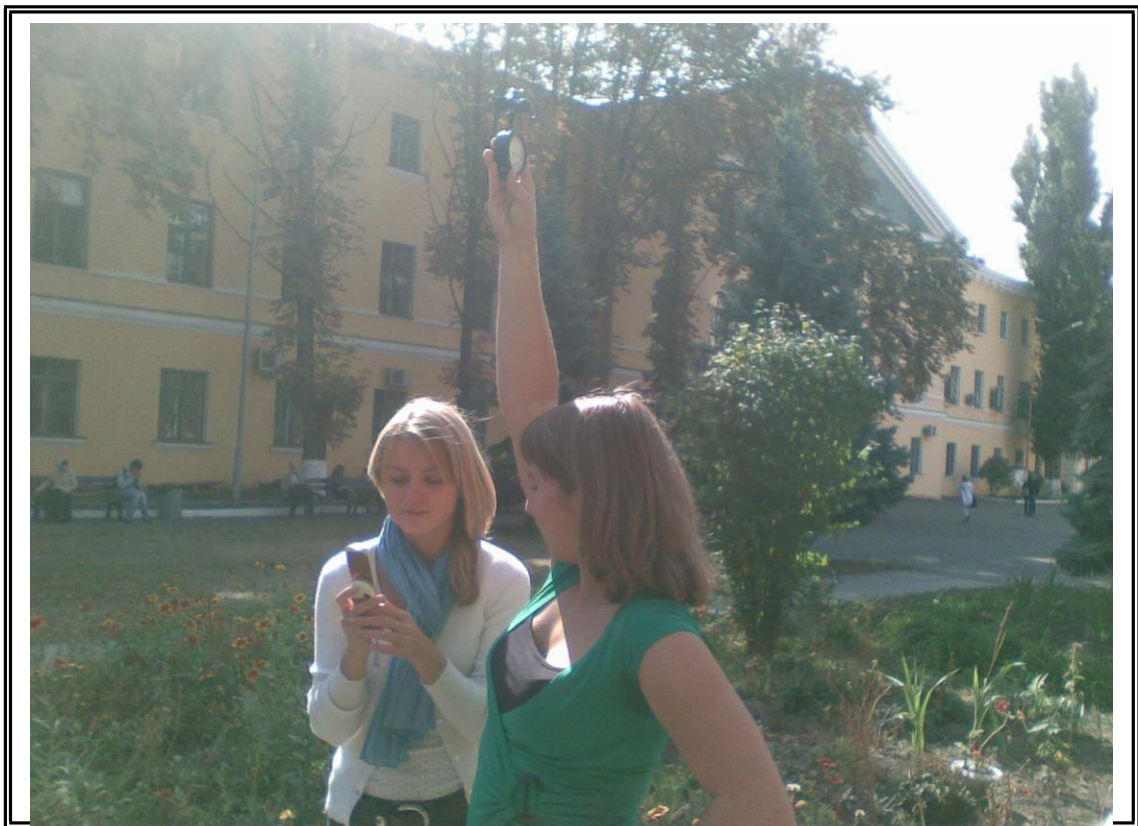
3. Параметр шорсткості  $z_m$  має розмірність довжини, але його не слід інтерпретувати як фізичну величину, що вимірюється. Цей параметр визначається емпірично шляхом визначення швидкості вітру на різних висотах та екстраполяції прямої залежності  $\ln(z - d) = f[v(z)]$  в область  $v(z) = 0$ . Перетин цієї прямої з віссю ординат дає значення  $\ln z_m$ , звідки можна знайти  $z_m$ .

### Контрольні завдання

Побудувати графіки залежності  $\ln[(z - d)/z_m] = f[v(z)]$ ,  $\ln(z - d) = f[v(z)]$  та  $z = f[v(z)]$  для поверхні з параметрами, що відповідають певному варіанту.

Визначити з графіку величину параметра шорсткості  $z_m$  та швидкість тертя  $v^*$ .

№ варіанту	Тип поверхні	$d$ , м	$z_m$ , м	$v^*$ , м/с
1	Лід	0,0006	$10^{-4}$	0,06
2	Водна поверхня	$4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	0,06
3	Рівна пустеля	$10^{-4}$	$10^{-4}$	0,05
4	Хвойний ліс	7	1,1	0,5
5	Бавовна висотою 1,3 м	0,8	$1,3 \cdot 10^{-1}$	0,4
6	Цитрусовий сад	2,5	$4 \cdot 10^{-1}$	0,4
7	Село	3,25	$5 \cdot 10^{-1}$	0,45
8	Місто	20	1,75	0,5
9	Густа трава висотою 50 см	0,65	0,1	0,2
10	Поверхня спокійного моря	0,03	$5 \cdot 10^{-3}$	0,08
11	Сніговий покрив	0,15	0,02	0,07
12	Ґрунт	0,4	0,06	0,25



## 14. МОНІТОРИНГ ЦИКЛОНІВ

### 14.1. Механізми виникнення циклонів

Зони зменшеного тиску відносно оточуючого простору, називаються *центрами низького тиску*. Саме вони відповідають за появу циклонів. *Циклон* – це атмосферний вихор надзвичайного (до кількох сот або тисяч км) діаметра зі зменшеним тиском повітря у центрі.

Циклони утворюються на фронтах, що розділяють повітряні маси різного походження (наприклад, повітря Арктики та помірних широт). Вітер у циклоні дме від периферії до центру. У центральній частині повітря підіймається догори, де розширюється, охолоджується. Водяна пара конденсується та утворює хмари; починаються опади (рис. 14.1). Циклони супроводжуються непогожою, вітряною та хмарною погодою: улітку – дощитиме, прохолодно внаслідок хмарності; узимку – відлиги, снігопади.

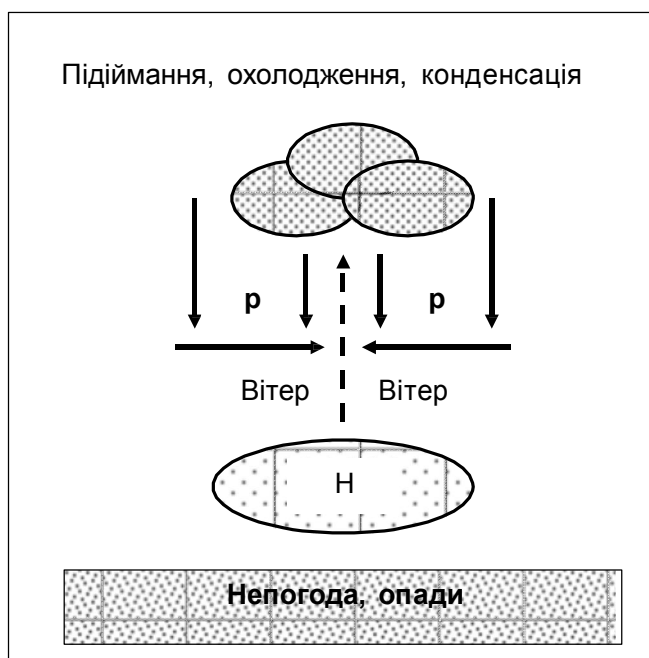


Рис. 14.1. Механізми виникнення циклонів

Повітря у циклоні циркулює проти годинникової стрілки у північній півкулі (рис. 14.2).

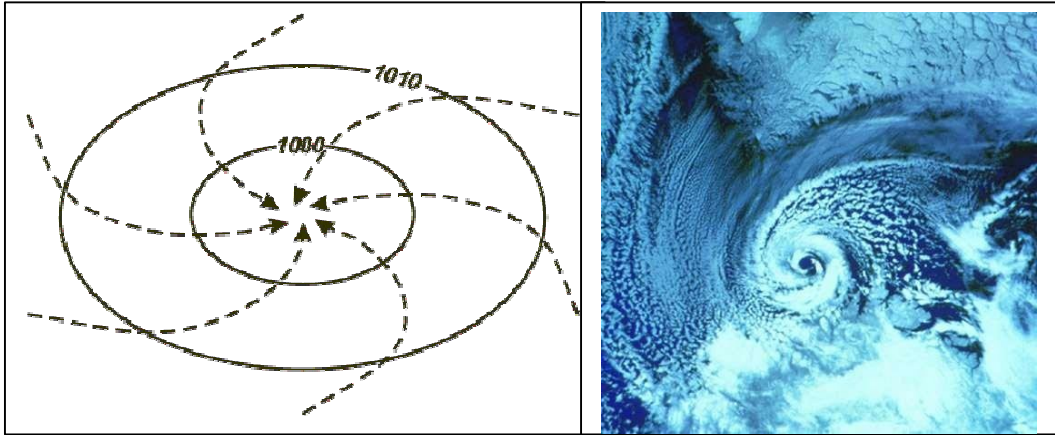


Рис. 14.2. **Механізми виникнення циклону:** *a* – циркуляція повітря у циклоні проти годинникової стрілки у північній півкулі; *b* – зовнішній вигляд циклону з супутника

#### 14.2. Механізми виникнення антициклонів

Зони, де тиск перевищує оточуючий тиск, називаються *центрами високого тиску*. Ці зони пов'язані з антициклонами. *Антициклон* – це вихровий рух повітря з високим тиском у центрі за годинниковою стрілкою у північній півкулі, проти годинникової стрілки у південній. Вітер рухається від центру до периферії. Крім того, діє сила Коріоліса, що забезпечує обертання повітряного потоку.

Антициклони утворюються в області підвищеного тиску (1020-1030 гПа). Вітер спрямований від області високого тиску у зовнішній простір, оскільки густина повітря у центрі вища. Повітря, що залишає центр, замінюється повітрям, що протікає у верхніх шарах атмосфери. Це повітря опускається та нагрівається, через що хмари розсіюються (рис. 14.3). Антициклони супроводжуються ясною безхмарною погодою; улітку – спека, узимку – мороз.

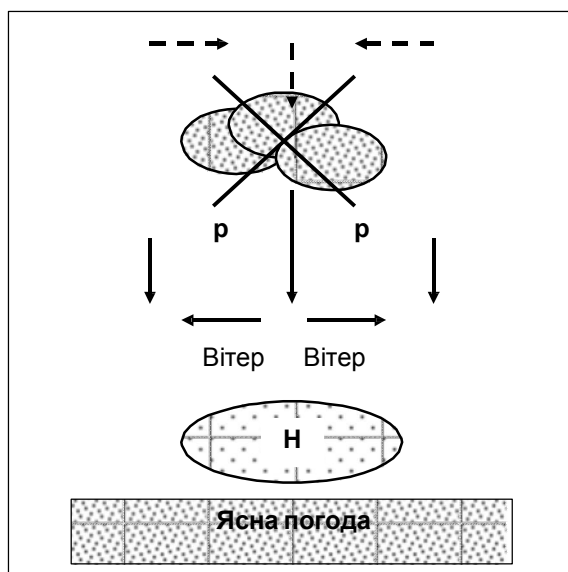


Рис. 14.3. **Механізм утворення антициклону**

*Тропічний циклон* — тип циклону або погодної системи низького тиску, що виникає над теплою морською поверхнею та супроводжується потужними грозами, випадінням зливових опадів та вітрами штормової сили.

Тропічні циклони класифікуються так: якщо максимальна швидкість вітру не перевищує 63 км/г, таке явище називають *тропічною депресією*; якщо швидкість вітру більша, ніж 63 км/ш, має місце *тропічний шторм*. Кожний тропічний шторм, швидкість вітру під час якого досягає 17 м/с або 62 км/г, отримує власне ім'я.

Залежно від місця дії та інтенсивності тропічні циклони називаються ураганом, тайфуном, сильним тропічним циклоном, сильним тропічним штормом. Швидкість вітру при цьому перевищує 119 км/г.

Так, в Атлантичному та Східно-Північному регіонах імена ураганів надаються за алфавітом; «стать» урагану, що відповідає даному імені, підбирають так, щоб у першому непарному році застосовувалося жіноче ім'я, тоді як у парному році – чоловіче. Але з 2000 року у північно-західному регіона Тихого океану можливе використання назв тварин, квітів, астрологічних знаків та ін. В Японії тайфунам надають числові дані: так, наприклад, тайфун *Songda*, що відбувся у вересні 2004 року, маркерується як тайфун 0418 (**18-й тайфун у 2004 році**).

*Урагани* – тропічні циклони, швидкість яких досягає 119 км/г. Термін «ураган» притаманний екстремальним вітрам, що виникають у північній Атлантиці; аналогічні явища у Тихому океані називають «*тайфунами*». Тривалість ураганів від 1 до 30 днів. Оцінюють урагани згідно *шкалі Сафіра-Сімсона*.

*Смерч* – сильний маломасштабний вітер з вертикальною віссю, що має велику швидкість обертання. В Америці його називають *торнадо*. Причиною смерча є великі градієнти тиску, нестійкість нижнього шару атмосфери (до 2 км), яка виникає при зіткненні сухих холодних повітряних мас з теплими і вологими. Діаметр смерча сягає 100 м над водною поверхнею, від декількох десятків метрів до декількох сот метрів – над земною поверхнею. Висота смерчу – 100 м. Характерна особливість – спіралеподібний рух повітря навколо вертикальної осі. Швидкість руху становить 50–100 м/с, а інколи 250 м/с, причому є вертикальна компонента швидкості величиною 70–90 м/с. Тривалість смерчу – від декількох хвилин до декількох годин. Як приклади можна навести смерчі в США: в 1925 р., коли загинуло 695 людей і в 1999 р., який спричинив загибель десятків людей.

Для оцінки смерчів використовують *шкалу Фудзі*.

*Суховій* – вітер, що виникає при високій температурі (більше 25 °С) і вкрай низькій відносній вологості (менше 30 %). Спостерігаються суховії у степових та лісостепових зонах. Швидкість руху повітря сягає 5–20 м/с.

*Пилові бурі* виникають на оголених земельних ділянках, на розпиленому і висушеному ґрунті, на розорених схилах. Основним фактором, що сприяє пиловій бурі, є сильний вітер (понад 10 м/с) та відносна вологість, що не перевищує 50%.



В Україні в степовій зоні щорічно приходиться 4-5 днів з пиловими бурями, а в деяких областях – 10–15 днів на рік. Пилові бурі видувають на весні родючий ґрунт; сильні пилові бурі спостерігалися в Україні у квітні 1928 р. й у березні-квітні 1960 р.

#### 14.4. Спостереження за циклонами

Постійні спостереження за тропічними циклонами в зоні Аравійського моря та Бенгальської затоки проводять за допомогою супутників, зокрема Індійського геостационарного супутника INSAT та радіолокаційної системи детектування циклонів (рис. 14.4).

Можливе перереміщення штормів передбачається на основі аналізу накопиченої за 125 років кліматологічної інформації щодо параметрів циклонів та моделювання можливої часової та просторової динаміки циклонів.

В Атлантичному регіоні (Північний Атлантичний океан, Карибське море, Мексиканська затока) функціонує Центр Передбачення Клімату (Climate Prediction Center, CPC), Національний Центр Ураганів (National Hurricane Center, NHC), Дослідницький Відділ Ураганів (Hurricane Research Division, HRD), Авіаційний Операційний Центр (Aircraft Operations Center) Національної Адміністрації Океанів та Атмосфери (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA).

У тихоокеанському регіоні за екстремальними погодними ситуаціями слідкує Об'єданий Центр Попередження Тайфунів (The Joint Typhoon Warning Center, JTWC), розташований на базі США Пірл-Харбор, Гавайські острови. Сферою спостережень є північно-західна та південна частини Тихого океану, а також Індійський океан (Northwest Pacific/North Indian Ocean Tropical Systems).

Для визначення та прогнозування динамічного розвитку тропічних циклонів застосовують авіаносії, зонди, супутники, радіолокаційну техніку, морські станції спостереження (рис. 14.5).

Рис.14.5. Морська станція NOAA Sentinel спостереження за ураганами

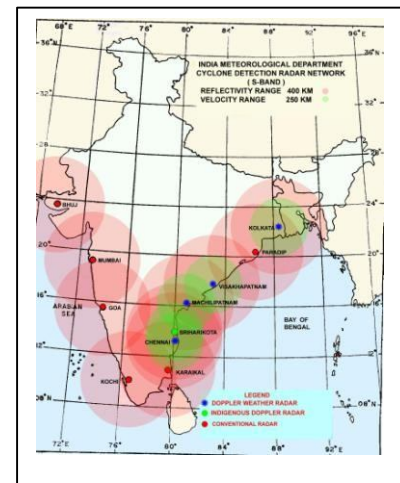


Рис. 14.4. Детектування циклонів на узбережжі Індії

Дуже широко застосовується на основі накопичених даних та досвіду моделювання ймовірних стресових ситуацій, яке надає можливість пере-



дбачити інтенсивність, швидкість та напрямок руху тропічного циклону (рис. 14.6).

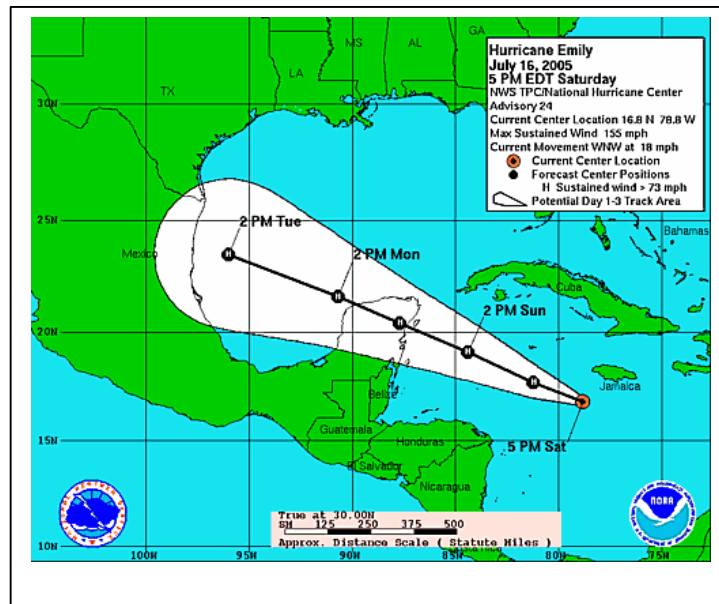


Рис. 14.6. Схема поширення урагану Емілі у 2005 р.

Безпосередні вимірювання параметрів циклонів у реальному часі можливі завдяки польотам розвідувальних літаків; так, наприклад, такі польоти здійснюються у зоні Атлантичного басейну літаками WC-130 Hercules та WP-3D Orions, які здатні проникати в область циклону та здійснювати безпосередні та дистанційні вимірювання. Крім того, з цих літаків можна запускати GPS-зонди для визначення температури, вологості, тиску та вітру у просторі між літаком та поверхнею океану.

У 2005 році під час проходження узбережжя Вірджинії циклоном Офелія було запущено безпілотний літак, який продемонстрував можливість отримання інформації щодо циклону на невеликих висотах та поблизу водної поверхні.

Спостереження за циклонами на основі застосування доплерівських радіолокаторів надають можливість простежити за розвитком, динамікою та рухом циклонів з великою просторовою та часовою точністю.

Як приклад інструментального підходу до оцінювання ураганів можна навести Програму Моніторингу Узбережжя Флориди (Florida Coastal Monitoring Program), яка передбачає вимірювання за допомогою чотирьох переносних веж швидкості вітру на висотах 5 та 10 м, атмосферного тиску, температури та вологості. Крім того, 30 будинків вздовж узбережжя були обладнані приладами для фотографування та оцінювання можливих пошкоджень, викликаних ураганом.

Структура Всесвітньої Метеорологічної Організації (Всесвітня служба погоди, Програма з тропічних циклонів) своєчасно попереджає країни, на території яких можливе поширення циклону, та надає відповідну інформацію на глобальному та регіональному рівнях. Завдяки тісній міжнарод-

ній співпраці та координації дій здійснюється ефективний моніторинг тропічних циклонів.

#### 14.5. Оцінювання циклонів

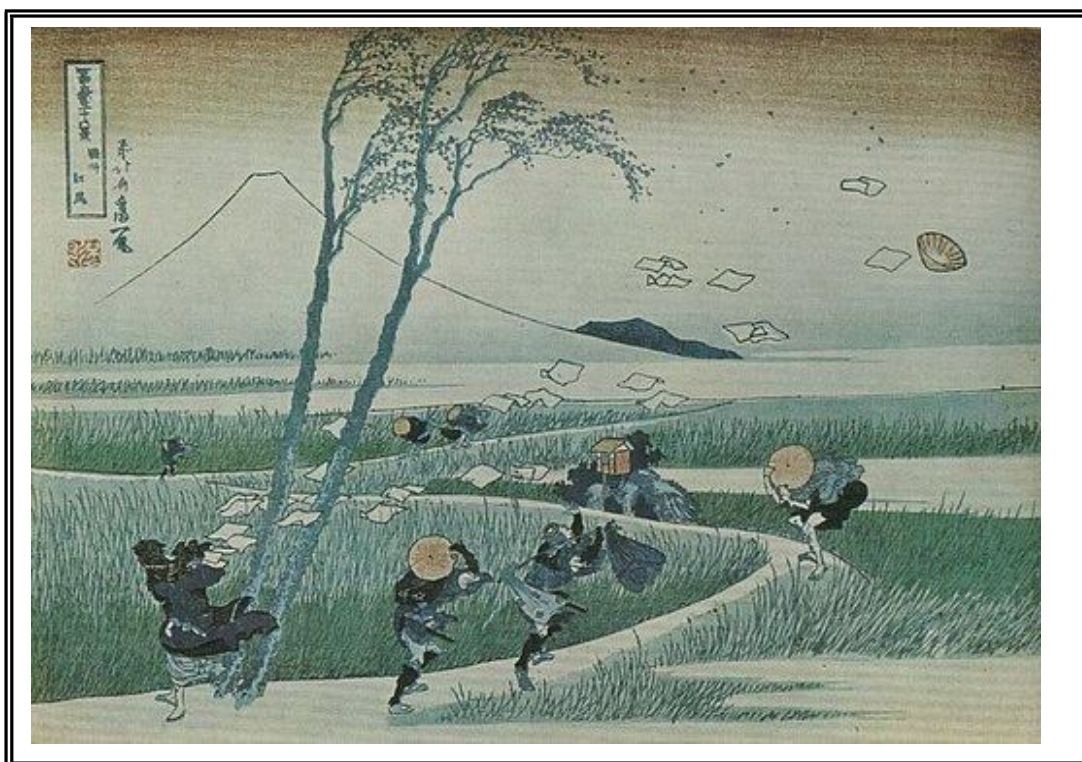
Активність окремих циклонів та циклонного сезону загалом оцінюється через *накопичену енергію циклону* (Accumulated Cyclone Energy, ACE), яка обчислюється як сума квадратів швидкостей кожного активного циклону (швидкість якого досягає або перевищує 35 вузлів (18 м/с або 65 км/г), за формулою[31]:

$$ACE = 10^{-4} \sum v_{\max}^2, \quad (14.1)$$

де  $v_{\max}$  – швидкість вітру у вузлах. Нагадаємо, що 1 вузол = 0,515 м/с = 1,853 км/г. Вимірювання проводять у продовж тривалості циклону з періодом шість годин.

Оцінювання циклонів проводять за такими критеріями:

- *Сезон, що перевищує норму*: величина ACE перевищує 103 (115% середнього значення), причому принаймні два з трьох параметрів перевищують середнє значення: кількість тропічних штормів (10), ураганів (6) та інтенсивних ураганів (2).
- *Нормальний сезон*: відсутність перевищення норми.
- *Сезон, що не перевищує норму*: величина ACE не перевищує 66 (74% середнього значення).



## 15. ВОЛОГІСТЬ

### 15.1. Параметри вологості

Випаровування з земної поверхні – це унікальний процес, що забезпечує надходження водяної пари до атмосфери. Розподіл водяної пари над землею поверхнею неоднорідний – він характеризується добовими та річними варіаціями. Для кількісного оцінювання водяної пари в атмосфері використовують параметри вологості.

Вода може існувати в атмосфері у трьох фазах – рідкій, газоподібній та твердій. Газоподібна фаза води називається *парою*. Пара, яка знаходиться у термодинамічній рівновазі з рідиною (тобто у стані, коли число молекул, що переходить із рідини у пар, дорівнює числу молекул, що повертаються в рідину за одиницю часу), називається *насиченою*. Під *вологістю* повітря розуміють наявність водяної пари у повітрі. Повітря, що містить водяну пару, називають *вологим*, а те, що не містить – *сухим*.

Розглянемо основні параметри вологості повітря.

*Абсолютна вологість повітря  $a$*  – кількість водяної пари у грамах, що знаходиться в  $1 \text{ м}^3$  повітря ( $\text{г/м}^3$ ).

*Пружність (парціальний тиск) водяної пари  $e$*  – тиск, який матиме водяна пара, що знаходиться у газовій суміші, якщо б вона одна займала об'єм, що дорівнює об'єму суміші при тій же температурі.

*Пружність насиченої пари  $E$*  – граничне значення тиску, яке відповідає рівновазі між парою та водою, тобто насиченому стану повітря при даній температурі. Пружність насиченої пари залежить від температури. Зв'язок пружності насиченої пари  $E$  з абсолютною температурою  $T$  має вигляд:

$$\lg E = 9,4 - \frac{2345}{T}, \quad (15.1)$$

де  $E$  – у мілібарах (гектопаскалях);  $T$  – у кельвінах.

*Відносна вологість повітря  $r$*  – відношення пружності водяної пари  $e$  до пружності насиченої пари  $E$  при даній температурі:

$$r = \frac{e}{E} \cdot 100\%. \quad (15.2)$$

*Дефіцит вологості  $d$*  – різниця між пружністю насиченої пари  $E$  та пружністю водяної пари  $e$  при даній температурі:

$$d = E - e. \quad (15.3)$$

*Точка роси  $T_d$*  – температура, при якій повітря, якщо його охолодити при сталому тиску, стає насиченою водяною парою.

## 15.2. Просторовий розподіл водяної пари в атмосфері

Розподіл водяної пари над землею залежить від швидкості випаровування та перенесення водяної пари повітряними потоками з одного місця в інше. Якщо охарактеризувати вологість повітря пружністю (парціальним тиском) водяної пари, то можна помітити, що розподіл парціального тиску водяної пари пов'язаний з розподілом температури: максимальні значення (25 гПа) спостерігаються на екваторі, а в полярних областях (65-79<sup>0</sup>) північної широти ці значення зменшуються (до 4-5 гПа)

### 15.1. Залежність розподілу парціального тиску водяної пари від температури

Параметр	Географічна широта, $\varphi^0$						
	5	15	25	35	45	55	65
$t, C^0$	25,5	25,4	21,9	15,3	8,7	1,2	-7,0
$E, гПа$	25,3	22,9	18,4	12,9	9,3	6,5	4,1
$r, \%$	79	75	71	70	74	78	82

Зміни вологості з широтою мають більш складний характер. Збільшення відносної вологості в областях високих широт спостерігається узимку в помірних зонах. Поблизу екватора значення відносної вологості досить великі (до 85%) завдяки високому парціальному тиску водяної пари.

Абсолютна та відносна вологість повітря мають максимальні значення над поверхнею океанів та зменшуються при переході від океанів до континентів, де розподіл вологості неоднорідний та залежить від місцевих мов.

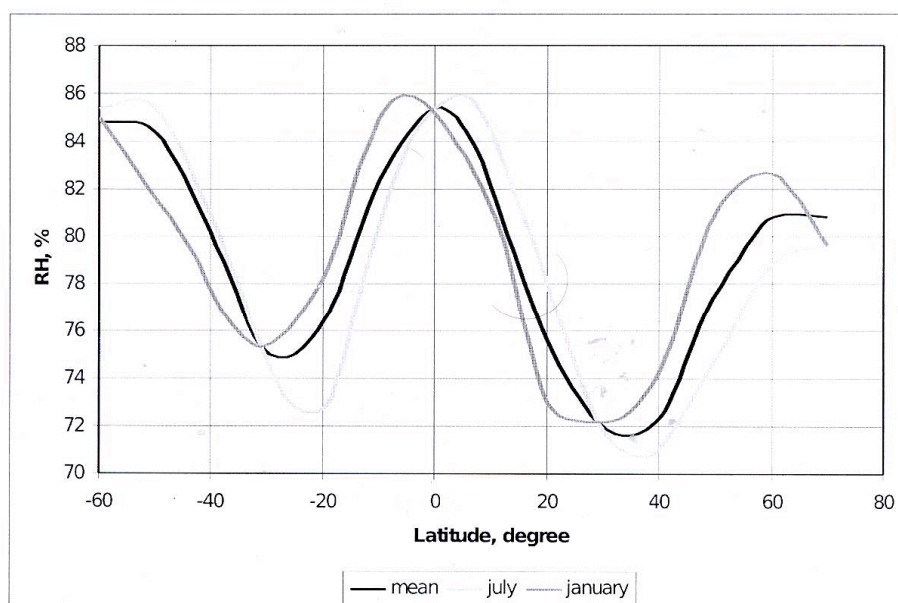


Рис. 15.1. Перший тип добового характеру зміни парціального тиску водяної пари (бліді лінії – взимку та влітку, жирна лінія – середнє значення) [32]

У поверхневому шарі повітря парціальний тиск водяної пари відповідає температурі повітря, тоді як відносна вологість обернено пропорційна температурі повітря. Зміни вологості залежать від перенесення водяної пари у вертикальному напрямку. Інтенсивний вертикальний обмін зменшує абсолютну вологість поблизу поверхні та збільшує кількість водяної пари у верхніх шарах повітря.

Слід відрізнити два типи добового характеру зміни парціального тиску водяної пари: для першого типу максимальний парціальний тиск відповідає максимальній температурі, а мінімальний відбувається перед заходом Сонця (рис. 15.1); таку поведінку парціального тиску, яку можна пояснити незначним вертикальним обміном та інтенсивним випаровуванням, спостерігають у місцях високої вологи (наприклад, над поверхнею океану) або на континентах узимку. Другий тип характеризується двома максимумами залежності парціального тиску від часу доби (9-10 ранку та 20-21 увечері) та двома мінімумами (вранці та опівдні) (рис. 15.2). Така поведінка парціального тиску притаманна континентам влітку.

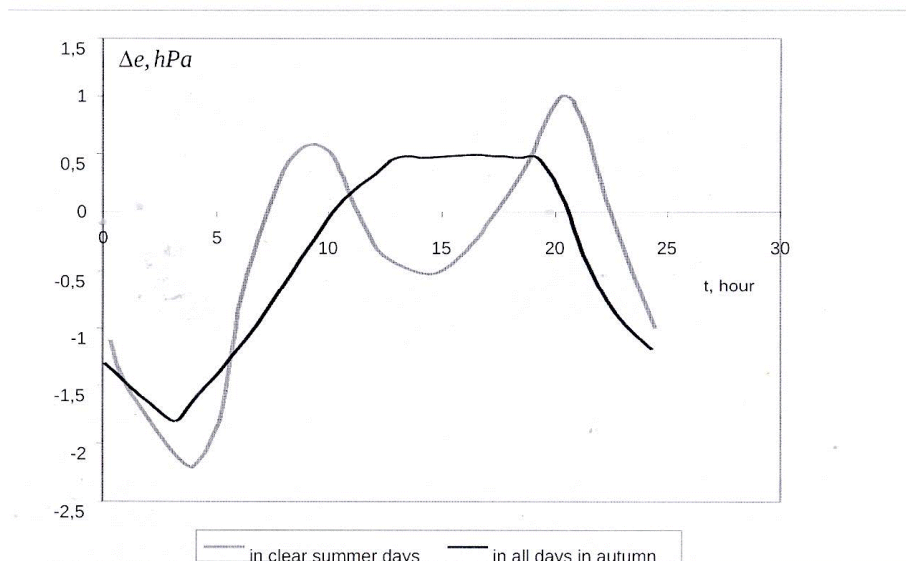


Рис. 15.2. Другий тип добового характеру зміни парціального тиску водяної пари (бліда лінія – влітку, жирна лінія – восени) [32]

Добові варіації відносної вологості визначаються добовими змінами парціального тиску  $e$  та парціальним тиском  $E$  насиченої водяної пари. Збільшення температури викликає інтенсивність випаровування; але оскільки парціальний тиск насиченої пари зростає швидше, то загалом відносна вологість обернено пропорційна температурі повітря.

Те ж саме можна сказати щодо річних змін абсолютної та відносної вологості, які повторюють зміни температури (абсолютна – пропорційно температурі, відносна – обернено пропорційно температурі). Влітку абсолютна вологість набуває максимальних значень, а відносна – мінімальних;



взимку все відбувається навпаки. Для північних широт характерна відносна вологість 80-90% взимку та 60-70% – влітку. Значення парціального тиску водяної пари становлять 2-3 гПа взимку та 12-15 гПа влітку.

### 15.3. Індекс глобальної вологості

Індекс глобальної вологості (The Global Humidity Index, *GHI*) оцінюється як відношення щорічних опадів  $P$  до потенційної евапотранспірації  $PET$ :

$$GHI = P/PET. \quad (15.4)$$

У відповідності до значень цього індексу відрізняють гіпераридні ( $GHI < 0,05$ ), аридні ( $0,05 < GHI < 0,20$ ), напіваридні ( $0,20 < GHI < 0,50$ ), сухі-субвологі ( $0,50 < GHI < 0,65$ ), вологі ( $0,65 < GHI$ ), та холодні (зони, де 6 місяців температура не перевищує  $0^{\circ}\text{C}$  та не більше 3 місяців температура досягає  $6^{\circ}\text{C}$ ) регіони на земній поверхні (аридний – від лат. aridus – сухий).

Карту географічного розподілу індексу глобальної вологості наведено на рис.15.3.

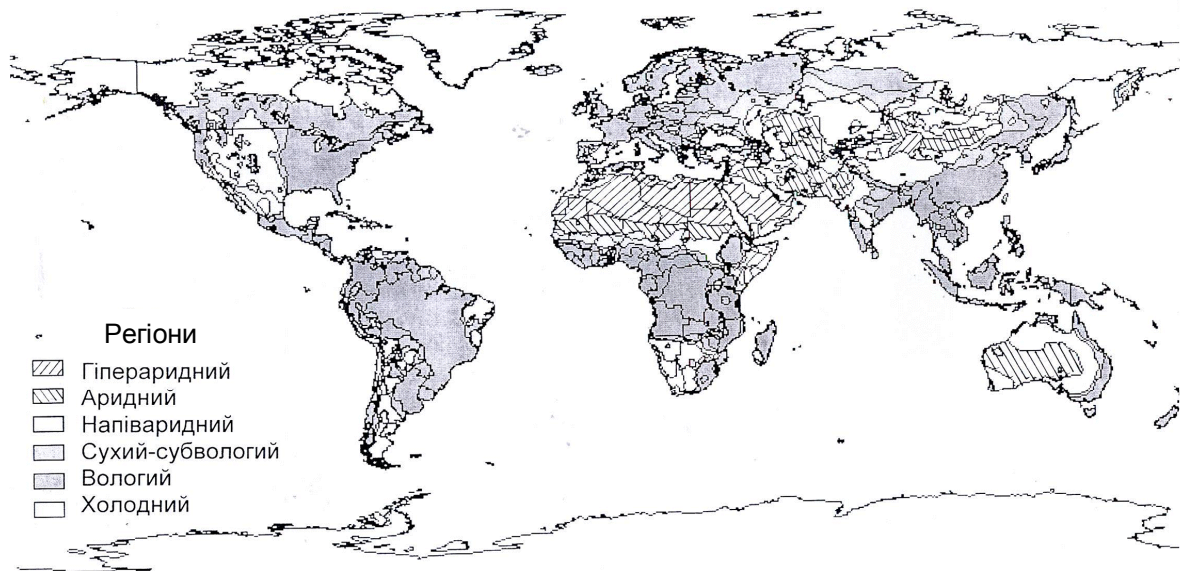


Рис.15.3. Регіони глобальної вологості [33]

Вертикальний розподіл водяної пари носить досить складний характер та визначається температурою повітря, атмосферним тиском, процесами конвекції, турбулентним перемішуванням, процесами конденсації та формування хмар.

## 16. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

Прилади для вимірювання вологості називаються *психрометрами* або *гігрометрами*.

### 16.1. Аспіраційний психрометр Асмана

Прилад було створено у XIX сторіччі А.Р. Асманом; він містить два термометри – сухий та змочений; ціна поділки термометрів становить  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Термометри розміщені у металевих трубках, які потім з'єднані в одну. Резервуар одного з термометрів обмотаний батистом, що змочується. При вимірюванні вологості психрометр встановлюють вертикально та обдувають повітрям обидва термометри за допомогою вентилятора. На рис. 16.1 наведено конструкцію та зовнішній вигляд аспіраційного психрометра. Тут: 1 – заводний ключ; 2 – віконце; 3 – головка аспіратора; 4 – трубка; 5 – сухий термометр; 6,11 – корпус; 7 – трійник; 8,12 – ізоляційні трубки; 9,13 – захисні трубки. З поверхні резервуара змоченого термометра відбувається випаровування води, яке залежить від вологості навколишнього повітря. За допомогою аспіраційного психрометра можна визначити пружність водяної пари  $e$  за *психрометричною формулою*:

$$e = E_1 - A(t_c - t_{3M})p_A, \quad (16.1)$$

де  $E_1$  – пружність насиченої пари, яка відповідає температурі змоченого термометра;  $A$  – психрометричний коефіцієнт (Таблиця 16.1),  $t_c$  – температура сухого термометра,  $t_{3M}$  – температура змоченого термометра,  $p_A$  – атмосферний тиск (у мм рт.ст. або паскалях).

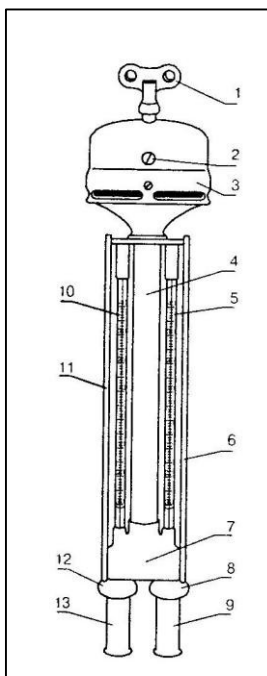


Рис. 16.1. Аспіраційний психрометр Асмана: а – конструкція психрометра; б – зовнішній вигляд

Пружність насиченої пари  $E_1$ , яка відповідає температурі змоченого термометра, та пружність насиченої пари  $E$ , яка відповідає температурі сухого термометра, визначають у мм рт.ст. (табл.1 додатка) або у паскалях (табл. 2 у додатках).

Недоліком аспіраційного психрометра є те, що вентилятор захоплює повітря тільки на відстані декількох сантиметрів, що не дає змогу точно визначити вологість на певних ділянках. Крім того, величина психрометричного коефіцієнту  $A$  залежить від швидкості вентиляції, температури та типу психрометра. Величина  $A = 6,62 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  достовірна для швидкостей вентиляції 3 м/с. Залежність величини  $A$  від швидкості вентиляції наведено в табл. 16.1.

#### 16.1. Залежність величини психрометричного коефіцієнту $A$ від швидкості вентиляції

Психрометричний коефіцієнт $A \cdot 10^{-4}, \text{ K}^{-1}$	13,0	9,0	7,8	7,1	6,7
Швидкість вентиляції, м/с	0,12	0,50	1,00	2,00	4,00

Залежність абсолютної похибки вимірювань вологості аспіраційним психрометром з ціною поділки  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  від температури (табл.16.2) свідчить, що похибками можна знехтувати при температурах, що перевищують  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , тоді як зменшення температури викликає суттєве збільшення похибок.

#### 16.2. Залежність абсолютної похибки вимірювань вологості від температури

Відносна вологість, %	$-10 \text{ }^\circ\text{C}$	$0 \text{ }^\circ\text{C}$	$10 \text{ }^\circ\text{C}$	$20 \text{ }^\circ\text{C}$
10	6,0	3,2	2,0	1,3
50	6,3	3,5	2,2	1,3
100	6,7	4,0	2,5	1,9

### 16.2. Автоматизований аспіраційний психрометр Асмана

Психрометр Асмана може бути застосований для автоматизованих вимірювань вологості повітря (рис. 16.1). З цією метою прилад обладнаний судиною з достатньою для довготривалих вимірювань кількістю води, помпою для її накачування та контактними термометрами, які подають результати вимірювань у пам'ять системи реєстрації.





Рис. 16.2. Автоматизований аспіраційний психрометр Асмана

### 16.3. Волосяний гігрометр

Дія приладу базується на здатності знежиреної волосини змінювати свою довжину при зміні вологості. Водяна пара здатна конденсуватися в капілярних порах людської волосини. Збільшення вологості призводить до зменшення угнутості менісків води в порах, завдяки чому волосина видовжується. Видовження волосини відбувається пропорційно логарифму відносної вологості. Пучок таких волосин використовують в *гігрографі* – приладі для безперервного запису відносної вологості повітря (рис. 16.3).

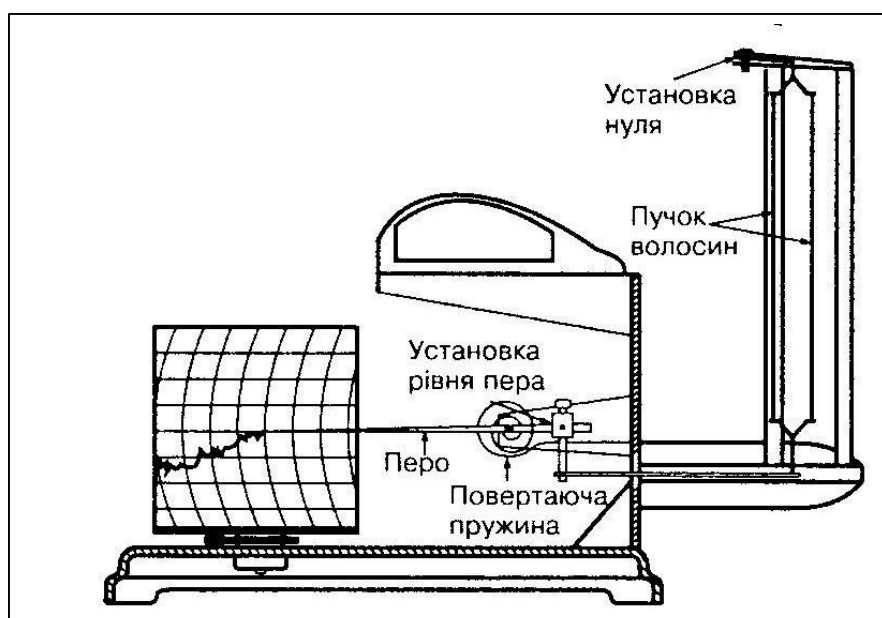


Рис. 16.3. Схема гігрографа

Інші матеріали можуть бути застосовані як сенсори в гігromетрах – нейлон, бавовна, кишкова мембрана корови або свині. Перевагою волосяних гігromетрів є незалежність результатів вимірювань від температури – при зміні температури від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  величина похибки вимірювань знаходиться в інтервалі 1-3 %; кишкова мембрана демонструє найбільшу чутливість до зміни вологості. Волосяні гігromетри мають просту конструкцію та невисоку ціну. Недоліком волосяних гігromетрів є збільшення часового відгуку від температури. З табл.16.3 видно, що зменшення температури призводить до значного збільшення відгуку.

16.3. Вплив температури на часовий відгук (в секундах) різних гігromетрів.

Тип сенсо-ра	$20^{\circ}\text{C}$	$10^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$-30^{\circ}\text{C}$
Звичайна волосина	30	40	55	175	400	800
Ламінована волосина	10	10	12	15	20	30
Кишкова мембрана	6	10	20	50	100	200

Ще одним недоліком гігromетрів є явище гістерезису – якщо гігromетр зберігається протягом декількох днів в сухому приміщенні, результати вимірювання вологості можуть значно (до 15 %) відрізнятися від тих, що отримані за допомогою гігromетра, який тримали в вологому приміщенні. Через це гігromетри такого типу вимагають постійного калібрування.

#### 16.4. Ємнісний гігromетр

Основу приладу становить гігроскопічна полімерна плівка, з обох боків якої розташовані пористі металеві електроди, що утворюють конденсатор ємністю близько 500 пФ (рис. 16.4). Внаслідок поглинання плівкою молекул води об'єм плівки збільшується, відстань між електродами також збільшується, що призводить до зміни ємності конденсатора ( $C = \epsilon\epsilon_0 S/d$ , де  $\epsilon$  – діелектрична проникність середовища між обкладками конденсатора;  $\epsilon_0$  – електрична стала;  $S$  – площа обкладки;  $d$  – відстань між обкладками).

Ємнісний гігromетр застосовується для вимірювання відносної вологості. Перевагою приладу є його компактність (розміри приладу становлять  $6\text{ мм}^2$ ), слабка залежність результатів вимірювань від зовнішньої температури, лінійність шкали в області 0–80% відносної вологості, швидкодія, малі значення гістерезису.

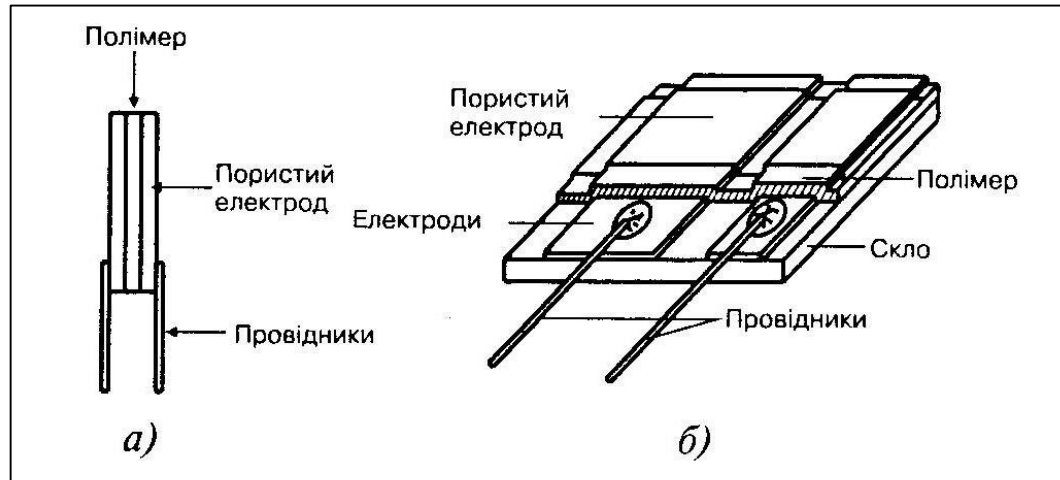


Рис. 16.4. Ємнісний гігрометр: *а* – гігроскопічна полімерна плівка з металевими електродами; *б* – конструкція гігрометра

Недоліком приладу є вплив зовнішніх забруднень на результати вимірювань. Гігрометри цього типу використовують у засобах автоматизованого контролю вологості повітря.

### 16.5. Конденсаційний гігрометр

Один з методів оцінювання абсолютної вологості заснований на вимірюванні точки роси. Якщо плоску гладеньку поверхню охолоджувати, можна спостерігати конденсацію вологи на ній. Температура поверхні у цей момент дуже близька до тієї, при якій повітря стає насиченою водяною паром, тобто до точки роси. Залишається тільки точно виміряти цю температуру.

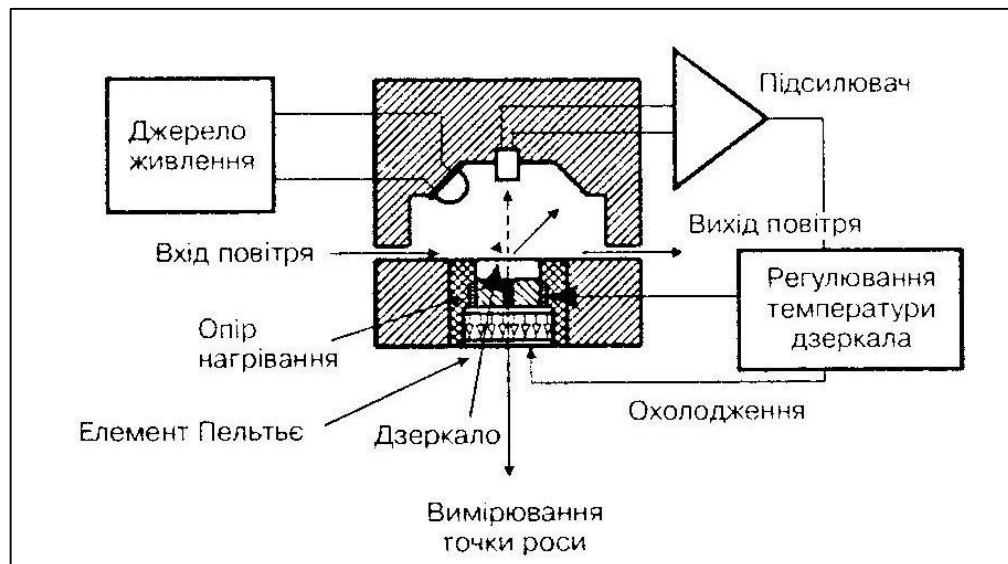


Рис. 16.5. Схема конденсаційного гігрометра

Дзеркало охолоджується напівпровідниковим елементом, що працює на основі ефекту Пельтьє, та опромінюється фотодіодом. Коли поверхня дзеркала покривається росою, поверхня дзеркала починає розсіювати оптичне випромінювання; вертикальна компонента розсіяного випромінювання реєструється фотодетектором, електричний сигнал з виходу якого підсилюється та подається на систему підігрівання дзеркала (рис. 16.5).

Перевагою приладу є його висока чутливість, можливість вимірювання абсолютної вологості у широкому інтервалі температур ( $-80 - +100$  °C) з точністю близько  $1$  °C.

Недоліком приладу є спотворення результатів вимірювання при низьких температурах, необхідність контролювати якість поверхні дзеркала, складність конструкції, висока собівартість.

### 16.6. Сорбційний гігromетр

В основу приладу покладено вимірювання залежності електропровідності вологосорбуючої плівки від вологості середовища, яке аналізується. Для цього використовується сіль *LiCl*.

### 16.7. Електролітичний гігromетр

Прилад цього типу містить трубку, покриту тонким шаром п'ятиокису фосфору ( $P_2O_5$ ), що заповнює простір між двома спіралеподібними паралельними провідниками (рис. 16.6). Якщо газ проходить через трубку, волога в газі поглинається цим шаром. Електричний струм, який пропускають через провідники, розкладає воду на водень та кисень завдяки електролізу. Струм, необхідний для електролізу, пропорційний об'ємній концентрації води в газі.

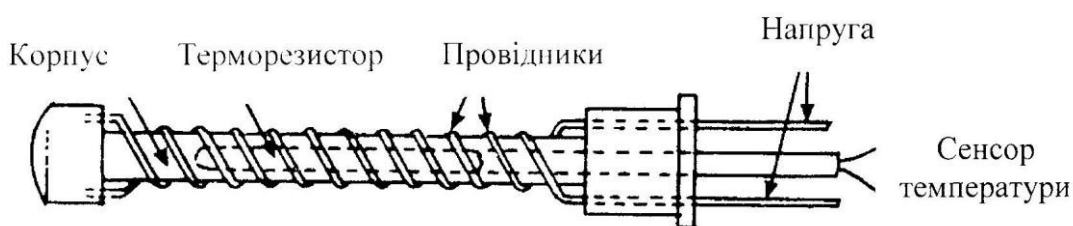


Рис. 16.6. Схема сенсора електролітичного гігromетра

### 16.8. Інфрачервоний газовий аналізатор

Для більш точного та чутливого вимірювання вологості повітря застосовують гігromетри поглинання випромінювання або газові аналізатори. Принцип дії газового аналізатора полягає в оцінюванні інтенсивності поглинання водною парою інфрачервоного ( $1,0; 1,38; 1,87; 2,7; 6,3$  мкм) випромінювання. Схему приладу наведено на рис. 16.7. Монохроматичний промінь світла, довжина хвилі якого співпадає з максимумом поглинання

води, пропускають через модулятор інтенсивності та дві кювети, одна з яких заповнена сухим повітрям, а друга – газом, що аналізується.

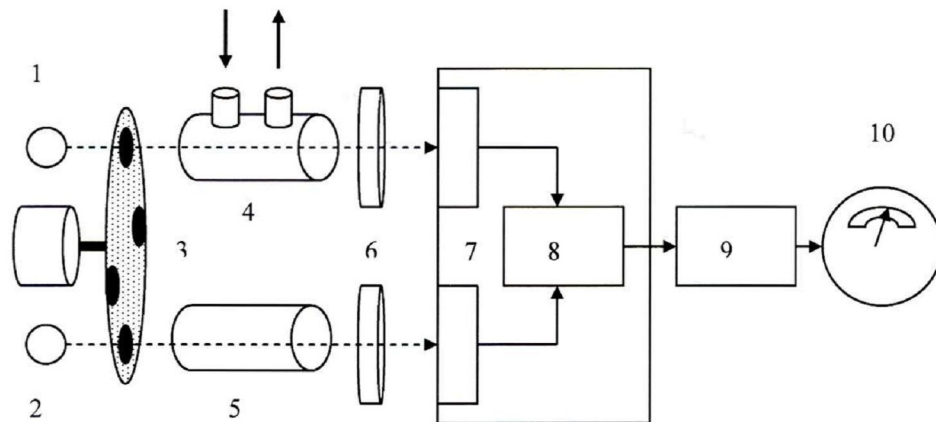


Рис.16.7. Двопроменева схема газового аналізатора: 1,2 – джерела випромінювання; 3 – модулятор; 4 – кювета з газом, що аналізується; 5 – кювета з опорним газом; 6 – фільтри; 7 – фотодетектори; 8 – підсилювач; 9 – система реєстрації; 10 – вимірювальний прилад

Якщо ці потоки випромінювання дорівнюють один одному, то система перебуває у рівновазі. Із зміною концентрації газу в вимірювальній кюветі рівновага порушується, сигнал розбалансування посилюється та реєструється. Така двопроменева система здатна виключити зміни інтенсивності джерела випромінювання за рахунок старіння або коливань напруги живлення.

### 16.9. Відкрита система вимірювання вологості повітря

Для запобігання впливу забруднень кювет на результати вимірювань застосовують відкриті системи оцінювання вологості повітря. Такі гігроскопічні системи містять джерело модульованого оптичного випромінювання, що дає можливість знехтувати впливом оточуючого освітлення. Гігрометр відкритого типу містить диск з інтерференційними фільтрами, пропускання яких відповідає довжинам хвиль 2,7 мкм (поглинання води) та 1,61 мкм (де поглинання води відсутнє). Схему такого гігрометра наведено на рис. 16.8.

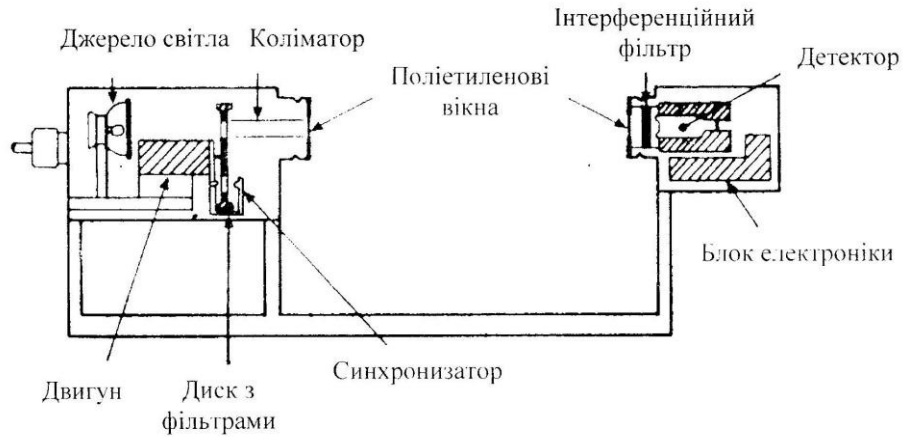


Рис. 16.8. Схема гігрометра відкритого типу

### 16.10. Дистанційне вимірювання вологості

Вологість можна оцінювати у глобальних масштабах за допомогою супутників. В основі вимірювань є детектування концентрації водної пари у тропосфері на висотах 4 – 12 км завдяки сенсорам, чутливим до інфрачервоного випромінювання, яке здатна поглинати водна пара (рис. 16.9). Такі супутникові системи застосовують для моніторингу кліматичних ситуацій та передбачення погоди.

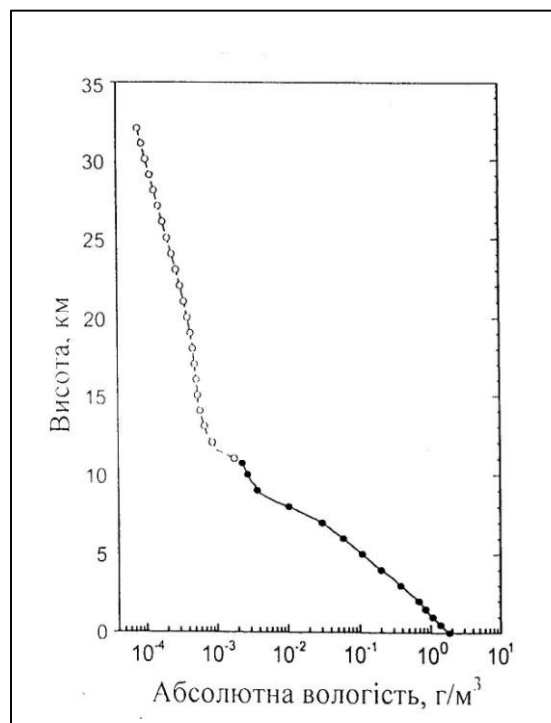


Рис. 16.9. Вертикальний профіль абсолютної вологості повітря, одержаний за допомогою супутників та радіозондів

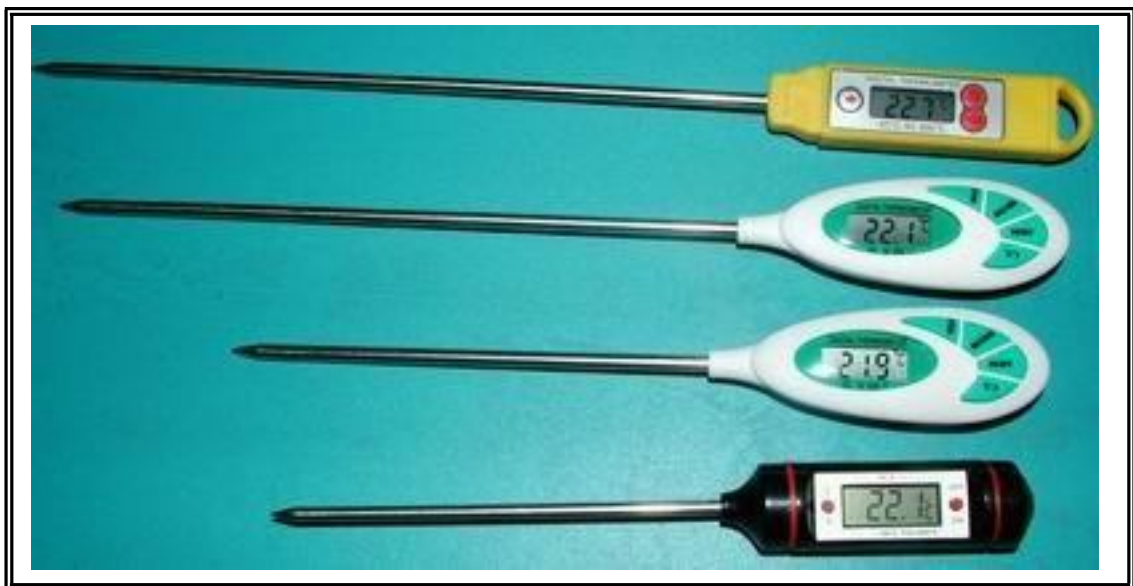
### ***Екстремальні значення вологості повітря***

Найвологішими містами у південній та південно-східній Азії є Калькутта та Керала (Індія), Маніла (Філіппіни), Бангкок (Таїланд). В Австралії одне з перших місць за вологістю посідає місто Дарвін – вологий сезон триває з грудня до квітня. У Куала-Лумпурі (Малайзія), у Сінгапурі та Північній Тасманії висока вологість спостерігається цілий рік.

Найменша вологість повітря відмічається в Антарктиді.

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Назвати параметри вологості.
2. У яких одиницях вимірюють абсолютну та відносну вологість?
3. Що таке пружність водяної пари, пружність насиченої пари?
4. Дати визначення дефіциту вологості, точці роси.
5. Від чого залежить розподіл водяної пари над земною кулею?
6. Пояснити два типи добового характеру зміни парціального тиску водяної пари.
7. Дати визначення індексу глобальної вологості.
8. Записати та пояснити психрометричне рівняння.
9. Від чого залежить величина психрометричного коефіцієнта?
10. Зробити порівняльний аналіз ємнісного та конденсаційного гігрометрів.
11. Визначити переваги гігрометра відкритого типу.



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

### Вимірювання вологості за допомогою номограми

Взаємозв'язок між параметрами вологості може бути представлений графічно за допомогою номограми.

#### Приклад

Визначити за допомогою номограми пружність  $e$  водяної пари, пружність  $E$  насиченої пари, що відповідає температурі сухого термометра, та пружність  $E_1$  насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра, відносну вологість  $r$ , дефіцит вологості  $d$  і точку роси  $T_d$ , якщо температура сухого термометра  $30^\circ\text{C}$ , а температура змоченого термометра  $19^\circ\text{C}$ .

#### Розв'язання

1. На горизонтальній осі номограми (рис. 1) з точки, що відповідає температурі змоченого термометра  $19^\circ\text{C}$  (точка  $A$ ), проводимо вертикальну лінію  $AB$  до перетину з кривою  $r = 1,0$  (точка  $B$ ).

2. З точки  $B$  проводимо горизонтальну лінію  $BE_1$  до перетину з лівою вертикальною віссю номограми (точка  $E_1$ ). На цій осі визначаємо пружність  $E_1$  насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра:  $E_1 = 22,5$  гПа.

3. З точки  $B$  проводимо похилу лінію  $BD$  до перетину з вертикальною лінією  $GD$ , що відповідає температурі сухого термометра  $30^\circ\text{C}$  (точка  $D$ ).

4. З точки  $D$  проводимо горизонтальну лінію  $DJ$  до перетину з лівою віссю номограми (точка  $J$ ), яка дає значення пружності  $e$  водяної пари при даній температурі:  $e = 15$  гПа.

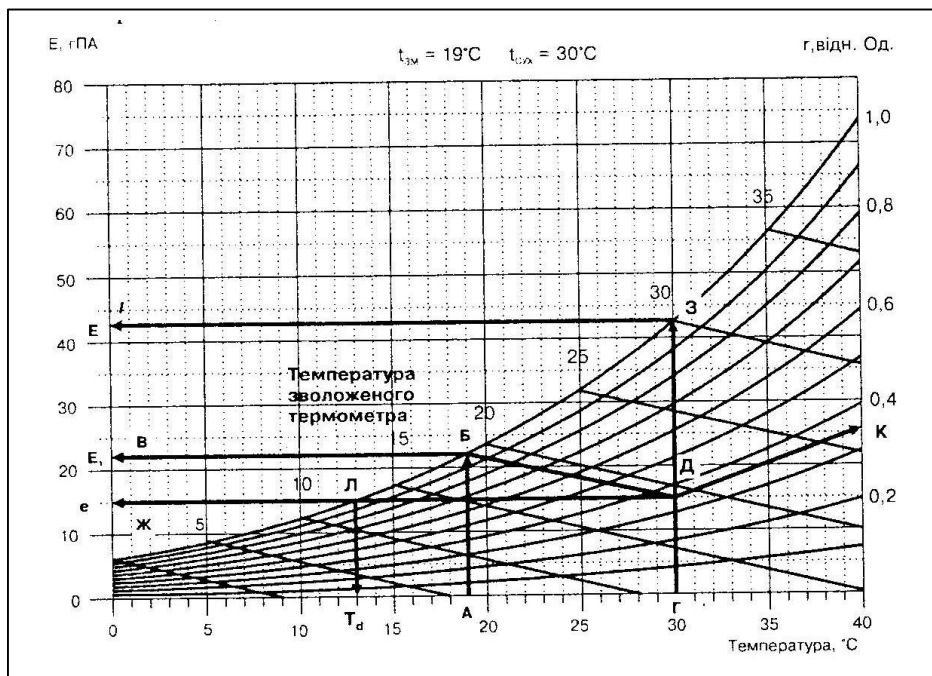


Рис. 1. Процедура визначення параметрів вологості за допомогою номограми



5. З точки  $G$ , що відповідає температурі сухого термометра, проводимо вертикальну лінію  $GZ$  до перетину з кривою  $r = 1,0$  (точка  $Z$ ).

6. З точки  $Z$  проводимо горизонтальну лінію  $ZI$  до перетину з лівою вертикальною віссю номограми (точка  $I$ ). На цій осі визначаємо пружність  $E$  насиченої пари, що відповідає температурі сухого термометра:  $E = 42,5$  гПа.

7. З точки  $I$  проводимо лінію  $IK$ , паралельну найближчій кривій номограми, до перетину з правою вертикальною віссю номограми (точка  $K$ ), яка дає значення відносної вологості при даній температурі:  $r = 0,35$ .

8. На лівій вертикальній осі визначаємо різницю між значеннями  $E$  та  $e$  (відстань  $IЖ$ ), яка відповідає дефіциту вологості:  $d = 42,5 - 15 = 27,5$  гПа.

9. Знаходимо точку  $L$  перетину прямої  $ДЖ$  з кривою  $r = 1,0$  (точка  $L$ ) і визначаємо на горизонтальній осі номограми точку роси:  $T_d = 12$  °С.

### Контрольне завдання

Визначити за допомогою номограми (рис. 2) пружність  $e$  водяної пари, пружність  $E$  насиченої пари, що відповідає температурі сухого термометра, та пружність  $E_1$  насиченої пари, що відповідає температурі змоченого термометра, відносну вологість  $r$ , дефіцит вологості  $d$  і точку роси  $T_d$ , якщо температура сухого термометра та температура змоченого термометра визначаються за таблицею згідно з варіантом, що встановлений викладачем.

Варіант	Температура сухого термометра	Температура змоченого термометра
1	28	23
2	32	28
3	35	30
4	31	20
5	25	18
6	36	32

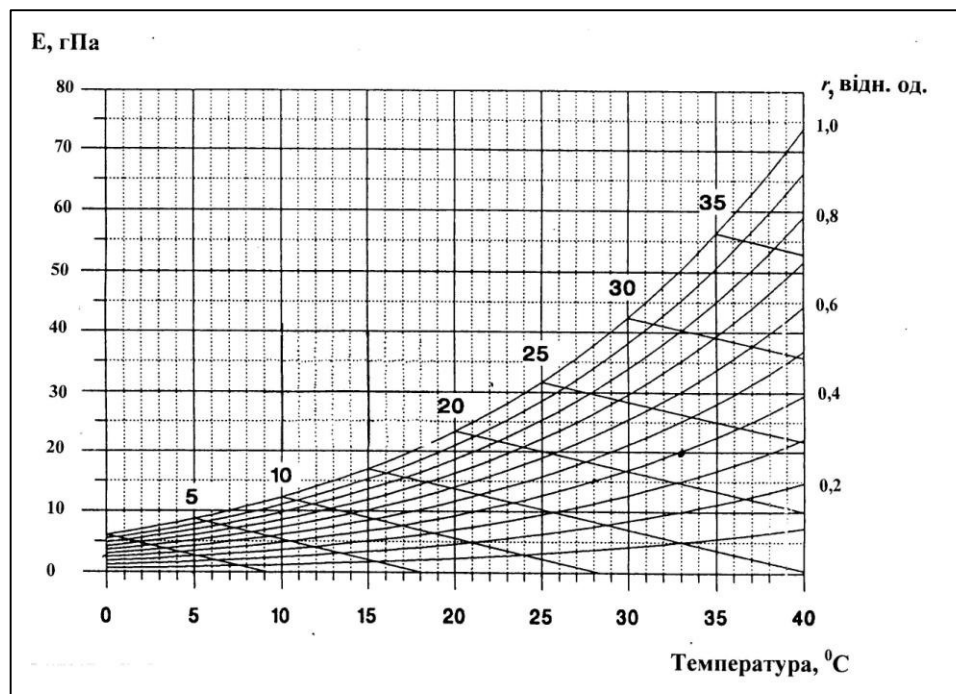


Рис. 2. Номограма для вимірювання параметрів вологості

### Вимірювання вологості за віртуальними психрометричними таблицями

Використовуючи ці таблиці (для цього треба зайти в Інтернеті на сайт <http://www.met.rdg.ac.uk/~swshargi/MicroMetSoft.html>), можна за атмосферним тиском, температурами сухого і змоченого термометрів визначити пружність водяної пари  $e$ , пружність насиченої пари  $E$ , абсолютну вологість  $a$ , відносну вологість повітря  $r$ , масову частку вологи  $q$  та точку роси  $T_d$ .

#### Контрольне завдання

Застосувати віртуальні психрометричні таблиці для визначення параметрів вологості згідно з варіантом, що встановлений викладачем.



## 17. ОПАДИ

### 17.1. Параметри опадів

*Атмосферні опади* – вода у рідкому чи твердому стані, що випадає з хмар чи безпосередньо з повітря на земну поверхню та предмети. З хмар випадають: дощ, мряка, сніг, мокрий сніг, крупа, град, льодяний дощ. За зовнішнім виглядом розрізняють такі типи опадів як *дощ, сніг, крупа, град, мряка* тощо. Відповідно до характеру випадання опади поділяють на *облогові, зливові та мрячні*.

#### 17.1.1. Механізми виникнення опадів.

Розглянемо процеси, які пов'язані з опадами.

*Випаровування* – перехід речовини з рідкого стану у газоподібний (пару). За рік з поверхні Світового океану випаровується близько  $450 \cdot 10^3$  км<sup>3</sup> води, а з поверхні суші – близько  $70 \cdot 10^3$  км<sup>3</sup>. Швидкість випаровування залежить від вологості повітря, температури поверхні, вітру. Дуже важливим етапом водного циклу є *транспірація* – процес випускання рослиною води в атмосферу за допомогою листя, який забезпечує повертання в атмосферу більшої кількості води, ніж при випаровуванні її з поверхні річок та озер. Близько 90% води, що надходить у рослину через кореневу систему, втрачається рослиною через листя завдяки транспірації. Рослини постачають у атмосферу велику кількість води: так, соняшник втрачає щоденно 1-2 л води, тоді як дуб – близько 600 л води щоденно.

*Вертикальне підіймання* повітря, що містить водяну пару, призводить до охолодження зі швидкістю близько  $1 \text{ }^{\circ}\text{C} / 100 \text{ м}$ , якщо конденсація не відбувається, та  $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C} / 100 \text{ м}$ , якщо відбувається конденсація. Можна вважати, що для тропосфери притаманний середній температурний градієнт  $0,65 \text{ }^{\circ}\text{C} / 100 \text{ м}$ .

*Конденсація* – перехід газу або насиченої пари у рідину чи тверде тіло внаслідок адіабатичного охолодження або стиснення. Конденсація можлива при температурах, менших критичної для даної речовини.

В атмосфері конденсація відбувається, якщо повітряні маси набувають насичення, тобто відносна вологість сягає 100%. Насиченими повітряні маси стають при охолодженні до температури, що відповідає точці роси або замерзання. Процес одночасної конденсації та розсіювання водяної пари в атмосфері супроводжується утворенням *хмар*.

Необхідною умовою конденсації є наявність центрів конденсації, функції яких у атмосфері виконують дрібні частинки – аерозолі або іонізовані атоми. Типові розміри центрів конденсації варіюють від 0,0001 мм до 0,1 мм та більше; концентрація – від 100 до 1000 ядер у 1 см<sup>3</sup>; загальна маса центрів конденсації в атмосфері становить  $2 \cdot 10^{12}$  кг упродовж року.

Присутність водяної пари, центрів конденсації та суттєве вертикальне підіймання повітря спричинює охолодження повітря до точки роси та формування хмар. У таблиці 16.1 наведено параметри краплин для різних типів опадів.

### 17.1. Параметри краплин для різних типів опадів [34]

Тип опадів	Інтенсивність (см/г)	Середній діаметр краплини (мм)	Швидкість падіння краплини (м/с)	Кількість краплин, що падає за 1 с на 1 м <sup>2</sup>
Туман	0,013	0,01	0,003	67425000
Мряка	0,025	0,96	4,1	151
Легкий дощ	1,02	1,24	4,8	280
Помірний дощ	0,38	1,60	5,7	495
Важкий дощ	1,52	2,05	76,0	495
Надмірний дощ	4,06	2,40	7,3	818
Злива	10,2	2,85	7,9	1220

*Хмари* – це скупчення на певній висоті у тропосфері продуктів конденсації водяної пари (водяні хмари) чи кристалів льоду (льодяні хмари), чи тих і інших (змішані хмари). При укрупненні хмарних елементів та зростанні їхньої швидкості падіння вони випадають із хмар у вигляді опадів.

Відрізняють такі механізми утворення хмар:

1. *Конвекційне підіймання* викликається нагрівання поверхневих шарів повітря; нагріті маси повітря, які стають легшими, ніж оточуюче повітря, підіймаються, розширюються та охолоджуються. Коли охолодження викликає стан насичення, утворюються хмари. Цей процес притаманний зонам, що розташовані у глибині континентів або поблизу екватору. Він супроводжується утворенням купчастих та купчасто-дощових хмар, грозами та звільненням великих кількостей опадів за невеликий проміжок часу у локалізованих областях.

2. *Фронтальне підіймання* має місце при зустрічі двох повітряних мас з різними температурами та вологістю. Фронт більш холодного та сухого повітря діє як стінка, примушуючи тепле та вологе повітря підійматися, розширюватися та охолоджуватися. Цей механізм утворення хмар типовий для помірних широт та поблизу екватора.

3. *Орографічне підіймання* відбувається, якщо повітря вимушене підійматися вздовж схилів високих гір. Такий процес утворення хмар притаманний західному узбережжю Канади.

Згідно Міжнародній класифікації хмар відрізняють 19 родів хмар, а саме: перисті (*Cirrus*), перисто-купчасті (*Cirrocumulus*), перисто-шаруваті (*Cirrostratus*), висококупчасті (*Alto cumulus*), високошаруваті (*Altostratus*), шаруваті (*Stratus*), шарувато-купчасті (*Stratocumulus*), шарувато-дощові (*Nimbostratus*), купчасті (*Cumulus*), купчасто-дощові (*Cumulonimbus*).

За висотою розташування розрізняють:

*хмари верхнього ярусу* (перисті, перисто-шаруваті та перисто-купчасті) – у помірних широтах вони розміщуються вище 5 км; складаються з кристалів льоду;

*ари середнього ярусу* (висококупчасті, високошаруваті) – у помірних широтах вони зустрічаються на висотах 2-7 км; складаються переважно з крапель води, однак, можуть містити і кристалики льоду, коли температура досить низька;

*хмари нижнього ярусу* (шаруваті, шарувато-дощові, шарувато-купчасті) – розташовуються на висотах нижче 2 км; в основному складаються з краплин води, однак, коли температура досить низька, ці хмари можуть також містити частинки льоду та сніг.

Розглянемо грозову хмару товщиною 10000 м. Загальний об'єм хмари над кожним 1 м<sup>2</sup> земної поверхні становитиме 10000 м<sup>3</sup>. Якщо концентрація води у такій хмарі дорівнює 0,5 г/м<sup>3</sup>, то на 1 м<sup>2</sup> земної поверхні припадає 5000 см<sup>3</sup> води. Припускаючи, що вся ця вода перейде в опади, товщина шару води на земній поверхні досягне 0,5 см. У реальній ситуації товщина хмари та концентрація у ній води менші, через що для одержання значної кількості води у вигляді опадів потрібна тривале забезпечення хмар водяною паром за допомогою повітряних потоків.

На земній поверхні можливі такі форм опадів як роса, іній, твердий і рідкий наліт, паморозь.

*Роса* – дрібні краплі води, що утворились на поверхні Землі і предметах в результаті конденсації за умов охолодження при нічному ефективному випромінюванні.

*Іній* – шар кристалів льоду, що утворюється на горизонтальних поверхнях (грунті, траві, предметах) шляхом сублімації водяної пари внаслідок їх радіаційного вихолодження до від'ємних температур. Утворюється у ясні тихі ночі.

*Рідкий наліт* – плівка води, що утворюється на навітряних холодних схилах (стінках) при надходженні теплого повітря.

*Твердий наліт* – білий шар з дрібних льодяних кристаликів, що утворюється на повітряних схилах при надходженні теплої маси повітря.

*Паморозь* – відкладення кристалів льоду на гілках дерев, стінах, стовпах тобто на різних поверхнях внаслідок сублімації водяної пари при надходженні теплої повітряної маси.

Для України характерно від 270-310 мм опадів у районі Сивашу до 1500-1800 (в окремі роки і 2100) мм опадів для Карпатських гір. У області Кримських гір кількість опадів теж сягає 1500 мм/рік. Найвологіше місце Закарпаття – полонина Пожижевська – 1593 мм рт. ст. річних опадів.

### **17.1. 2. Стресові ситуації.**

Стресові ситуації можуть викликати град та зливові дощі.

*Град* – це продукт конденсації водяної пари у грозових хмарах, де висхідні потоки повітря рухаються зі швидкістю понад 10 м/с, а температура становить –20...–30 °С. У 1993 р. у Кіровоградській області градини мали розміри курячого яйця; град завдав шкоди – загинуло 35 тис. га сільськогосподарських посівів. У 1984 р. у Таджикистані випав град, причому маса градин досягала 880 г. Рекордні за вагою градини (1,02кг) були

причиною смерті 92 осіб у Гопалгандже, Бангладеш, 14 квітня 1986р. Крім цього загинуло кілька десятків слонів.

*Зливи* – це дощі з інтенсивністю понад 0,5 мм за хвилину. Для Українських Карпат найхарактерніші зливи, що викликають селеві та зливові потоки. Зливові дощі призводять до вимивання рослин навіть на невеликих схилах, пошкодження посівів, водної ерозії ґрунту.

*Повені.* У західних районах України внаслідок повені (22 липня 2008 р.) потерпіли жителі Львівської, Закарпатської, Івано-Франківської, Тернопільської, Чернівецької і Вінницької областей. Під водою залишилися 9 тис. житлових будинків. В Україні зруйновано 360 мостів для автомобілів і 560 пішохідних мостів. Числяться загиблими і зниклими безвісти 38 людей, серед них 8 дітей.

*Підтоплення* – це підйом рівня ґрунтових вод, який призводить до заболочування сільгоспугідь та прилеглих територій, засолювання і виведення з сільськогосподарського обігу значної кількості земель.

Тільки за останні 20 років кількість міст і селищ України із сталими проявами підтоплення зроста удвічі – з 265 до 541, а загальна площа підтоплених територій у цих містах і селищах збільшилася з 88,6 тис. га до 196,2 тис. га.

Надзвичайно гостро постала проблема підтоплення земель на півдні України, яке останніми роками, особливо взимку 1998 р., спричинило найбільш негативні наслідки. У зоні стихійного лиха опинились Херсонська, Миколаївська, Запорізька, Дніпропетровська, Донецька, Луганська, Одеська області та АР Крим.

Так, проливні дощі та урагани у Центральній і Східній Європі, які почалися 22 липня 2008 р., призвели до різкого збільшення рівня води у річках Дністер і Прут та руйнівної повені в Україні, Молдові, Румунії, Словаччині та Угорщині.

### **17.1. 3. Географічний розподіл опадів**

Максимальна кількість опадів випадає в екваторіальному і субекваторіальному поясах, де зустрічаються пасати двох півкуль та відбувається найбільш потужне висхідне підймання повітря, насиченого вологою, його адіабатичне розширення, охолодження та конденсація, що супроводжується утворенням хмар та опадами. Кількість опадів у цих поясах становить 2000–3000 мм і більше.

У тропічних поясах панує сухе повітря. Повітря, що залишає область підвищеного тиску, заміщується повітрям, що протікає у верхніх шарах атмосфери, яке опускається та нагрівається. Хмари розсіюються. При незначній хмарності інтенсивність сонячного випромінювання висока, що спричиняє надзвичайну сухість повітря (відносна вологість може досягати 30%) та вийняtkово високі показники температури (до +30 – +50 °С). Кількість опадів не перевищує 100-200 мм за рік. Саме у цих районах розташовані пустелі Аравії, Ірану і Центральної Азії, Гобі, пустелі штатів Невада й Арізона у США, пустеля Сахара, великі пустелі в Австралії, Південній

Африці й Патагонії, а також уздовж Тихоокеанського узбережжя Південної Америки. Кількість опадів у пустелях може досягати 1-100 мм за рік. На узбережжях, на які спрямовані повітряні потоки з океанів, клімат може бути вологим тропічним.

В зоні від субтропиків до помірних широт кількість опадів збільшується до 500-1000 мм за рік завдяки процесам утворення циклонів. Але усередині материків та у пустелях висока температура та незначна хмарність. Кількість опадів може досягати 100-200 мм за рік.

Таким чином, основними факторами, що визначають географічний розподіл опадів, є зональний розподіл сонячного випромінювання, температури та атмосферного тиску, які впливають на циркуляцію повітряних мас та наявність чи відсутність хмар. Крім того, слід зазначити вплив широти місцевості, вологості повітря, пори року (сезону), гірського рельєфу, характеру земної поверхні (текстури, кольору, вмісту ґрунтової вологи), наявності частинок природного чи антропогенного походження в атмосфері, океанських течій, відносного континентального розташування.

#### 17.1.4. Температура та опади

Згідно кліматичної класифікації Кеппена [35], яка базується на врахуванні температури та опадів, відрізняють п'ять типів кліматичних зон: А – тропічний та екваторіальний; В – сухий, субекваторіальний, тропічний; С – помірний, субтропічний та континентальний; D – континентальний, субарктичний (бореальний); Е – полярний, субарктичний, арктичний.

Усередині зон типів А, С та D відрізняються клімати з сухою зимою (w), сухим літом (s) та рівномірно вологі (f). Наприклад: Af – клімат тропічних лісів; Aw – клімат саван; Bs – клімат степів; Bw – клімат пустель; Cs – клімат помірно теплий з сухим літом (середньоземноморський); Cw – клімат помірно теплий з сухою зимою; Cf – клімат помірно теплий з рівномірним зволоженням; Ds – клімат помірно холодний з сухим літом; Dw – клімат помірно холодний з сухою зимою; Df – клімат помірно холодний з рівномірним зволоженням; ET – клімат тундри; EF – клімат постійного морозу.

Додаткові літери: третя для найжаркішого, четверта для найхолоднішого місяця року: *i* – найсильніша спека: 35 °C та вище; *h* – дуже жарко: 28–35 °C; *a* – жарко: 23–28 °C; *b* – тепло: 18–23 °C; *l* – помірно: 10–18 °C; *k* – прохолодно: 0–10 °C; *o* – холодно: –10–0 °C; *c* – дуже холодно: –25– –10 °C; *d* – нестерпно холодно: –40 – –25 °C; *e* – вічна мерзлота: –40 °C та нижче.

Наприклад:

BWhl (Асуан, Єгипет) – пустельний клімат з температурою липня 28–35 °C, а січня: 10–18 °C

Dfbo (Москва, Росія) – помірно-холодний (континентальний) з температурою липня 18–23 °C, а січня: –10–0 °C

Csal (Анталья, Туреччина) – середньоземноморський клімат з температурою липня 23–28 °C, а січня: 10–18 °C.





Відношення  $^2\text{H}/^1\text{H}$  або  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  варіюють залежно від водного об'єкту. Вода у різних ситуаціях може складатися з різних комбінацій  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{16}\text{O}$  та  $^{18}\text{O}$ , а саме:  $^1\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ ,  $^1\text{H}^1\text{H}^{18}\text{O}$ ,  $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ ,  $^1\text{H}^2\text{H}^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}^1\text{H}^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}^2\text{H}^{18}\text{O}$ .

Молекулярна вага цих молекул може відрізнятися через різну кількість нейтронів у ядрі кожного атома. Це дає можливість порівнювати різні водні об'єкти – ґрунтові та підземні води, воду у водоймах, у ксилемі рослин.

Застосування сучасних методів аналізу показує, що різні ізотопи елементів поведуть себе по-різному у фізичних процесах (важкі ізотопи мають меншу рухливість та швидкість дифузії) та хімічних реакціях (атоми різних ізотопів відрізняються розмірами та атомною вагою) [36,37]. Наявність такої різниці у поведінці ізотопів називається *фракціонуванням ізотопів*.

Поширеність стабільних ізотопів виражається як відношення двох найпоширеніших ізотопів у зразку до такого ж відношення ізотопів у міжнародному стандарті. Позначається така поширеність дельта-функцією:

$$\delta_{\text{sample}} = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}})/R_{\text{standard}}] \times 1000, \quad (17.1)$$

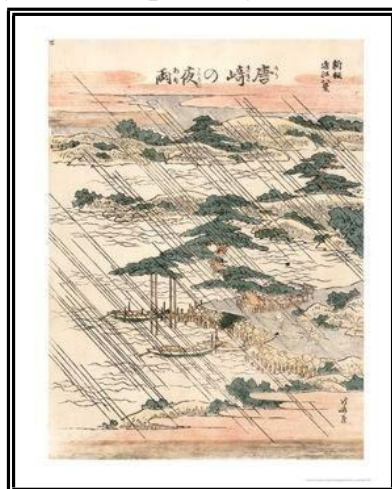
де  $R_{\text{sample}}$  – відношення  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  або  $^2\text{H}/^1\text{H}$  у зразку та  $R_{\text{standard}}$  – для міжнародного стандарту.

Оскільки різниця між відношеннями у зразку та міжнародному стандарті незначна, вона виражається у «промиле» (одна десята процента або одна тисячна; позначається як ‰).

У табл. 17.3 наведено міжнародні стандарти та абсолютні відношення для деяких ізотопів у навколишньому середовищі. Такі елементи як водень та кисень мають кілька міжнародних стандартів.

Протягом водного циклу відношення ізотопів змінюються завдяки процесам випаровування та конденсації.

Відношення  $^2\text{H}/^1\text{H}$  та  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  у воді впродовж різних опадів змінюється. Під час випаровування води з поверхні океанів, озер та вологих поверхонь легкі молекули покидають водну поверхню швидше, ніж важкі, внаслідок чого хмари мають меншу кількість важких ізотопів порівняно з океанами та озерами. Коли водна пара конденсується, вода покидає хмару у вигляді краплин дощу, у яких переважають важкі ізотопи.



17.3. Міжнародні стандарти та абсолютні відношення для деяких ізотопів у навколишньому середовищі

Елемент	$\delta$ величина	Відношення, що вимірюється ( $R_{sample}$ )	Назва міжнародного стандарту	Величина стандарту ( $R_{standard}$ )
Водень	$\delta D$	$^2H/^1H$	Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)	0,00015575
		$^2H/^1H$	Standard Light Antarctic Precipitation (SLAP)	0,000089089
Кисень	$\delta^{18}O$	$^{18}O/^{16}O$	Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)	0,0020052
		$^{18}O/^{16}O$	Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)	0,0020672
		$^{18}O/^{16}O$	Standard Light Antarctic Precipitation (SLAP)	0,0018939

Глобальний клімат, регіональна топографія та розподіл вологості впливають на ці зміни. Ядра атомів відповідають за фізичні властивості води: легкі молекули води скоріше випаровуються з поверхні океанів та збагачують атмосферну пару легкими ізотопами  $^{16}O$ . Теж саме можна сказати про рослини, які збагачують атмосферу легкими ізотопами через транспірацію. Отже, маси атмосферного повітря з легкими ізотопами рухаються до півночі, де вони охолоджуються та покидають атмосферу у вигляді опадів, збагачених важкими ізотопами  $^{18}O$  (рис. 17.1), тоді як в атмосфері залишаються легкі ізотопи  $^{16}O$ .

Джерела води, що використовуються рослинами, можна визначити завдяки аналізу ізотопного складу рослинної води. Відношення концентрацій дейтерію ( $D$ ) до водню ( $H$ ) являє собою корисну ознаку для різних джерел води.

Процес випаровування свідчить на користь легких іонів (водню), через що відношення  $D/H$  зменшується та стає більш негативним. Процес конденсації супроводжується активною участю важких іонів (дейтерію), що супроводжується збільшенням відношення  $D/H$ , яке стає менш негативним.

На величину відношення  $D/H$  впливає температура: влітку опади мають вищі значення  $D/H$  (0 - -200 ‰), ніж взимку (-200 ‰ - -400 ‰).

Аналіз ізотопного складу води у ксилемі рослин надає інформацію, звідки ці рослини споживають воду – з туману чи з ґрунтових вод.

Для вимірювання ізотопного складу води застосовують метод мас-спектрометрії.

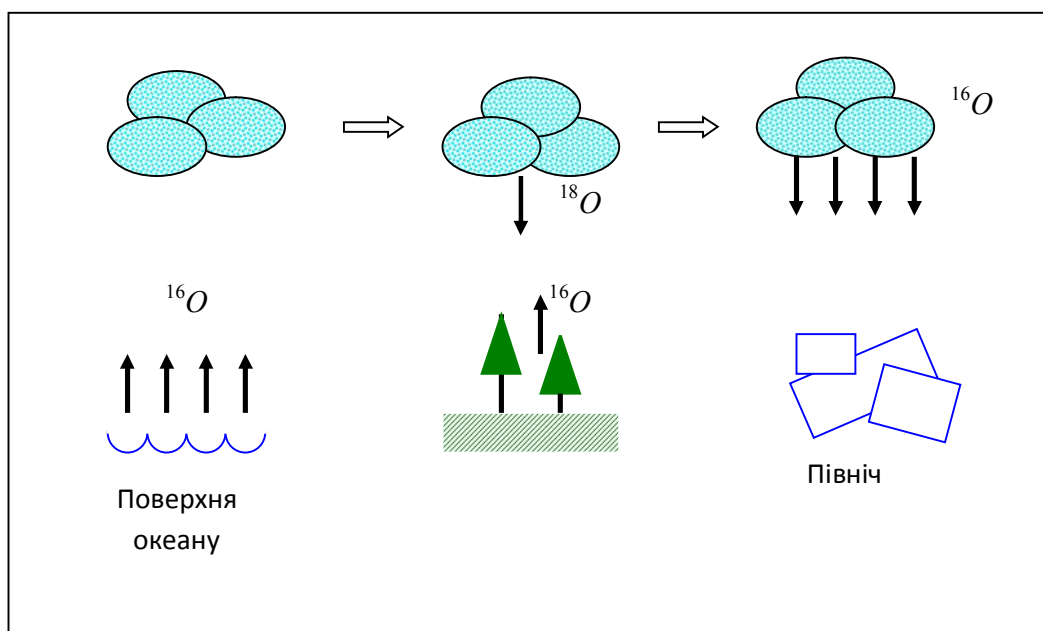


Рис. 17.1. Рух маси атмосферного повітря з легкими ізотопами [18]

Таким чином, застосування техніки стабільних ізотопів в екогідрології дає можливість вивчити походження та вік великих мас води, оцінити рівень їх перемішування, визначити місцезнаходження та параметри водних потоків.

### ***Екстремальні значення опадів***

Рекордний рівень опадів (1870 мм за 24 години, що складає 18652 т на гектар землі) зареєстрований у Сілаосі (1200 м над рівнем моря) острів Реюньон, Індійський океан, 15 та 16 березня 1952 року. За календарний місяць рекорд (9300 мм у липні 1961 року) належить містечку Черапунджи, штат Мегхалая, Індія. Тому ж Черапунджи належить рекорд і за рік - 26461 мм із 1 серпня 1860 р. по 31 липня 1861 р. 26,5 м – звичайного дев'ятиповерхового будинку під дах.

Рекордним за потужністю вважається дощ, що випав 26 листопада 1970 р. у Барсте, Гваделупа, Малі Антильські острови, під час якого випало 38.1 мм опадів за хвилину. Але денний рекорд належить акваторії Індійського океану - 1180 мм за добу.

Найбільше число дощових днів: на горі Вай-Але-Але (1569 м над рівнем моря), острів Кауаї, Гаваї, дощі падають до 350 днів у році.

## 18. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ОПАДІВ

Прилад для збирання та вимірювання рідких опадів протягом певного проміжку часу називається *опадоміром* (наприклад, кількість опадів у мм протягом 24 год).

### 18.1. Нахилені черпаки

Цей прилад використовується на автоматизованих станціях за спостереженням погоди. Він складається з двох черпаків трикутної форми, з'єднаних з одного боку. Вся конструкція може обертатися навколо горизонтальної вісі (рис.18.1). Під час дощу один з черпаків (А) заповнюється водою та перекидається; з цього моменту починає заповнюватися другий черпак (В).

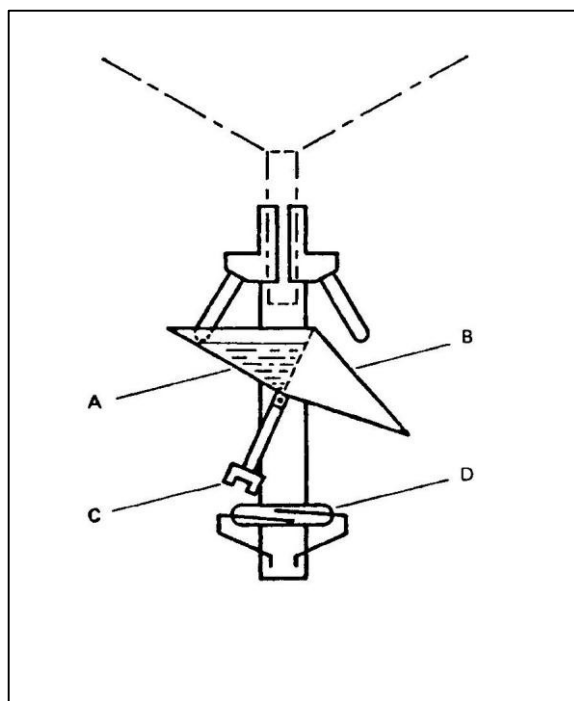


Рис.18.1. Вимірювання опадів за допомогою нахилених черпаків

Невеликий магніт (С) виконує функції контакту, що замикає електричний ланцюг (D). Кількість опадів відповідає кількості замикань ланцюга, тоді як час між двома замиканнями дає можливість оцінити інтенсивність дощу.

### 18.2. Сифонний опадомір

Опадомір цього типу являє собою циліндричний резервуар, обладнаний поплавком, що поєднується з пером самописа (рис. 18.2).

За допомогою сифону резервуар звільняється від води, коли кількість її досягне певного рівня, і перо самописа повертається у початковий стан.

Процес запису опадів триває від 24 год до 7 діб.

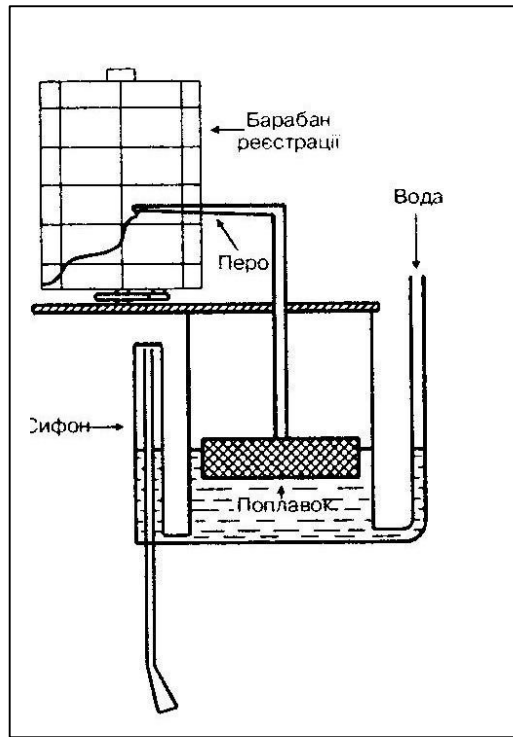


Рис. 18.2. Сифонний опадомір

### 18.3. Ваговий опадомір

Принцип дії цього приладу базується на постійному контролі ваги води, зібраної в контейнері, за допомогою вимірювальної системи. Контейнер поєднаний з пружинним механізмом та шкалою (рис. 18.3).

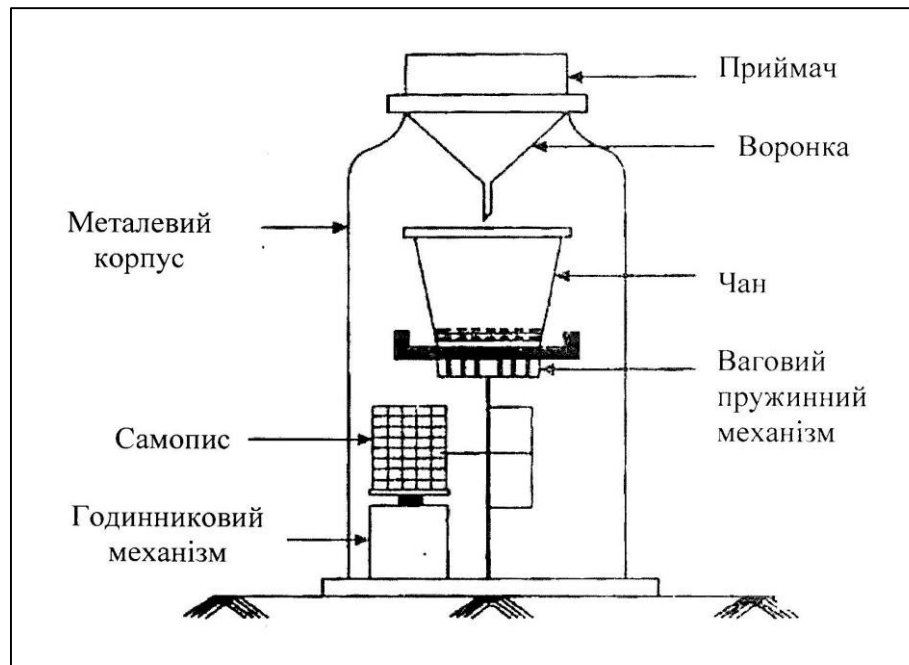


Рис. 18.3. Ваговий опадомір

#### 18.4. Дистанційне зондування опадів

Серед засобів дистанційного зондування параметрів опадів слід зазначити *доплерівський радіолокатор* або *радар* (з англ. **RADAR** – **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging), який дозволяє оцінити швидкість руху дощових краплин, або *поляриметричний доплерівський локатор*; останній генерує радіочастотні імпульси, які мають горизонтальну та вертикальну поляризацію. Детально метод доплерівської спектроскопії описаний у розділі V.

Імпульси з горизонтальною площею поляризації надають інформацію щодо горизонтальних розмірів хмар (краплини води та кристали льоду) та опадів (дощові краплини, частинки снігу або льоду, град), тоді як з вертикальною площею поляризації визначають вертикальні розміри частинок хмар або опадів. Оскільки відбиті від цих частинок радіочастотні імпульси складним чином залежать від розмірів, форми та густини частинок, можна одержати інформацію щодо швидкості поширення частинок, їх густини, локалізації тощо.

Застосування *супутників* дає можливість здійснювати аналіз та прогнозування опадів. З цією метою використовують супутники, що рухаються на геостационарних орбітах, тобто по колу над екватором; до них належать GOES-8, GOES-10, GMS-5, Metsat-6, та Metsat-7, або низькоорбітальні супутники, такі як TRMM, NOAA-15, -16, -17, DMSP F13, F14, F15.

Слід відзначити супутник *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* спільного виробництва США та Японії, призначений для моніторингу опадів у тропіках (рис. 18.4).

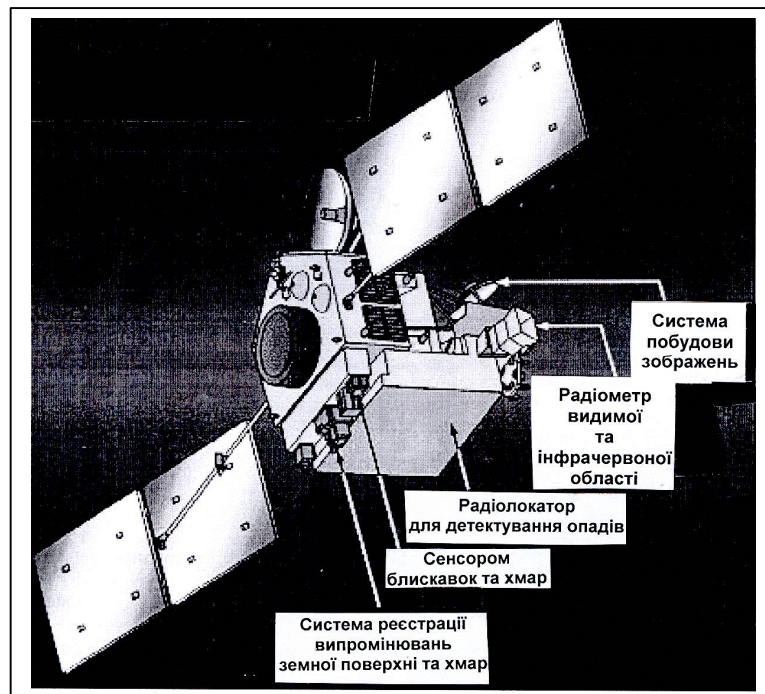


Рис.18.4 . Супутник *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* [38]

Він обладнаний радіолокатором для детектування опадів, який надає інформацію щодо інтенсивності та типу опадів, масштабів штормів, висоти, на якій відбувається перехід від снігу до дощу; системою побудови зображень, що дозволяє оцінювати кількість водяної пари в атмосфері та хмарах, інтенсивність опадів в атмосфері; радіометром видимої та інфрачервоної області, який застосовується для вимірювання яскравості та температури віддалених об'єктів; сенсором блискавок та хмар, який дає можливість попередити щодо початку або спадання грозових штормів; системою реєстрації випромінювань земної поверхні та хмар. Така супутникова система дає можливість аналізувати глобальні опади протягом року, надавати візуальні зображення опадів з космосу та застосовувати отримані дані для побудови кліматичних моделей.

*Надвисокочастотні (НВЧ) локатори* дають можливість вимірювати характеристики опадів, оцінювати водні ресурси, стан морської поверхні, прогнозувати наближення цунамі, визначати типи та розміри льодових масивів, аналізувати характер упаковки снігу. Яскравими прикладами застосування радіолокаційної техніки є дистанційне спостереження за блискавкою (рис. 18.5) та дистанційний контроль за повенями (рис. 18.6) [15].

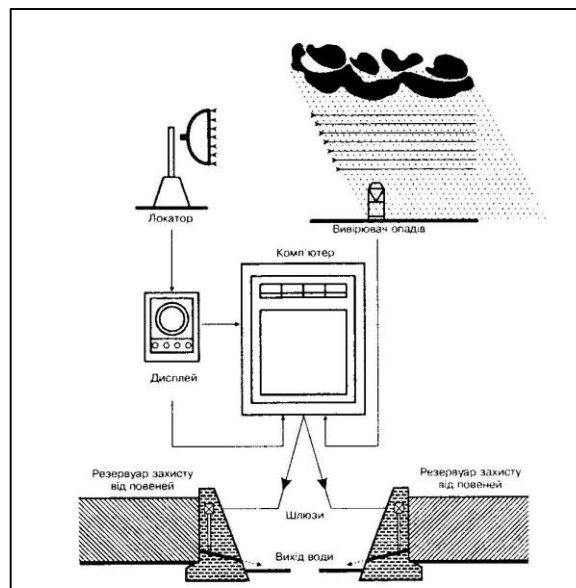
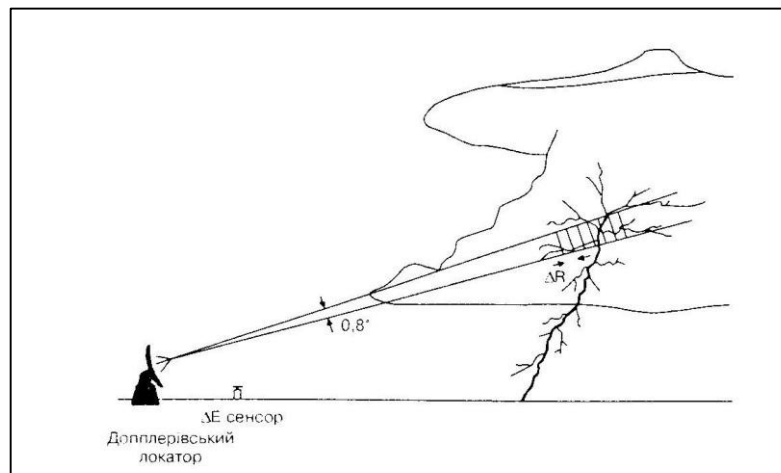


Рис. 18.5. Дистанційне спостереження за блискавкою за допомогою радіолокатора [15]

Рис. 18.6. Дистанційне спостереження за повенями за допомогою радіолокатора [15]



#### 18.4. Вимірювання туманів

*Вимірювання туману.* Туман є важливим джерелом вологи та поживних речовин для лісових екосистем. Оцінювання туману дає можливість одержати інформацію щодо кислотних дощів, водного балансу, взаємодії туману з рослинними покривами. Густина туману становить  $0,05 \text{ кг/м}^3$ ; діаметр краплин 1–40 мкм.

Туман збирають за допомогою *пасивного струнного колектора*, який містить циліндр  $21 \times 45 \text{ см}$  із загальною площею  $945 \text{ см}^2$ . Краплини туману осідають на 460 вертикальних тефлонових струнах та сковзують донизу для подальшого аналізу (рис. 18.7).

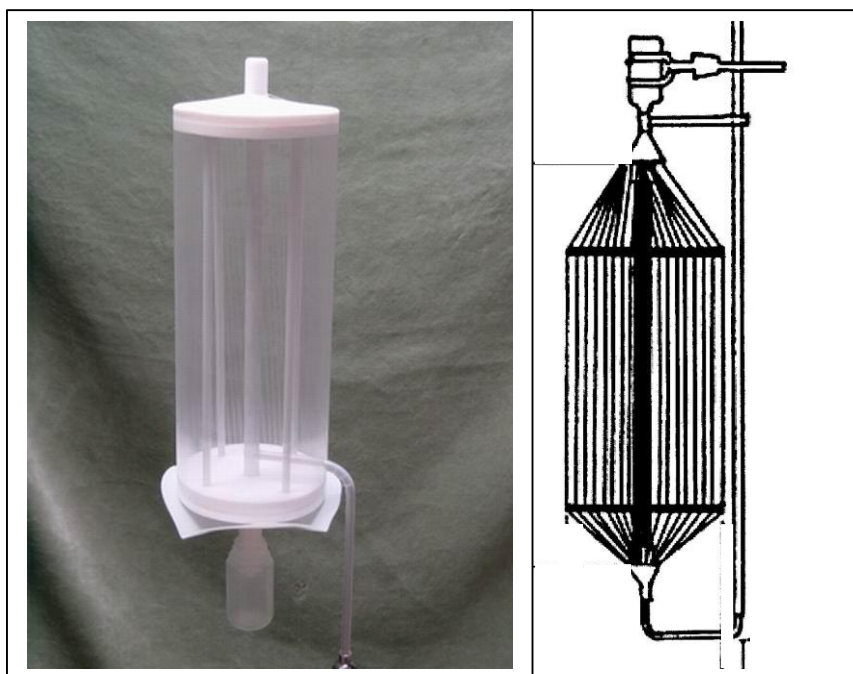


Рис. 18.7. Пасивний струнний колектор для вимірювання туману

#### Контрольні запитання та завдання

1. Назвати основні типи та форми опадів.
2. Які процеси супроводжують появу опадів?
3. Пояснити механізми утворення хмар.
4. Як та для чого використовують стабільні ізотопи під час спостережень за опадами?
5. Що таке фракціонування ізотопів?
6. Пояснити принцип дії нахилених черпаків; сифонного опадоміра.
7. Пояснити принцип дії та можливості поляриметричного доплєрівського локатора.
8. Якими приладами обладнаний супутник *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*?
9. Назвати основні кліматичні зони.
10. Охарактеризувати кліматичні зони *BWhw* та *BSks*.



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

### ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПАДІВ

#### Швидкість падіння дощових краплин

Швидкість падіння дощових краплин визначається за законом Стокса:

$$V = g \frac{(\rho_{кр} - \rho_{пов})}{\eta} \cdot \frac{2R^2}{9}, \quad (1)$$

де  $\rho_{кр}$  – густина краплини;  $\rho_{пов}$  – густина повітря;  $\eta$  – в'язкість повітря;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $R$  – радіус краплини.

#### Приклад

Визначити швидкість падіння дощової краплини радіусом 0,005 мм, якщо температура повітря становить 20 °С.

#### Розв'язання

З табл.3 (див. Додатки) знаходимо значення густини води та повітря, а з табл.4 (див. Додатки) – коефіцієнта в'язкості повітря при 20 °С:  $\rho_{кр} = 998,2 \text{ кг м}^{-3}$ ,  $\rho_{пов} = 1,205 \text{ кг м}^{-3}$ ,  $\eta = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Підставляємо числові значення у формулу ( 1 ):

$$v = 9,8 \frac{998,2 - 1,205}{18 \cdot 10^{-6}} \frac{2}{9} (5 \cdot 10^{-6})^2 = 3,0156 \cdot 10^{-3} \text{ м/с} \approx 0,3 \text{ см/с}.$$

Для більших краплин швидкість падіння визначається так:

$$v \text{ (см/с)} = 1344 \sqrt{r \text{ (см)}}. \quad (2)$$

#### Приклад

Визначити швидкість падіння краплин дощу радіусом 0,5 мм. Порівняти результати з даними рис.1.

#### Розв'язання

Використовуємо формулу ( 2 ) для знаходження швидкості падіння краплин дощу:

$$v = 1344 \sqrt{0,05} = 300 \text{ см/с}.$$

#### Контрольне завдання

Визначити швидкість падіння дощових краплин діаметром 2 мм.

Відповідь: 6 м/с.

Визначити швидкість падіння дощової краплини радіусом 0,005 мм, якщо температура повітря становить 20 °С. Густина краплі  $\rho_{кр} = 998,2 \text{ кг м}^{-3}$ ; густина повітря  $\rho_{пов} = 1,205 \text{ кг м}^{-3}$ ; в'язкість повітря  $\eta = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

#### Перехід від туману до дощу

Перехід від туману (хмари) до дощу характеризується швидкістю руху краплин, яка пов'язана з їх розміром. На рис.1 наведено залежність швидкості руху водяних краплі-

лин від їх радіуса: краплини радіусом  $< 100$  мкм належать хмарам, при більших радіусах – дощу.

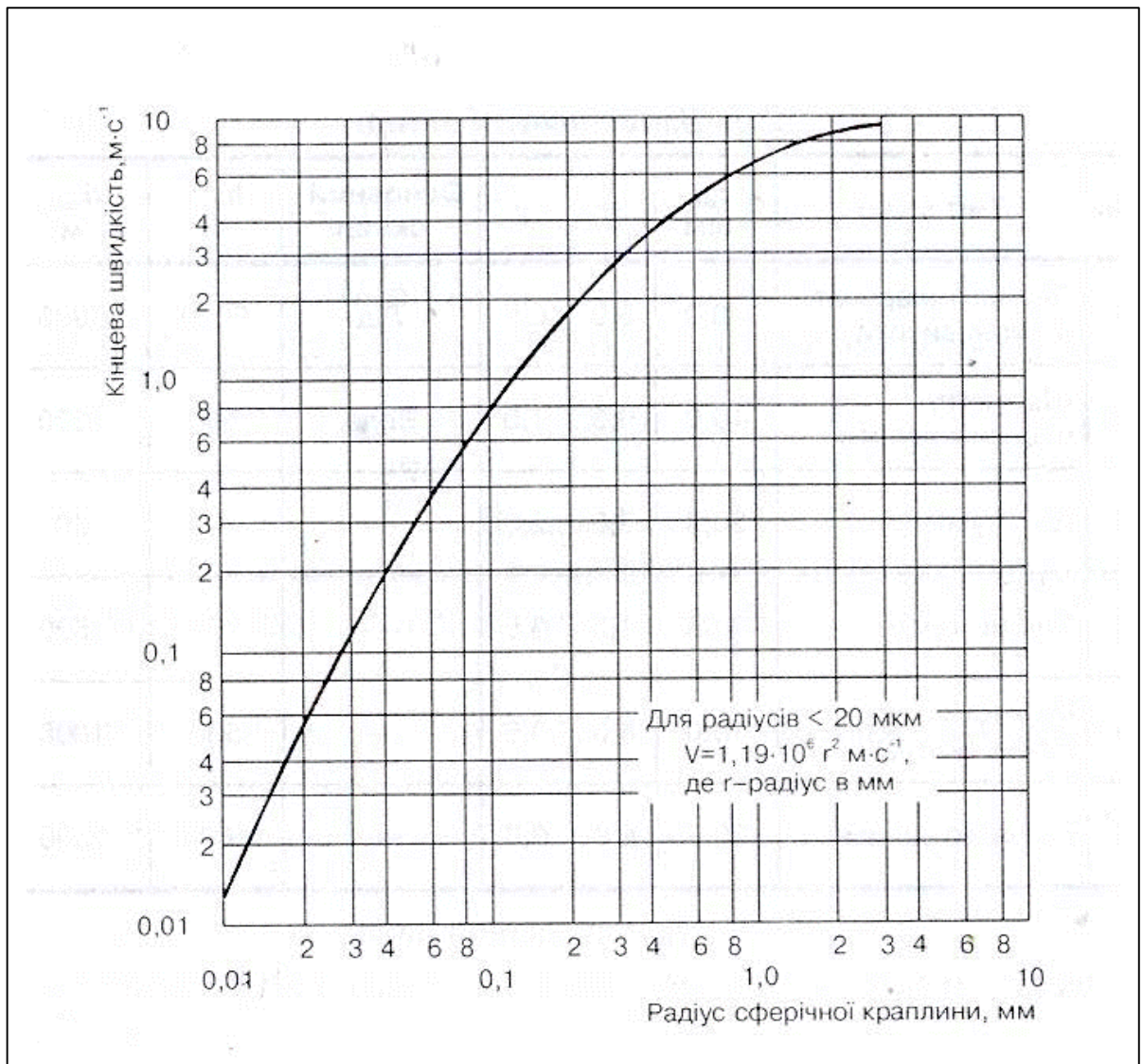


Рис. 1. Залежність швидкості руху водяних краплин від їх радіуса

Функція розподілу краплин хмари за розмірами має вигляд:

$$N(a) = N_0 a^\alpha \exp(-ba^\gamma), \quad (3)$$

де  $\alpha$  і  $\gamma$ - константи, що залежать від властивостей хмар (табл.1),  $b = \frac{\alpha}{(a_{\max})^\gamma}$ .

### 1. Властивості хмар

№	Тип хмар	$a_{max}$ , мкм	$\alpha$	$\gamma$	Основний склад	$h_{min}$ , м	$h_{max}$ , м
1	Перисто-шаруваті, по- мірні висоти	40,0	6,0	0,5	Лід	5000	7000
2	Шаруваті, невеликі висоти	10,0	6,0	1,0	Вода	500	1000
3	Шар туману	20,0	7,0	2,0	-“-	0	50
4	Легкий туман	0,05	1,0	0,5	-“-	0	1500
5	Купчасті в ясну погоду	10,0	6,0	0,5	-“-	500	1000
6	Купчасто-дошові	20,0	5,0	0,3	-“-	1600	2000

### Контрольна робота

Побудувати нормалізований розподіл за розмірами, що належать до різних типів хмар ( № 1-6 з табл.1 ). Нормалізований розподіл відповідає  $N/N_0 = 1$  при  $a = a_{max}$ .

Розподіл аерозолів за розмірами описується рівнянням:

$$N(a) N_0 a^{-\beta}, \quad (4)$$

де  $a$  – радіус аерозолу,  $\beta \approx 3$  для радіусів, що знаходяться в межах  $0,1 \text{ мкм} < a < 1 \text{ мкм}$ .

### Кінетична енергія дощових краплин

Розглянемо дощову краплину, що падає на земну поверхню. Діаметр краплини  $d = 2 \text{ мм}$ . За допомогою рис.1 визначимо кінцеву швидкість її руху:  $v = 6,5 \text{ м/с}$ .

Нехай площа поверхні, на яку падає дощ, становить  $S = 1 \text{ га} = 10^4 \text{ м}^2$ .

Об'єм води, що утворюється на поверхні землі, дорівнює;

$$V = 10^{-3} \text{ м} \cdot 10^4 \text{ м}^2 = 10 \text{ м}^3,$$

а маса

$$m = Vd = 10 \text{ м}^3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 = 10^4 \text{ кг}.$$

Якщо припустити висоту дощової хмари 500 м, то потенційна енергія води визначається так:

$$E_n = mgh = 10^4 \text{ кг} \cdot 9,81 \text{ м/с} \cdot 500 \text{ м} = 4,9 \cdot 10^7 \text{ Дж}.$$

Кінетична енергія дощу

$$E_k = mv^2/2 = 10^4 \text{ кг} \cdot (6,5 \text{ м/с})^2 / 2 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

Кінетична енергія дощу, що приходиться на  $1 \text{ м}^2$ , становить:

$$E_k = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Дж} / 10^4 \text{ м}^2 = 21 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{мм}.$$

## 19. МЕТОД ВИХРОВОЇ КОВАРІАЦІЇ

### 19.1. Турбулентність

*Турбулентність* – це явище, що спостерігається в течії рідин або газів та яке полягає в утворенні в цих течіях чисельних вихрів різних розмірів, внаслідок чого такі характеристики як швидкість, температура, тиск, густина зазнають хаотичних флуктуацій та відповідних нерегулярних змін у просторі та часі. Цим турбулентні течії відрізняються від ламінарних.

Завдяки великій інтенсивності турбулентного перемішування відбувається підвищена здатність течії до перенесення кількості руху, теплоти, маси (частинок).

Перехід від ламінарної течії до турбулентної визначається *числом Рейнольдса*, яке визначається за формулою:

$$Re = \rho v l / \mu, \quad (19.1)$$

де  $\rho$  – густина рідни;  $v$  – швидкість потоку;  $l$  – характерний лінійний розмір (наприклад, діаметр труби);  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості.

Ламінарна течія характеризується переважанням сил в'язкості та низькими значеннями числа Рейнольдса; турбулентна течія відбувається при великих значеннях числа Рейнольдса.

Розглянемо рух повітряного потоку вздовж гладкої поверхні. Якщо режим потоку *ламінарний* (шари повітря, що рухаються, не перемішуються), відбувається перенесення імпульсу між індивідуальними молекулами. Дійсно, коли повітряний потік рухається над твердою поверхнею, його швидкість збільшується при віддаленні від поверхні, тобто виникає градієнт швидкості  $\frac{\partial v}{\partial z}$  (рис. 19.1).

Цей градієнт, який можна вважати у першому наближенні лінійним, виникає за рахунок сил тертя з поверхнею. Між шарами повітря, які переміщуються паралельно один одному з різними за модулем швидкостями, також виникають сили тертя. З боку шару, що рухається швидше, на шар, що рухається повільніше, діє прискорююча сила.

І, навпаки, шари, що рухаються повільно, гальмують шари, що рухаються швидко. Сили тертя, що виникають при цьому, спрямовані паралельно до поверхні шарів. Завдяки градієнту швидкості відбувається перенесення імпульсу *mv*.

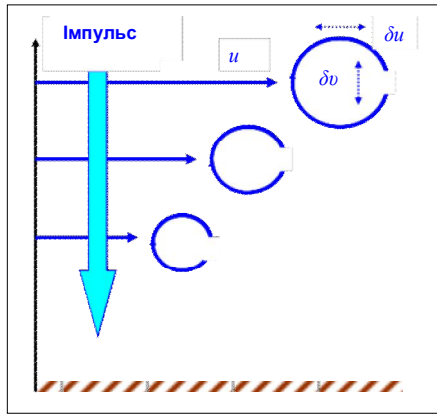


Рис. 19.1. Схема перенесення імпульсу потоком повітря, що рухається, до стаціонарної поверхні

Швидкість переносу імпульсу  $\tau$  визначається за виразом:

$$\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (19.2)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості.

## 19.2. Граничний шар атмосфери

Турбулентність регулярно відбувається у відносно тонкому шарі атмосфери, який називається *граничним шаром*. Розміри турбулентного шару коливаються від 100 м уночі та до 4000 м удень.

Турбулентність супроводжується появою *флуктуацій* або *вихрів* – потоків повітря, які можуть мати напрямок, протилежний до основного потоку, особливо під час кругового руху. Отже, повітряний потік може бути представлений як горизонтальний потік численних кругових вихрів, які поширюються у тривимірному просторі і мають, таким чином, вертикальну компоненту.

Ці вихори беруть участь у перенесенні теплоти, води, імпульсу тощо в атмосфері.

Якщо порція повітря, що відповідає одному рівню, даній температурі та імпульсу, переходить на інший рівень, цей перехід супроводжується також перенесенням теплоти та імпульсу на новий рівень. Це явище аналогічне дифузійному процесу в газах.

Процес перенесення теплоти, маси та імпульсу з одного рівня на інший характеризується потоком відповідної величини, який можна оцінити як добуток флуктуацій температури, горизонтальної компоненти вітру або маси на вертикальну компоненту вітру.

Незважаючи на хаотичний характер повітряного потоку такого типу, його параметри можна оцінити за допомогою *методу вихрової коваріації*.

### 19.3. Метод вихрової коваріації

*Коваріація* – це статистичне вимірювання кореляції між флуктуаціями двох різних величин. Коваріація визначає ступінь, з яким обидві величини змінюються разом.

Метод вихрової коваріації використовують для оцінювання атмосферних потоків  $H_2O$ ,  $CO_2$ , аерозолів, імпульсу, теплоти, що переносяться у атмосферному граничному шарі у вертикальному напрямку. Ситуація здається хаотичною, але вертикальний рух імпульсу, теплоти, води та ін. в атмосфері можна оцінити за допомогою веж.

Розглянемо швидкість вітру з горизонтальною  $u$  та вертикальною  $v$  компонентами

$$u = \bar{u} + \delta u; \quad v = \bar{v} + \delta v, \quad (19.3)$$

де  $\bar{u}$  та  $\bar{v}$  – середні значення компонентів швидкості вітру, а  $\delta u$  та  $\delta v$  – флуктуації цих компонентів.

Коваріація між двома змінними величинами  $\delta u$  та  $\delta v$  визначається так:

$$Cov_{uv} = \frac{\sum \delta u \delta v}{n}, \quad (19.4)$$

де  $n$  – кількість змінних.

Підставляючи (19.3) у (19.4), одержимо:

$$Cov_{uv} = \frac{\sum (u - \bar{u})(v - \bar{v})}{n}, \quad (19.5)$$

Правила усереднення Рейнольдса:

Якщо  $A$  і  $B$  змінюються, а  $c$  – стала, то:

$$\begin{array}{l} \text{Тоді} \\ A = \bar{A} + \delta a; \\ B = \bar{B} + \delta b. \\ \\ c = \bar{c}; \\ (\overline{cA}) = c\bar{A}; \\ (\overline{A}) = \bar{A}; \\ (\overline{AB}) = \overline{A\bar{B}}; \\ (\overline{A+B}) = \bar{A} + \bar{B}; \\ \left(\overline{\frac{dA}{dt}}\right) = \frac{d\bar{A}}{dt}; \\ \overline{\delta a} = 0; \overline{\delta a \delta b} \neq 0. \end{array} \quad (19.6)$$

*Потік величини* визначає, скільки цієї величини переноситься через одиницю площі за одиницю часу. Потік залежить від: кількості величини; розмірів площі, через яку переноситься величина; часу перенесення величини.

#### 19.4. Потік вертикального моменту

Миттєвий вертикальний потік імпульсу визначається так:

$$F(t) = \rho u(t)v(t). \quad (19.7)$$

Усреднений потік дорівнює:

$$F = (\overline{uv}), \quad (19.8)$$

де  $\rho$  густина повітря.

Врахуємо середні значення та флуктуації:

$$\begin{aligned} F &= \rho \overline{(u + \delta u)(v + \delta v)} = \\ &= \rho (\overline{uv} + \overline{u\delta v} + \overline{\delta u v} + \overline{\delta u \delta v}). \end{aligned} \quad (19.9)$$

Оскільки  $\overline{v} = 0$  та  $\overline{\delta u} = \overline{\delta v} = 0$ , останнє рівняння перетвориться до вигляду:

$$F = \rho (\overline{\delta u \delta v}) \quad (19.10)$$

Тут припускаємо, що густина повітря не змінюється.

Отже, вертикальний потік імпульсу являє собою коваріацію між флуктуаціями горизонтальної та вертикальної швидкостей.

Якщо вихрові флуктуації спрямовані донизу ( $\delta v < 0$ ), флуктуації горизонтального вітру, що викликаються цим рухом донизу, матимуть тенденцію перевищувати середню швидкість ( $\delta u > 0$ ), оскільки швидкість горизонтального вітру збільшується з висотою.

Отже, спрямовані донизу вихори захоплюють горизонтальні потоки повітря з собою, тоді як вертикально спрямовані догори вихори переносять горизонтальні потоки з невисокою швидкістю догори.

Таким чином, добуток флуктуацій  $\delta v \delta u$ , який є коваріацією між  $v$  та  $u$ , є негативним.

#### 19.5. Перенесення аерозолів

Розглянемо місто з граничним атмосферним шаром над ним. Нехай місто є джерелом аерозолів, які внаслідок підймання утворюють від'ємний градієнт концентрації. Повітря у верхніх шарах має меншу концентрацію аерозолів.

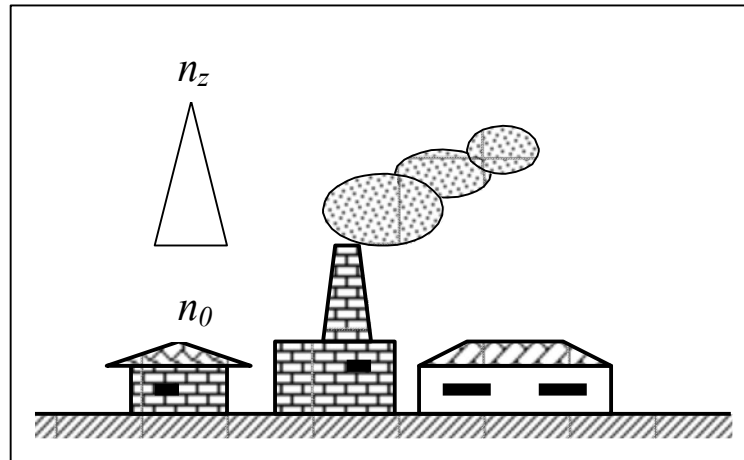


Рис. 19.2. Утворення від'ємного градієнту концентрації

Якщо вихрові флуктуації спрямовані донизу ( $\delta v < 0$ ), флуктуації концентрації аерозолів, що викликаються цим рухом донизу, матимуть тенденцію зменшуватися ( $\delta n < 0$ ), оскільки концентрація аерозолів зменшується із збільшенням висоти. Добуток  $\delta v \delta n$  є позитивним.

Якщо вихрові флуктуації спрямовані догори ( $\delta v > 0$ ), флуктуації концентрації аерозолів збільшуються ( $\delta n > 0$ ), оскільки вони переносять шари з більшою концентрацією догори. Це означає, що добуток  $\delta v \delta n$ , який є коваріацією між  $v$  та  $n$ , є позитивним.

### 19.6. Потік відчутної теплоти

*Відчутна теплота* переноситься з поверхні в атмосферу завдяки теплопровідності або конвекції. Цей потік виникає завдяки градієнту температури між земною поверхнею та атмосферою. Але оскільки теплопровідність повітря є невисокою, основним процесом перенесення відчутної теплоти є конвекція.

Розглянемо перенесення відчутної теплоти. Потік цієї теплоти спрямований донизу, якщо вихори, що рухаються донизу, містять повітря з температурою, більшою ніж середня, та навпаки.

Миттєвий вертикальний потік відчутної теплоти визначається так:

$$H = \rho_a C_p v(t) T(t). \quad (19.11)$$

Усереднений потік дорівнює:

$$H = \overline{\rho C_p v T}. \quad (19.12)$$

До останнього виразу підставимо середні значення та флуктуації величин  $T$  та  $\rho_a C_p v$ :



$$H = \overline{(\rho C_p v + \rho C_p \delta v)(T + \delta T)} = \overline{\rho C_p v T} + \overline{\rho C_p v \delta T} + \overline{\rho C_p \delta v T} + \overline{\rho C_p \delta v \delta T}. \quad (19.13)$$

Перший та другий члени останнього рівняння  $\overline{\rho C_p v T} + \overline{\rho C_p v \delta T}$  дорівнюють нулю, оскільки  $\overline{\rho C_p v} = 0$  для сухого повітря. Отже, можна отримати вираз:

$$H = \overline{\rho C_p \delta v \delta T}. \quad (19.14)$$

Таким чином, потік відчутної теплоти визначається як добуток густини повітря, питомої теплоємності повітря за сталого тиску та коваріації флуктуацій миттєвої вертикальної швидкості повітря та температури:

$$H = \rho_a C_p \overline{\delta v \delta T_a} \quad (19.15)$$

де  $\rho_a$  – густина повітря;  $C_p$  – питома теплоємність повітря за сталим тиском;  $\overline{\delta v}$  та  $\overline{\delta T_a}$  флуктуації флуктуацій миттєвої вертикальної швидкості повітря та температури.

Компоненти цього виразу можна безпосередньо вимірювати детектором з достатньо швидким відгуком.

### 19.7. Потік прихованої теплоти

Потік енергії від земної поверхні до атмосфери, що переноситься водяною парою, називається *потокom прихованої теплоти*. Прихована теплота викликає зміну фізичного стану (вода перетворюється на пару), але не змінює температуру речовини.

Потік прихованої теплоти  $\lambda E$  визначається як коваріація між флуктуаціями миттєвої вертикальної швидкості вітру та густиною водяної пари:

$$\lambda E = L_v \overline{\delta v \delta \rho_v} \quad (19.16)$$

де  $L_v$  – прихована теплота випаровування;  $\rho_w$  – густина водяної пари;  $\overline{\delta v}$  флуктуації миттєвої вертикальної швидкості;  $\overline{\delta \rho}$  – флуктуації густини водяної пари.

*Потік прихованої теплоти* – це потік теплоти від земної поверхні до атмосфери, який супроводжується випаровуванням води з поверхні з подальшою конденсацією водяної пари у тропосфері.

Цей процес є дуже важливим з точки зору забезпечення енергетичного бюджету Землі.

### 19.8. Потік двоокису вуглецю

Цей потік може бути представлений як коваріація між флуктуаціями  $\overline{\delta v}$  миттєвої вертикальної швидкості та густини двоокису вуглецю  $\overline{\delta \rho_c}$ .

$$F_C = \overline{\delta v \delta \rho_c}. \quad (19.17)$$

Усереднення здійснюються протягом 15 або 30 хвилин (10 Гц).

Здатність атмосфери здійснювати перенесення теплоти або маси залежить від розмірів вертикальних флуктуацій, які збільшуються зі зростанням відстані від земної поверхні; вони також залежать від нерівності поверхні та горизонтальної компоненти швидкості вітру.

Отже, процес перенесення теплоти, маси та імпульсу можна оцінити як добуток флуктуацій вертикальної компоненти вітру на температуру, горизонтальну компоненту вітру або масу на:  $F \sim \delta v \delta T$ ;  $F \sim \delta v \delta u$ ;  $F \sim \delta v \delta m$ .



## 20. МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ВИХРОВОЇ КОВАРІАЦІЇ ТА АКУМУЛЯЦІЇ

### 20.1. Вимірювання вихрової коваріації

Зазвичай комплекс приладів для оцінювання вихрової коваріації передбачає вимірювання густини водної пари, температури повітря, швидкості вітру та містить три сенсори: інфрачервоний газоаналізатор (або гігрометр) для оцінювання  $H_2O$  та  $CO_2$ , тривимірний ультразвуковий анемометр для оцінювання температури повітря та швидкості вітру у вертикальному та двох горизонтальних напрямках.

Усі ці прилади розташовано на різних висотах за допомогою метеорологічної вежі (рис. 20.1); дані, отримані від цих приладів, обробляються на комп'ютері. Частотний відгук сенсорів становить 0,1 – 10 Гц для досліджень коваріації на висоті кількох метрів, та 0,001 Гц – поблизу гладкої поверхні.



Рис. 20.1. Метеорологічна вежа Кахоку (Японія): *а* – загальний вигляд; *б* – комплект приладів для вимірювання вихрової коваріації

Повний перелік приладів, розташованих на метеорологічній вежі, наведено в табл. 20.1.

20.1. Повний перелік приладів, розташованих на метеорологічній вежі Тахоку (Японія) [39]

Параметри спостереження	Висота над землею поверхнею	Прилад, тип, фірма
Глобальне сонячне випромінювання (падаюче)	47,2 м	Піранометр (CM14, Kipp & Zonen, Нідерланди)
Глобальне сонячне випромінювання (відбите)	47,2 м	Піранометр (CM14, Kipp & Zonen, Нідерланди)
Довгохвильове випромінювання (падаюче)	47,2 м	Інфрачервоний радіометр (CNR1, Kipp & Zonen, Нідерланди)
Довгохвильове випромінювання (відбите)	47,2 м	Інфрачервоний радіометр (CNR1, Kipp & Zonen, Нідерланди)
Сумарне випромінювання	47,2 м	Сумарний радіометр (NR-LITE, Kipp & Zonen, Нідерланди)
ГПФФ (падаюча)	Не визначена.	-
ГПФФ (відбита)	47,2 м	Квантовий сенсор (LI-190, LI-COR, USA)
Пряме/дифузне випромінювання	51,0 м	Піранометр (CM3, Kipp & Zonen, Нідерланди з кільцеподібною стрічкою (PSB-100, Prede, Японія)
Пряма/дифузна ГПФФ	Не визначена	-
Температура повітря	51,0;41,5;34,0;22,0; 10,5 м	Платиновий термометр опору (HMP45D, VAISALA, Фінляндія/ ML-020L, ЕКО, Японія)
Вологість	51,0;41,5;34,0;22,0; 10,5 м	Ємнісний гігрометр (HMP45D, VAISALA, Фінляндія), аспіраційний гігрометр (ML-020L, Еко, Японія)
Температура ґрунту	0,05 м	Термістор (HOBO S-TMB-002, Onset, США)
Тепловий потік ґрунту	0,02 м	Перетворювач теплового потоку (HFT-3.1, REBS, США)
Вміст води в ґрунті	0,05 м	Ємнісний сенсор (ECH20, Decagon Devises, США)
Швидкість вітру	45,7; 41,7; 37,7 м	Чашечковий анемометр (Met-One 014A)
Напрямок вітру	51,0 м	Тривимірний ультразвуковий анемометр-термометр (DA600, KAIJO, Японія)
Атмосферний тиск	51,0 м	Сенсор атмосферного тиску (PTB210, VAISALA, Фінляндія)
Опади	1,5 м	Дощомір: нахилені черпаки (RT-5, Ikeda Keiki, Японія)
CO <sub>2</sub> концентрація	44,2; 38,5; 33,5; 27,0; 20,2; 13,5;6,8; 1,0 м	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O аналізатор (замкнута система) (LI-6262, LI-COR, США)



Можливе розташування вимірювальних приладів на метеорологічній вежі наведено на рис. 20.2.

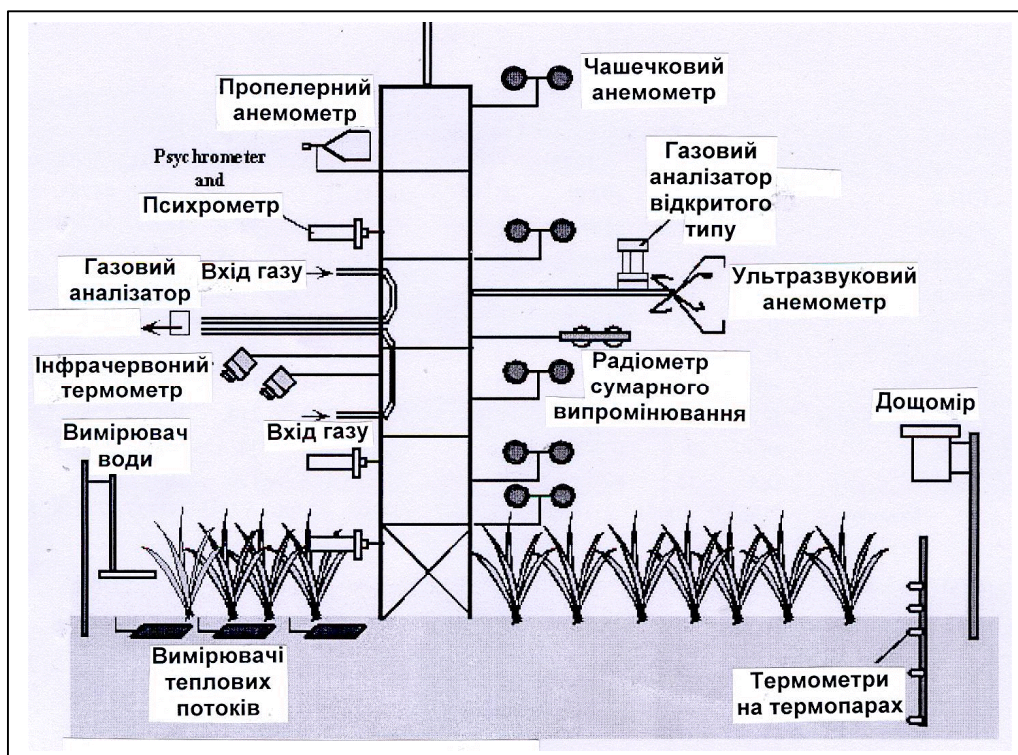


Рис. 20.2. Можливе розташування вимірювальних приладів на метеорологічній вежі

### 20.1.1. Інфрачервоні газові аналізатори

Принцип дії інфрачервоного газового аналізатора полягає у реалізації здатності асиметричних молекул (до яких відноситься  $\text{CO}_2$ ) поглинати інфрачервоне випромінювання на певних довжинах хвиль. Основні смуги поглинання  $\text{CO}_2$  знаходяться в області 4,25 мкм, 2,66 мкм, 2,77 мкм та 14,99 мкм. Поглинання газом випромінювання на довжині хвилі  $\lambda$  визначається за законом Бера-Ламберта:

$$\alpha(\lambda) = 1 - \exp(-Clk_\lambda), \quad (20.1)$$

де  $C$  – молярна концентрація  $\text{CO}_2$ ,  $l$  – довжина оптичного шляху,  $k_\lambda$  – молярний коефіцієнт поглинання на довжині хвилі  $\lambda$ .

Інфрачервоні газові аналізатори відзначаються високою точністю вимірювань, простотою та надійністю.

Конструкції сучасних ІЧГА складаються з джерела інфрачервоного випромінювання, газової кювети та детектора. Схему однопроменевого газового аналізатора відкритого типу наведено на рис. 20.3.

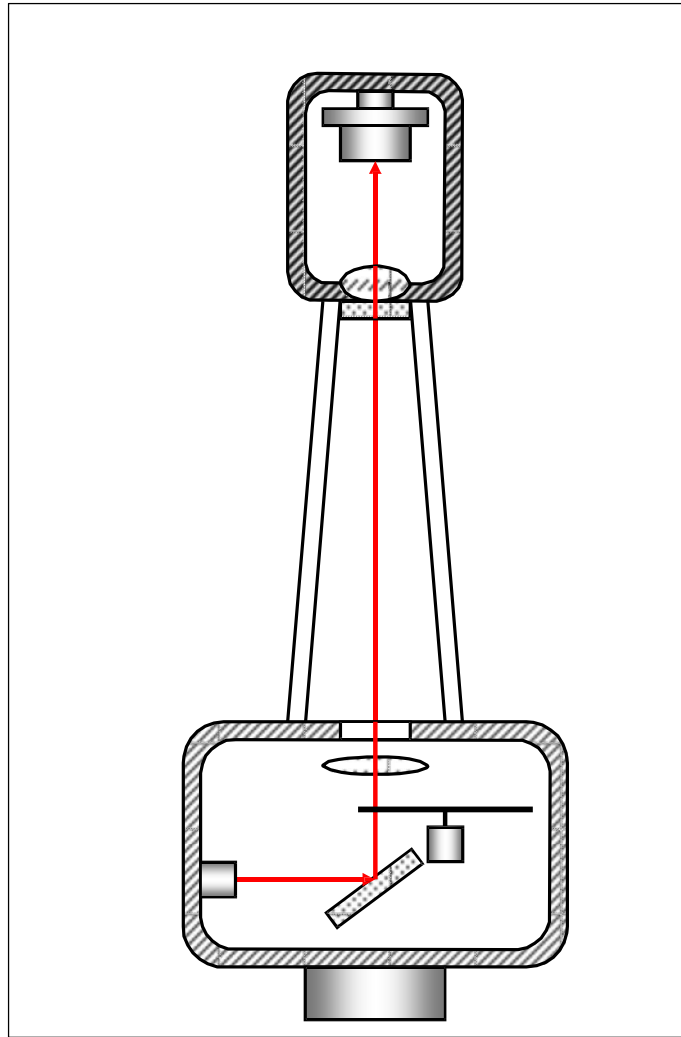


Рис. 20.3. Схема однопроменевого газового аналізатора відкритого типу

Прилад містить джерело інфрачервоного випромінювання, оптичну систему, що складається з дзеркала, лінз, сапфірового віконця та фільтрів з довжинами хвиль пропускання 4,26 мкм та 2,59 мкм (що відповідають поглинанню  $\text{CO}_2$  та водяної пари відповідно). Інфрачервоне випромінювання діаметром 1 см пропускають через модулятор, який обертається зі швидкістю 9000 обертів за хвилину, після чого воно проходить вздовж відкритого простору 12,5 см з повітрям, яке аналізується, та поступає на детектор, виготовлений з селеніду свинцю. Електричний сигнал з виходу детектора подається на систему реєстрації. Діапазон вимірювань становить 0 – 3000 ppm  $\text{CO}_2$  та від 0 до 60 ммоль/моль для  $\text{H}_2\text{O}$ . Інтервал температур варіює від  $-25$  до  $+50$  °C.

### 20.1.2. Практичні вимірювання вихрової коваріації

Розглянемо швидкодіючі вимірювання концентрації газу ( $C$ ) у слідових кількостях; вертикальної швидкості вітру ( $u$ ) та їх коваріації ( $\delta u \delta C$ ) [40].

Миттєві значення коваріації  $\delta u \delta C$  змінюються від  $-6$  до  $9$   $\text{мкг/м}^3$  за секунду, тоді як середнє значення становить  $1$   $\text{мкг/м}^3$ . Остання величина відповідає потоку газу (рис. 20.4).

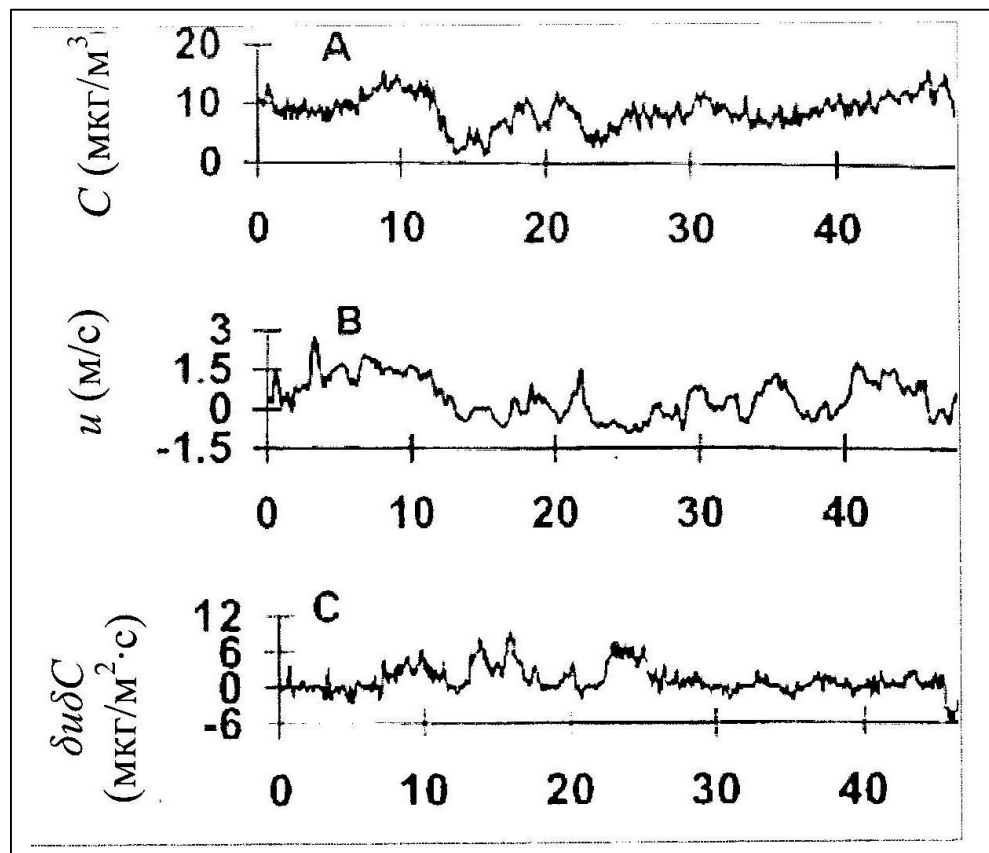


Рис. 20.4. Швидкодіючі вимірювання концентрації газу ( $C$ ) у слідових кількостях вертикальної швидкості вітру ( $u$ ) та їх коваріації ( $\delta u \delta C$ ) [40].

Ще один приклад застосування методу вихрової коваріації – вимірювання потоків газів у рослинному покриві в австралійській савані [41]. Упродовж вологої пори року сумарне випромінювання  $R_n$  сягає максимального значення  $900$   $\text{Вт/м}^2$ , а прихована теплота  $LE$  – близько  $450$   $\text{Вт/м}^2$ . Флуктуації виникають завдяки хмарам. Відчутна теплота  $H$  характеризується максимальним значенням близько  $200$   $\text{Вт/м}^2$ .

Під час сухої пори року, незважаючи на майже такі ж самі значення сумарного випромінювання, рівень прихованої теплоти зменшується приблизно до  $180$   $\text{Вт/м}^2$ , а відчутної теплоти – збільшується приблизно до  $450$   $\text{Вт/м}^2$  (рис. 20.4).

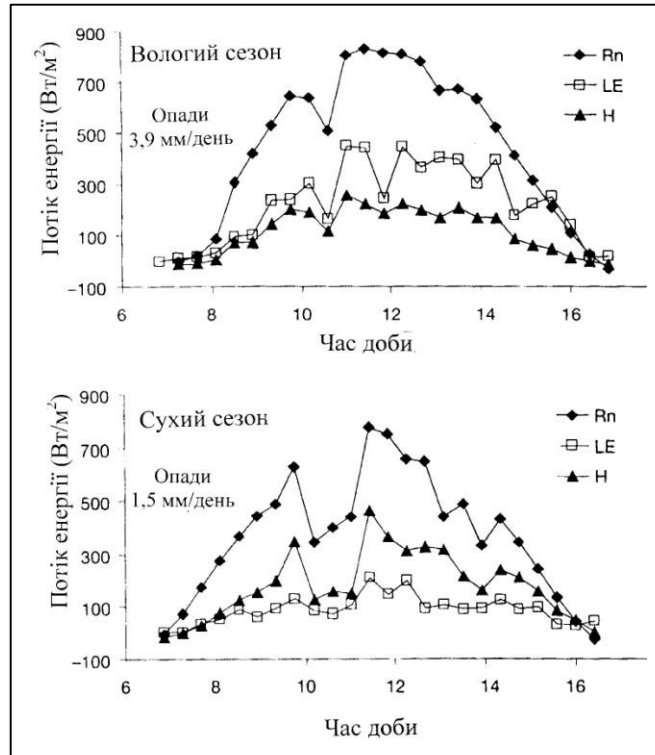


Рис. 20.4. Вимірювання потоків газів у рослинному покриві в австралійській савані [41].

## 20.2. Вимірювання вихрової акумуляції

Альтернативним методу вихрової коваріації є метод *вихрової акумуляції*, суть якого полягає у збиранні газів у слідових кількостях у два резервуари. Один з резервуарів розташований унизу, а другий – нагорі повітряного потоку, який аналізується. Швидкість, з якою гази збираються в об'ємах резервуарів, пропорційна вертикальній швидкості вітру. Повітряний потік можна оцінити завдяки різниці мас, зібраних у кожному резервуарі:

$$F = \delta v \delta c = \frac{M_v - M_n}{2kt}, \quad (20.2)$$

де  $\delta v$  – флуктуації вертикальної компоненти швидкості вітру;  $\delta c$  – флуктуації концентрації газів;  $t$  – інтервал часу;  $k$  – константа, яка зв'язує швидкість потоку  $\frac{dv}{dt}$  з абсолютною величиною флуктуацій вертикальної швидкості вітру  $\delta v$ :

$$\frac{dv}{dt} = k|\delta v|. \quad (20.3)$$

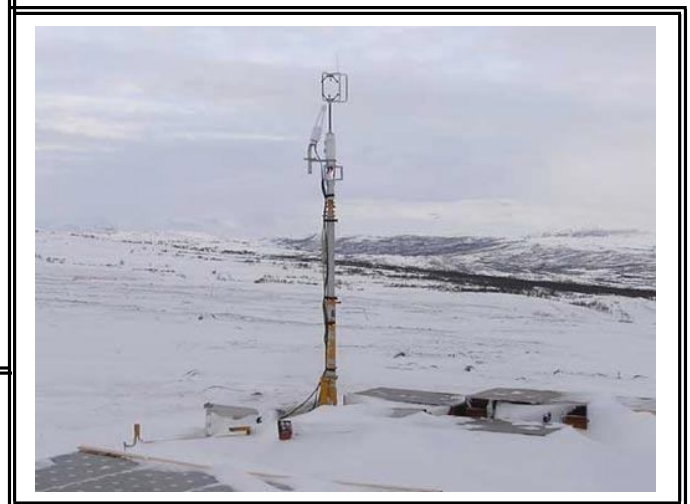
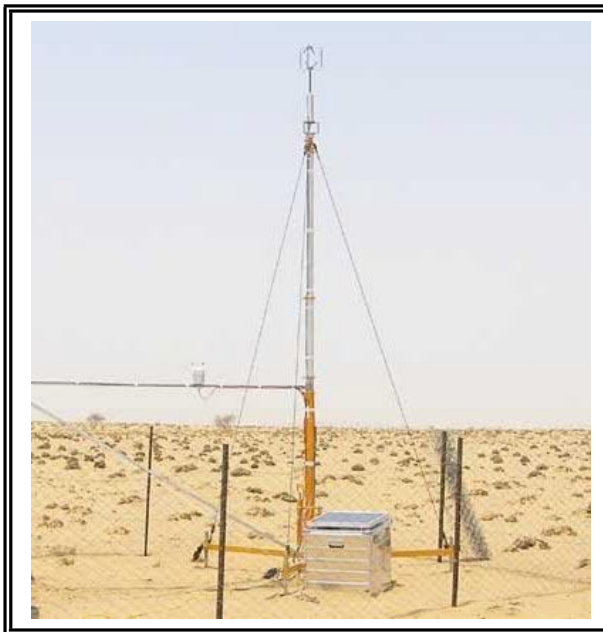


Так, у роботі [42] було визначено (за параметрами  $v = 0-4$  мкг/с;  $k = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-2}$ ,  $t = 70$  с), що маси, зібрані у нижньому та верхньому резервуарах дорівнювали 5,6 нг та 4 нг відповідно, а величина потоку  $F$  дорівнювала близько  $1 \text{ мкг/м}^2 \cdot \text{с}$ .

Недоліком методу є повільне відкладення забруднювачів у системах збирання зразків [43].

### Контрольні запитання та завдання

1. Дати визначення турбулентності.
2. Що характеризує число Рейнольдса? Від чого воно залежить?
3. Охарактеризувати граничний шар атмосфери.
4. Що таке флуктуації або вихори?
5. У чому полягає суть методу вихрової коваріації?
6. Потоки яких величин можна оцінити за допомогою методу вихрової коваріації?
7. В чому полягає метод вихрової акумуляції?
8. Навести основні приклади оцінювання вихрової коваріації.
9. Пояснити принцип дії інфрачервоного газового аналізатора відкритого типу.



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

### ОБЧИСЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ КОВАРІАЦІЇ ТА КОРЕЛЯЦІЇ ТА ЇХ ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

#### Приклад

Студентам 1-4 курсів вибірково було задано запитання: хто любить кавун ( $u$ ), а хто – свинячий хрящик ( $v$ )?

Визначити коефіцієнти коваріації та кореляції між пристрастями студентів чотирьох курсів – любителів кавунів та свинячих хрящиків.

#### Розв'язання

Розподіл відповідей має такий характер:

Курс	$u$	$v$	$\delta u = u - \bar{u}$	$\delta v = v - \bar{v}$	$\delta u \cdot \delta v$
1	3	4	-1	-2	2
2	1	4	-3	-2	6
3	3	8	-1	2	-2
4	9	8	5	2	10
$\Sigma$	16	24	0	0	16
$\bar{u}$ або $\bar{v}$	4	6	0	0	
$\sigma_u^2$ або $\sigma_v^2$	9	4			
$\sigma_u$ або $\sigma_v$	3	2			
$\text{Cov} \delta u \cdot \delta v = \Sigma \delta u \cdot \delta v / 4$					4
$\text{Corr} \delta u \cdot \delta v = \text{Cov} \delta u \cdot \delta v / \sigma_u \cdot \sigma_v$					$4/3 \cdot 2 = 0,66$

Тут  $\bar{x}$  та  $\bar{y}$  – середні значення величин;  $\delta u$  та  $\delta v$  – флуктуації величин;  $\text{Cov} \delta u \cdot \delta v$  – коефіцієнт коваріації;  $\text{Corr} \delta u \cdot \delta v$  – коефіцієнт кореляції.

Отже, коефіцієнт коваріації дорівнює 4,0, а коефіцієнт кореляції – 0,66.

#### Приклад

Графік залежності флуктуацій горизонтальної  $u$  та вертикальної компоненти  $v$  вітру наведено на рис. 1.

Результати обчислення коефіцієнтів коваріації та кореляції між горизонтальною  $u$  та вертикальною  $v$  компонентами швидкості вітру наведено у табл. 1.

Слід відзначити схожість та різницю між цими коефіцієнтами. Коефіцієнт коваріації позитивний, якщо  $y$  збільшується із збільшенням  $x$  та негативний, якщо  $y$  зменшується із збільшенням  $x$ . Позитивні значення коефіцієнта кореляції свідчать про пряму кореляцію між  $y$  та  $x$ , тоді як негативні значення означають наявність оберненої кореляції між  $y$  та  $x$ . Втім, коефіцієнти коваріації не мають верхніх та нижніх границь, а коефіцієнти кореляції можуть змінюватися у межах від +1 до -1.

Зазвичай інтервали значень коефіцієнтів кореляції свідчать про: 0,00-0,30 – слабку кореляцію; 0,30-0,70 – помірну, 0,70-1,00 – високу кореляцію.

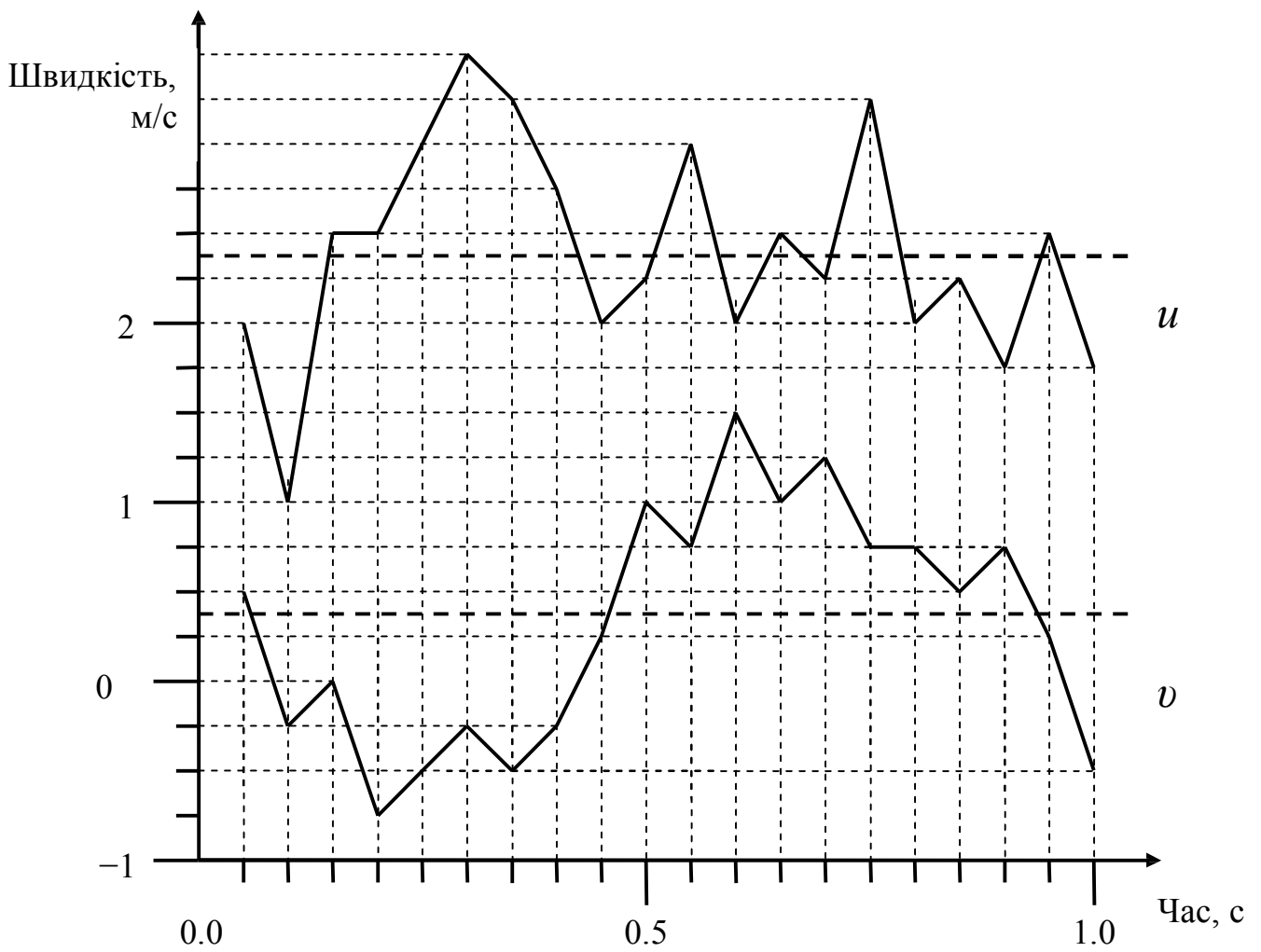


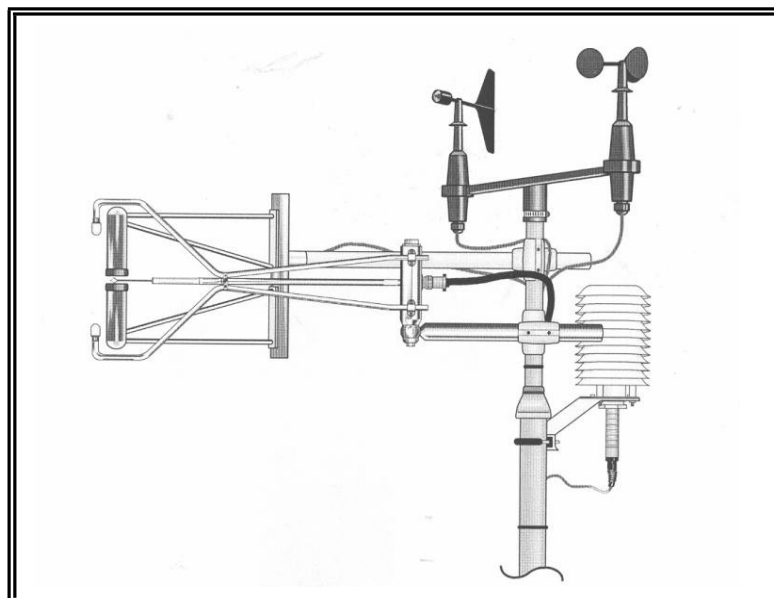
Рис. 1. Графік залежності флуктуацій горизонтальної  $u$  та вертикальної компоненти  $v$  вітру від часу

Результати наших обчислень ( $r_{xy} = \text{cov}xy / \sigma_x \sigma_y = 0,35$ ) відповідають помірній кореляції між горизонтальною  $u$  та вертикальною  $v$  компонентами швидкості вітру.



1.Результати обчислення коефіцієнтів коваріації та кореляції між горизонтальною  $y=u$  та вертикальною  $x=v$  компонентами швидкості вітру

$N$	$x$	$y$	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	2	0,5	-0,4	0,19	-0,076
2	1	-0,25	-1,4	-2,6	3,64
3	2,5	0	0,1	-3,1	-0,31
4	2,5	-0,75	0,1	-3,85	-0,385
5	3	-0,5	0,6	-3,6	2,16
6	3,5	-0,25	1,1	-3,35	3,685
7	3,25	-0,5	0,85	-3,6	-3,06
8	2,75	-0,25	0,35	-3,35	-1,17
9	2	0,25	-0,4	-2,85	1,14
10	2,25	1	-0,15	-2,1	0,315
11	3	0,75	0,6	-2,35	-1,41
12	2	1,5	-0,4	-1,6	0,64
13	2,5	1	0,1	-2,1	-0,21
14	2,25	1,25	-0,15	-1,85	0,28
15	3,25	0,75	0,85	-2,35	-2,0
16	2	0,75	-0,4	-2,35	0,94
17	2,25	0,5	-0,15	0,19	0,029
18	1,75	0,75	0,65	-2,35	-1,53
19	2,5	0,25	0,1	-2,85	-0,0285
20	1,75	-0,5	-0,65	-3,6	2,34
$M$	2,4	0,31			$\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y}) = 2,6494$
$\sigma^2$	$\sigma_x^2 = 0,35$	$\sigma_y^2 = 0,41$			$\text{cov } xy = \frac{1}{N} \sum(x - \bar{x})(y - \bar{y}) = 2,6494/20 = 0,1324$
$\Sigma$	$\sigma_x = 0,59$	$\sigma_y = 0,64$	$\sigma_x \sigma_y = 0,3776$		$r_{xy} = \text{cov } xy / \sigma_x \sigma_y = 0,1324 / 0,3776 = 0,35$



### Контрольні завдання

Визначити коефіцієнти коваріації та кореляції для даних варіантів.

#### Варіант 1

$N$	$x$	$y$
1	2	0,5
2	1	-0,5
3	2,5	0
4	2,5	-0,5
5	3	-0,5
6	3,5	-0,5
7	3,5	-0,5
8	2,5	-0,5
9	2	0,5
10	2,5	1

#### Варіант 4

$N$	$x$	$y$
1	2	2,5
2	1	5
3	2,5	10
4	2,5	-5
5	3	-0,5
6	3,5	-0,25
7	3,25	-0,5
8	2,75	-0,25
9	2	0,25
10	2,25	5

#### Варіант 2

$N$	$x$	$y$
1	3	0,75
2	2	1,5
3	2,5	1
4	2,25	1,25
5	3,25	0,75
6	2	0,75
7	2,25	0,5
8	1,75	0,75
9	2,5	0,25
10	1,75	-0,5

#### Варіант 5

$N$	$x$	$y$
1	2	-2
2	1	-1,25
3	2,5	0
4	2,5	-2,75
5	3	-3,5
6	3,5	-3,25
7	3,25	-3,5
8	2,75	-0,25
9	2	0,25
10	2,25	1

#### Варіант 3

$N$	$x$	$y$
1	6	-0,5
2	7	-0,2
3	2	-10
4	1,5	-7,5
5	3	-2,5
6	3,20	-0,5
7	3,5	-5
8	2,7	-0,5
9	2	0,5
10	2,5	10

#### Варіант 6

$N$	$x$	$y$
1	3	2,75
2	2	-1,5
3	2,5	-1
4	2,25	0,25
5	3,25	0,75
6	2	2,75
7	2,25	5,5
8	1,75	-0,75
9	2,5	-0,25
10	1,75	-0,5

## 21. ГЛОБАЛЬНІ ЗМІНИ КЛІМАТУ ТА ГЛОБАЛЬНЕ ПОТЕПЛІННЯ

### 21.1. Клімат та причини його зміни

*Клімат* – це усереднений стан погоди, який містить у собі такі показники як середня температура атмосфери Землі та Світового океану, кількість опадів, інтенсивність та періодичність сонячного випромінювання та інші змінні, які можна вимірювати та передбачати завдяки багаторічним метеорологічним спостереженням. Зміна клімату – це коливання клімату Землі в цілому або окремих її регіонів з часом. Цей процес супроводжується зміною глобальної температури та опадів завдяки природній мінливості або людській активності.

До основних причин, що спричиняють зміну клімату, можна віднести геометрію та орбітальну варіабельність нашої сонячної системи, сонячні спалахи та шторми, сонячний вітер, ексцентриситет орбіти земної кулі, а також концентрації парникових газів.

Як довів видатний вчений сучасності О. Л. Чижевський (1897-1964), для органічного світу Землі суттєвими є як сонячна енергія, так і періодичні зміни сонячної активності. Циклічні зміни сонячної активності відомі як сонячні цикли. Розрізняють сонячні цикли з періодичністю 11, 22, 87, 210 та 2300 років. Сонце, а також плями та протуберанці, що виникають на його поверхні, являють собою джерела електромагнітного випромінювання, які впливають на магнітне поле Землі та на рівень іонізації земної атмосфери. Потоки заряджених частинок, що надходять від Сонця, спричиняють магнітні бурі на Землі. Крім того, Сонце, як це доведено дослідженнями вченого, посилює назрівання та поширення деяких захворювань на Землі (холери, грипу, дифтерії, чуми, менінгіту, черевного тифу, малярії тощо). Виявлено, що життєві функції патогенних мікроорганізмів безпосередньо пов'язані з полями фізичної природи, які генеруються Сонцем.

Зміни параметрів земної орбіти також викликають відповідні зміни інтенсивності сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні. До цих параметрів слід віднести ексцентриситет (числову характеристику коначного перерізу, що показує ступінь його відхилення від кола), аксіальний нахил (кут відхилення осі обертання планети від її орбітальної площини), прецесію (зміну напрямку осі об'єкта, що обертається).

### 21.2. Система спостереження за глобальним кліматом

Всесвітня метеорологічна організація (World Meteorological Organization, WMO) та міжурядовий орган у рамках ООН з питань охорони навколишнього середовища (United Nations Environment Programme, UNEP) створили у 1988 році Міжурядову групу експертів зі зміни клімату (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), основним завданням якої було отримання та оцінювання достовірної наукової, технічної та соціо-економічної інформації, пов'язаної зі зміною клімату [44].

*Глобальна система спостереження за кліматом (ГССК)* є міжнародною організацією, яка використовує дані, отримані завдяки супутникам та *in situ* спостереженням за кліматом. ГССК забезпечує моніторинг кліматичної системи, детектування можливих змін клімату, вивчення впливу мінливості та зміни клімату, підтримку наукових досліджень, спрямованих на покращення розуміння, моделювання та прогнозування клімату.

ГССК аналізує інформацію, яка постачається багатьма станціями спостереження (у 2011 році кількість їх становила 1040) (рис. 21.1).

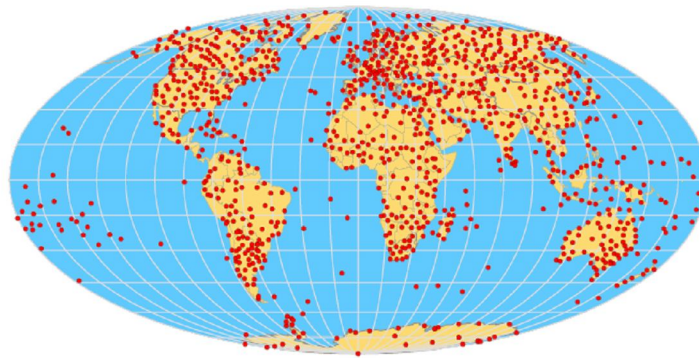


Рис. 21.1. Мережа станцій спостереження за кліматом [45]

Комплекс приладів, призначених для збирання, аналізу та поширення метеорологічних даних та розміщених на земній поверхні, у повітрі, морі та у навколоремному космічному просторі, складає *Глобальну систему спостережень (ГСС)*. Ця система включає близько 11000 наземних станцій спостереження, які надають інформацію кожні три години; 1300 станцій спостереження за повітрям та радіозондів, що вимірюють атмосферний тиск, швидкість вітру, температуру та вологість на висотах до 30 км; близько 4000 кораблів та 1300 буїв, призначених для спостережень за морською поверхнею (температура поверхні, висота та період морських хвиль); понад 3000 літаків; супутники, що знаходяться на полярних (вимірювання температури та вологості в областях, вільних від хмар) та геостаціонарних орбітах (визначення швидкості вітру).

Крім того, ГСС забезпечує спостереження за сонячним випромінюванням, блискавками, приливами та відливами, радіолокацію нижніх шарів атмосфери.

*Супутники* поділяються на ті, що займають геостаціонарні орбіти (циркулярні, над екватором) і проводять спостереження за одним регіоном земної поверхні (GOES-8, GOES-10, GMS-5, Metsat-6, та Metsat-7), та на ті,

що займають низькі орбіти та сканують земну поверхню (TRMM, NOAA-15, -16, -17, DMSP F13, F14, F15).

Супутники здійснюють спостереження за хмарним покривом над землею, міським освітленням та світловим шумом, пожежами, пиловими та піщаними бурями, сніговими та льодовими покривами, характером океанських течій, виверженнями вулканів, розвитком рослинності, забрудненнями регіонів.

### **21.3. Глобальне потепління**

На межі XIX-XX століть шведський вчений С. Ареніус передбачив можливість нагромадження в атмосфері вуглекислого газу, що може призвести до підвищення температури нижніх шарів атмосфери. Сучасний досвід свідчить, що в результаті господарської діяльності людини в атмосфері збільшується вміст вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), закису азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ), метану ( $\text{CH}_4$ ), галогенопохідних вуглеводнів та тропосферного озону ( $\text{O}_3$ ). Наприклад, якщо атмосферні запаси  $\text{CO}_2$  ще у 1860р. становили 610 Гт (1 Гт =  $10^9$  тон), то при швидкості зростання  $\text{CO}_2$  в атмосфері 3 Гт/рік в кінці XXI ст. його вміст в атмосфері подвоїться порівняно із серединою XIX ст.

Двоокис вуглецю потрапляє в атмосферу завдяки виверженням вулканів, розкладанню органічної речовини, ферментативним та респіраційним процесам, в яких беруть участь аеробні організми; згорянню викопного палива, роботі енергетичних та транспортних систем, виробництву цементу, активності фотосинтезуючих організмів.

Метан потрапляє в атмосферу внаслідок діяльності мікроорганізмів у болотистих ґрунтах або в системах травлення травоядних тварин, а також при спалюванні палива, сміття, при добуванні вугілля.

Закис азоту надходить за рахунок діяльності мікроорганізмів у ґрунті та воді, внаслідок виробництва та застосування азотних добрив у сільському господарстві.

Основною причиною глобального потепління є збільшення антропогенних викидів парникових газів. Для припинення глобального потепління слід зменшити емісію парникових газів антропогенного походження. Для цього треба визначити, як поведуть себе ці гази у приземному шарі атмосфери та наскільки треба зменшити емісію цих газів.

### **21.4. Механізми глобального потепління**

Сонячне випромінювання є короткохвильовим, тоді як випромінювання земної кулі – довгохвильовим. Сонячне випромінювання проникає крізь атмосферу та нагріває земну поверхню. Якщо Земля буде постійно отримувати енергію сонячного випромінювання, вона нагріватиметься все більше і більше. Для утримання теплового балансу необхідно віддавати енергію у вигляді інфрачервоного випромінювання, яке пропорційне четвертому степені температури. Температура, за якою сонячне випромінювання дорівнює вихідному інфрачервоному випромінюванню, називається *рівноважною випромінювальною температурою*; вона дорівнює 255 К або



$-18^{\circ}\text{C}$ . Температура приземного шару перевищує рівноважну випромінювальну температуру, оскільки атмосфера містить гази (водяну пару, двоокис вуглецю, озон, оксид вуглецю, метан та оксиди азоту), що поглинають інфрачервоне випромінювання. Коли ці гази поглинають інфрачервоне випромінювання земної поверхні, вони самі випромінюють інфрачервоне випромінювання, що відповідає їхній власній температурі і спрямовано догори та донизу (рис. 21.2).

Випромінювання, що спрямоване донизу, нагріває земну поверхню. У цьому полягає так званий *парниковий ефект*.

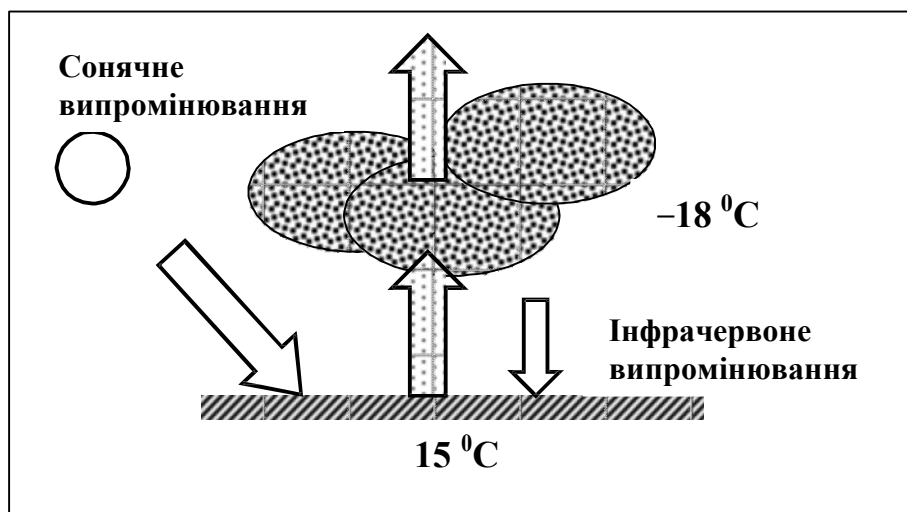


Рис. 21.2. Інфрачервоне випромінювання, що спрямовується донизу парниковими газами.

Специфічною рисою парникових газів є те, що вони поглинають оптичне випромінювання в інфрачервоній області спектра. Теплове довгохвильове випромінювання Землі поглинається атмосферними газами, такими як двоокис вуглецю  $\text{CO}_2$  (9-26%), водяна пара  $\text{H}_2\text{O}$  (36-70%), метан  $\text{CH}_4$  (4-9%), озон  $\text{O}_3$  (3-7%), що викликає нагрівання приповерхневого шару атмосфери, оскільки ці гази відіграють роль віконного скла у парнику.

Молекули парникових газів характеризуються *дипольним моментом*, який визначається просторовим зміщенням електричних зарядів та обумовлює можливість поглинання оптичного випромінювання цими молекулами.

*Електричним диполем* називається система, що складається з двох однакових за абсолютною величиною різнойменних точкових зарядів  $(+q, -q)$ , які знаходяться на деякій відстані один від одного. *Плечем диполя* є вектор  $\vec{l}$ , спрямований уздовж осі диполя від негативного заряду до позитивного, і за модулем рівний відстані між ними. Основною характеристикою електричного диполя є його *дипольний момент* – вектор  $\vec{p}$ ,

який чисельно дорівнює добутку заряду диполя на плече:  $\vec{p} = q\vec{l}$ .

*Електричним диполем* називається система, що складається з двох однакових за абсолютною величиною різнойменних точкових зарядів  $(+q, -q)$ , які знаходяться на деякій відстані один від одного. *Плечем диполя* є вектор  $l$ , спрямований уздовж осі диполя від негативного заряду до позитивного, і за модулем рівний відстані між ними. Основною характеристикою електричного диполя є його *дипольний момент* – вектор  $\vec{p}$ , який чисельно дорівнює добутку заряду диполя на плече:  $\vec{p} = q\vec{l}$ .

Асиметричні молекули, такі як  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ , мають електричний дипольний момент та здатні поглинати оптичне випромінювання.

Симетричні молекули, такі як азот та кисень, внаслідок своєї симетричної структури позбавлені електричного дипольного моменту та не беруть участі у процесі поглинання.

Тоді як молекули, лінійні за своєю структурою ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) беруть участь у *валентних* коливаннях (при яких змінюються довжини зв'язків) та *деформаційних* коливаннях (що полягають у зміні кута між двома зв'язками) (рис. 21.3). Очевидно, що завдяки таким коливанням у цих молекулах відбувається просторове зміщення різнойменних електричних зарядів та індукується електричний дипольний момент.

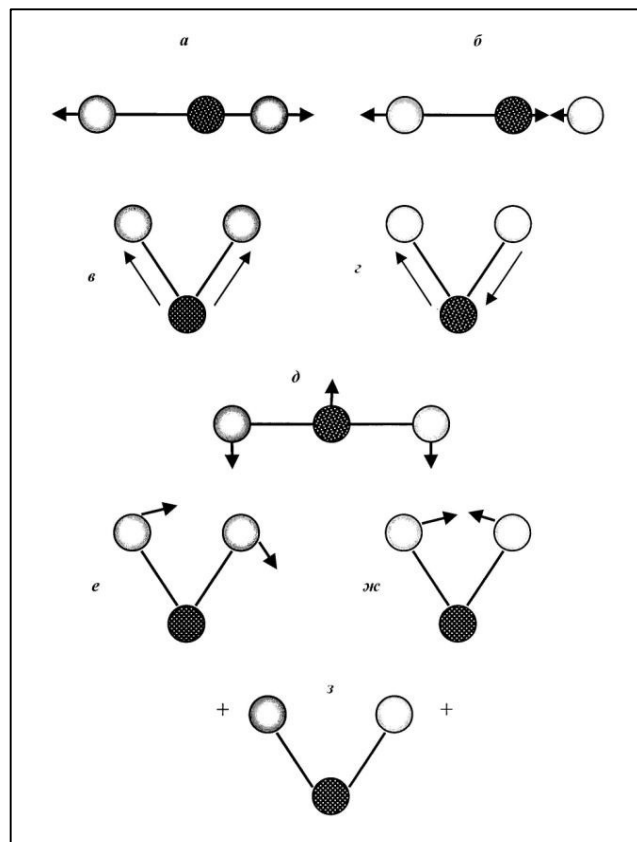


Рис. 21.3. Основні типи валентних та деформаційних коливань: *а* – симетричне валентне; *б* – антисиметричне валентне; *в* – симетричне валентне; *г* – антисиметричне валентне; *д* – деформаційне; *е* – деформаційне крутильне; *ж* – деформаційне різальне; *з* – деформаційне коливання

Отже, молекули типових атмосферних газів характеризуються такими значеннями електричного дипольного моменту (у дебаях): азот ( 0 ), кисень ( 0 ), двоокис вуглецю ( 0 ), метан ( 0 ), озон ( 0,53 ), оксид вуглецю ( 0,112 ), оксиди азоту ( 0,17 ), водяна пара ( 1,85 ).

Теплове довгохвильове випромінювання Землі поглинається атмосферними газами ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ), що викликає нагрівання приповерхневого шару атмосфери.

Крім того, слід врахувати теплофізичні властивості приземного шару атмосфери. Дійсно, земна поверхня, яка випромінює довгохвильове випромінювання, характеризується відносно високим коефіцієнтом теплопровідності ( $k = 0,209 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ); те ж саме можна сказати про водяну пару в атмосфері ( $k = 0,599 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ). Але повітряний шар між землею та водяною паровою атмосфери має незначний коефіцієнт теплопровідності ( $k = 0,0257 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ). Ось чому водяна пара та вищезгадані атмосферні гази відіграють роль віконного скла у парнику, через що це явище назвали *парниковим ефектом* (рис. 21.4).

Внаслідок цього ефекту порушується тепловий баланс; цілком ймовірним є підвищення глобальної температури поверхні Землі за рахунок зміни концентрації парникових газів, що може призвести до зміни клімату.

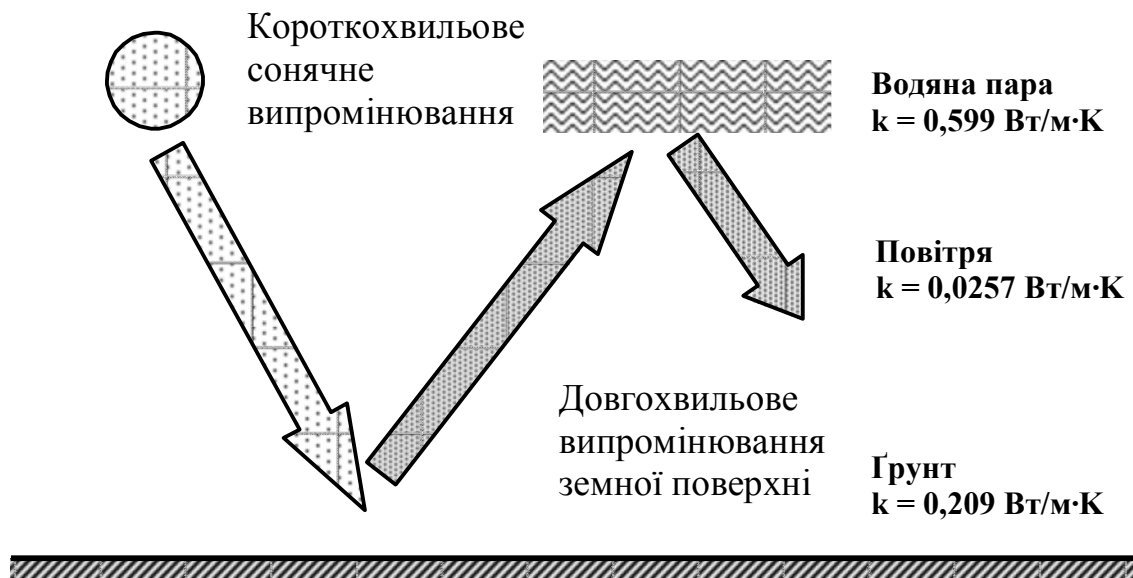


Рис. 21.4. Пояснення парникового ефекту з термодинамічних поглядів

### 21.5. Двоокис вуглецю

Одним з основних парникових газів є двоокис вуглецю  $\text{CO}_2$ . Для оцінювання антропогенного бюджету  $\text{CO}_2$  зазвичай використовують опорний рівень вуглекислого газу у доіндустріальний період (1750 рік), коли антропогенні чинники були відсутні та концентрація  $\text{CO}_2$  в атмосфері визначалася лише природним карбоновим циклом. На даний період часу обговорення антропогенного бюджету  $\text{CO}_2$  проводять завдяки 10-річним усередненням концентрацій газу (наприклад, упродовж 1980-1990 років).

Згідно з даними щодо щорічного бюджету глобального  $\text{CO}_2$ , представленим IPCC [46], емісійний потік  $\text{CO}_2$  упродовж 2000-2005 рр. характеризувався такими значеннями: збільшення концентрації в атмосфері  $4,1 \pm 0,01$  Пг/рік; споживання викопного палива  $7,2 \pm 0,3$  Пг/рік; обмін між атмосферою та океаном  $-2,2 \pm 0,5$  Пг/рік; обмін між атмосферою та земною поверхнею  $-0,9 \pm 0,6$  Пг/рік (тут концентрації газу представлені у петаграмах:  $1 \text{ Пг} = 10^{15} \text{ г}$ ; позитивні значення концентрацій відповідають збільшенню  $\text{CO}_2$  в атмосфері; негативні – зменшенню).

Отже, можна стверджувати, що концентрація вуглекислого газу в атмосфері збільшується, в першу чергу, завдяки антропогенним викидам; у XXI ст. результати прогнозування передбачають збільшення концентрації вуглекислого газу в атмосфері вдвічі [47].

Можливі сценарії емісії двоокису вуглецю впродовж 2000-2100 років [48] наведено на рис. 21.5.

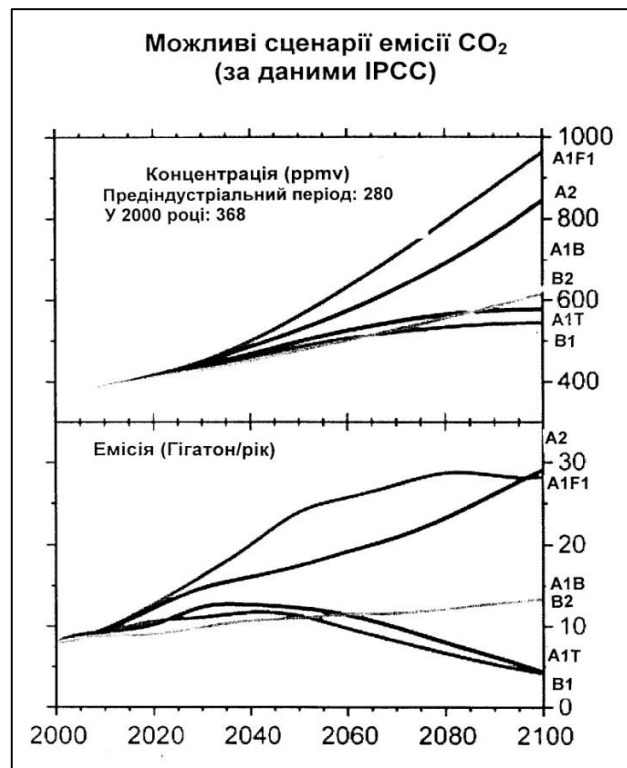


Рис. 21.5. Можливі сценарії емісії  $\text{CO}_2$  упродовж 2000-2100 рр. [48]

## 21.6. Збільшення температури

В цілому парникові гази забезпечують комфортну для мешканців земної кулі температуру  $+15^{\circ}\text{C}$ . Але внаслідок людської активності кількість парникових газів збільшується, що призводить до порушення теплового балансу; цілком ймовірним є підвищення глобальної температури поверхні Землі за рахунок зміни концентрації парникових газів, що може призвести до зміни клімату.

За даними Міжурядової комісії щодо зміни клімату (The Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC), збільшення глобальної температури земної поверхні становило  $0,74^{\circ}\text{C} \pm 0,18^{\circ}\text{C}$  протягом 1906-2005 рр. [49].

У четвертій доповіді Міжурядової групи експертів зі зміни клімату [47] розглянуто чотири можливі соціальні сценарії (рис. 21.6): B1 – сценарій сталого розвитку суспільства, який передбачає узгодження збереження навколишнього середовища із всесвітнім економічним розвитком; B2 – сценарій «регіонального співіснування суспільства», який передбачає незначне економічне зростання та відповідні рішення проблем навколишнього середовища, що досягаються у кожній локальній місцевості; A1 – сценарій, який ділиться на A1F1 (залежить від викопного палива), A1T (акцентує увагу на невикопних типах палива) та A1B (спрямований на встановлення балансу між джерелами енергії).

Серед запропонованих шести сценаріїв A2 та A1F1 передбачають високі рівні емісії  $\text{CO}_2$ , тобто допускається, що наприкінці XXI ст. концентрація вуглекислого газу в атмосфері буде втричі більшою, ніж у XX ст. За сценарієм B1 емісія  $\text{CO}_2$  досягне максимального значення у 2040 р., після чого спадатиме до 60 % від сучасного рівня наприкінці XXI сторіччя.

Відповідно відрізняються прогнози зміни температури: очікується зростання температури впродовж 100 років на  $2^{\circ}\text{C}$  за сценарієм B1;  $3^{\circ}\text{C}$  – за сценарієм A1B;  $4^{\circ}\text{C}$  – за сценарієм A2.

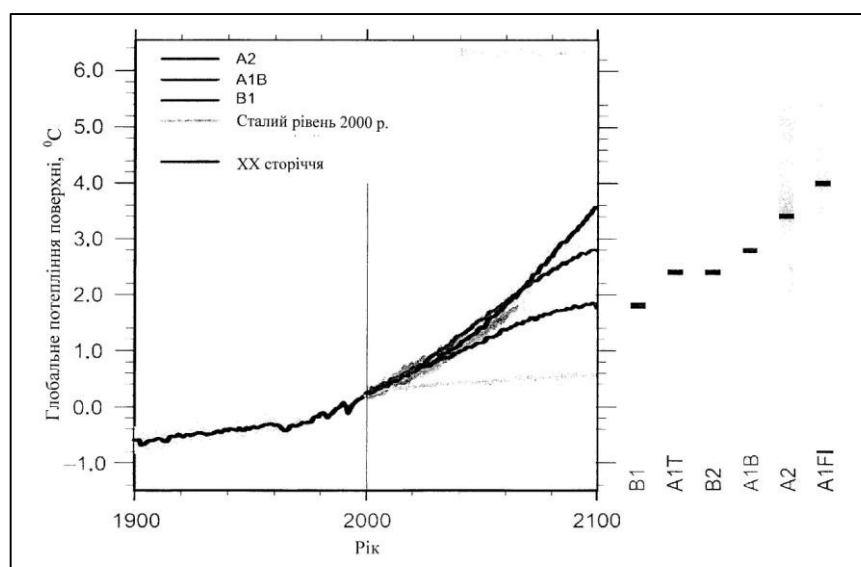


Рис. 21.6. Чотири можливі соціальні сценарії, пов'язані з глобальним потеплінням клімату у XXI ст. [47]

## 21.7. Зменшення льодового покриття

Підвищення температури може викликати танення полярного льоду. Морський лід утворюється, коли океанська вода замерзає. Цей процес відбувається для солоної морської води при температурі  $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Танення льодовиків викликає зменшення розмірів арктичного регіону.

За оцінюванням Міжурядової групи експертів зі зміни клімату, гірські льодовики та сніговий покрив скоротилися у середньому в обох півкулях (рис. 21.7).

Прогнозування змін клімату в арктичному регіоні передбачає відсутність льоду в Льодовитому океані у літній період між 2060 та 2080 роками, хоча інші оцінки вказують на 2030 рік. Крім того, цілком можливе вивільнення метану із зон вічної мерзоти внаслідок потепління.

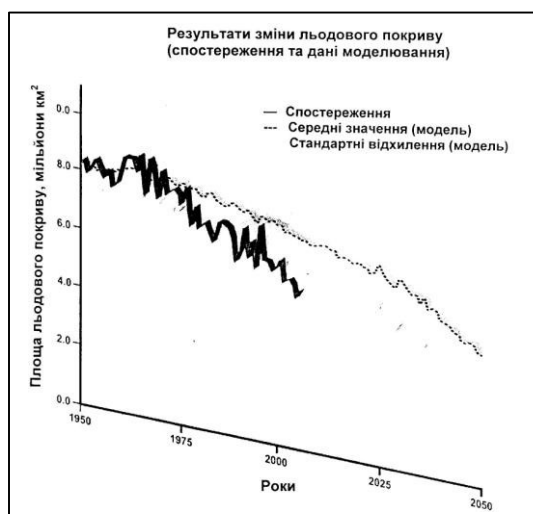


Рис. 21.7. Порівняння результатів спостереження та модельних розрахунків за зміною льодового покриття впродовж 1950-2050 рр.[50]

Цікавим є факт рекордного (площею близько мільйону квадратних кілометрів) зменшення арктичного льодового покриття у 2007 році (рис. 21.8) [51].

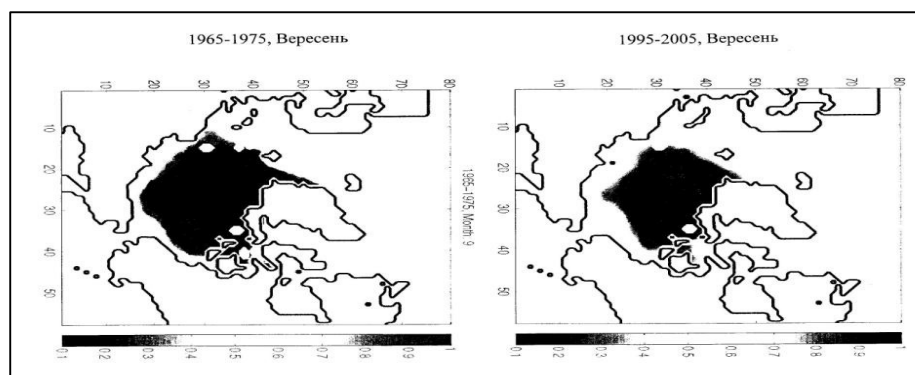


Рис. 21.8. Рекордне зменшення арктичного льодового покриття у 2007 році [51]

У вересні 2007 року площа льодового покриву була на 39 % меншою порівняно з довготривалим рівнем, усередненим за період 1979-2000 рр.

Вчені припускають, що саме парниковий ефект, що викликав збільшення температури та зміну водяної циркуляції, відповідає за ці аномальні зменшення льодового покриву Арктики. За спостереженнями НАСА [52], рівень хмарності у 2007 році був на 16 % менший, ніж у 2006 році. Внаслідок цього температура збільшилася на 2,4 °С – цього виявилось достатньо, щоб розтопити 0,3 м льодового покриву.

Одним із факторів, що впливають на потепління Арктики, є різні рівні альbedo морської води та льоду: зменшення площі льодового покриву, який має більше відбивання сонячного випромінювання, призводить до нагрівання води замість льоду.

Спостереження за допомогою супутників довели, що втрати льодової маси збільшуються: за період 2002-2009 рр. кількість втрат збільшилася з – 137 Гт/рік до –286 Гт/рік з середньою швидкістю –30 гігатон щорічно.

Упродовж 2005-2008 рр. багаторічний лід зменшився за площею на 42 % та за об'ємом – на 40 %; втрати льоду склали близько 6300 км<sup>2</sup>.

Все це сприятиме затопленню територій, збільшенню тривалості сезонного відтавання ґрунтів, погіршенню лісних масивів, що розташовані у зоні вічної мерзлоти.

За прогнозами Міжурядової групи експертів зі зміни клімату, льодовий покрив у літній період стане мінімальним вже наприкінці ХХІ сторіччя. Аномальне зменшення льодового покриву в Арктиці у 2007 році є яскравим доказом необхідності розробки достовірних та надійних моделей прогнозування клімату.

### **21.8. Підймання рівня моря**

Втрати від наземних льодовикових щитів Гренландії та Антарктиди досить ймовірно (> 90%) сприяли підвищенню рівня моря у 1993-2003 рр.

Збільшення глобальної температури призводить до теплового розширення об'єму океану та неминучого підймання рівня Світового океану з середньою щорічною швидкістю 18 см (1961-2003 рр.) та 31 см (1993-2003 рр.) (рис. 21.9).

Наслідком цього може стати затоплення територій, на яких живуть сотні мільйонів людей, збільшення тривалості сезонного відтавання ґрунтів, ерозія узбережжя, повені, інгібування процесів утворення первинної продукції, зміна якості поверхневих та ґрунтових вод.



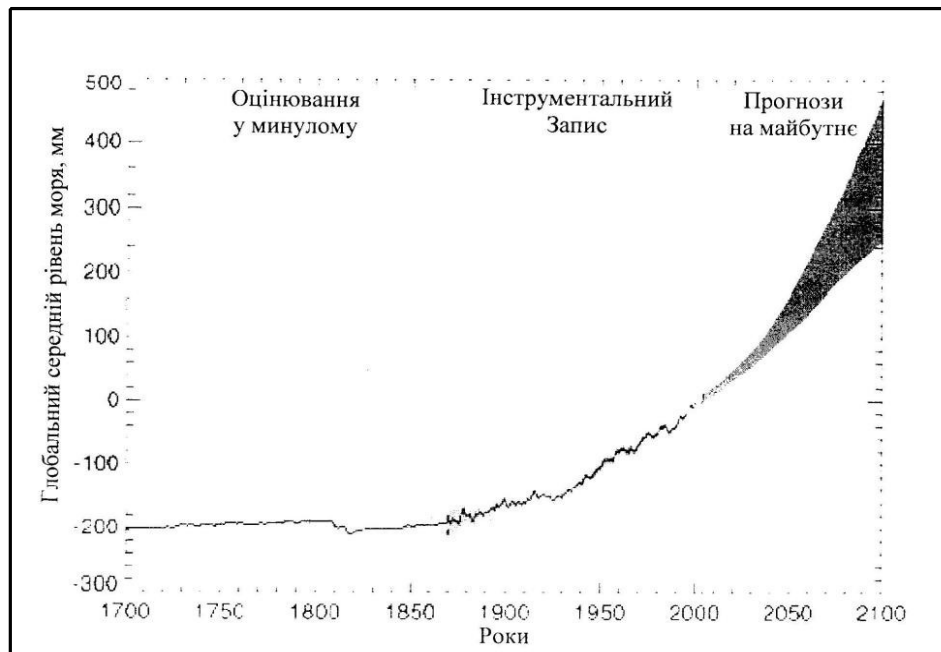


Рис. 21.9. Підймання рівня моря завдяки тепловому розширенню морської води [47]

Розглянемо чотири можливі соціальні сценарії (згідно четвертої доповіді Міжурядової групи експертів зі зміни клімату, 2007 р.) з точки зору зростання температури та підймання рівня моря:

- Сценарій B1

Підвищення температури на  $1,8^{\circ}\text{C}$  з ймовірним діапазоном від  $1,1$  до  $2,9^{\circ}\text{C}$  та підвищення рівня моря з ймовірним діапазоном від 18 до 38 см.

- Сценарій A1T

Підвищення температури на  $2,4^{\circ}\text{C}$  з ймовірним діапазоном від  $1,4$  до  $3,8^{\circ}\text{C}$  та підвищення рівня моря з ймовірним діапазоном від 20 до 45 см.

- Сценарій B2

Підвищення температури на  $2,4^{\circ}\text{C}$  з ймовірним діапазоном від  $1,4$  до  $3,8^{\circ}\text{C}$  та підвищення рівня моря з ймовірним діапазоном від 20 до 43 см.

- Сценарій A1B

Підвищення температури на  $2,8^{\circ}\text{C}$  з ймовірним діапазоном від  $1,7$  до  $4,4^{\circ}\text{C}$  та підвищення рівня моря з ймовірним діапазоном від 21 до 48 см.

- Сценарій A2

Підвищення температури на  $3,4^{\circ}\text{C}$  з ймовірним діапазоном від  $2,0$  до  $5,4^{\circ}\text{C}$  та підвищення рівня моря з ймовірним діапазоном від 23 до 51 см.

- Сценарій A1FI

Підвищення температури на  $4,0^{\circ}\text{C}$  з ймовірним діапазоном від  $2,4$  до  $6,4^{\circ}\text{C}$  та підвищення рівня моря з ймовірним діапазоном від 26 до 59 см.

Очевидно, що сценарій B1 є оптимістичним, тоді як A1FI – песимістичним.



Отже, можна прийти до висновків, що за більшістю сценаріїв підймання рівня Світового океану наприкінці ХХІ ст. не перевищує 50 см. Основним фактором, що відповідає за підймання рівня моря, є теплове розширення морської води внаслідок нагрівання. Танення льодовиків, яке є істотним на даний час, буде незначним фактором наприкінці ХХІ ст.

### **21.9. Україна та глобальне потепління**

Україна теж приречена до впливу глобальних змін клімату. Лише в ХХ ст. на території України зафіксовано 43 посушливих роки; тривалість зимових періодів скоротилася, а самі зими стали холоднішими; частішали прояви підтоплень (особливо на півдні України), повеней (на Закарпатті), значних обледенінь (у центральних та південних регіонах). Що стосується Чорного моря, то підвищення його рівня викликатиме деградацію дельт річок, що впадають в нього – Дунаю, Дніпра, Дністра.

Глобальне потепління є причиною таких стихійних лих як сильні повені, урагани, цунамі та посухи. Так, проливні дощі та урагани у Центральній та Східній Європі, які почалися 22 липня 2008 р., призвели до різкого підвищення рівня води у річках Дністер та Прут та руйнівної повені в Україні, Молдові, Румунії, Словаччині та Угорщині. У західних районах України внаслідок повені потерпіли жителі Львівської, Закарпатської, Івано-Франківської, Тернопільської, Чернівецької та Вінницької областей. 25 тис. із них були змушені залишити свої рідні місця. Загалом вода затопила близько 523 українських населених пунктів та понад 24 тис. гектарів оброблених земель. Під водою залишилися 9 тис. житлових будинків. В Україні зруйновано 360 автомобільних та 560 пішохідних мостів. Загиблими та зниклими безвісти вважають 38 осіб, серед них 8 дітей.

Як повідомляє Центр Новин ООН, за даними Організації, у західних областях України збитки від стихійного лиха оцінюються у \$ 650–870 млн.

Глобальне потепління викликає зміни у погоді, зокрема збільшення опадів, що у свою чергу призведе до підтоплення земель.

Лише за останні 20 років кількість міст та селищ України із сталими проявами підтоплення зросла удвічі – з 265 до 541, а загальна площа підтоплених територій у цих населених пунктах збільшилася з 88,6 тис. га до 196,2 тис. га.

Надзвичайно гостро постає проблема підтоплення земель на півдні України, яке останніми роками, особливо взимку 1998 р., спричинило найбільш негативні наслідки. У зоні стихійного лиха опинилися Херсонська, Миколаївська, Запорізька, Дніпропетровська, Донецька, Луганська, Одеська області та АР Крим.

У червні 1992 р. на конференції ООН з навколишнього середовища (Ріо-де-Жанейро, Бразилія) 155 країн, в тому числі Україна, підписали Рамкову конвенцію ООН про зміни клімату, а в 1992 р. вона набула чинності.

У грудні 1997 р. в Кіото (Японія) було підписано Кіотський Протокол – міжнародну угоду, яка координує міжнародні зусилля, спрямовані на

обмеження викидів у атмосферу газів, що спричиняють глобальне потепління.

На даний момент Кіотський протокол ратифікували понад 160 країн, зокрема й Україна (у лютому 2004 року). Згідно з протоколом, з 2008 по 2012 рік країни мають скоротити сукупний середній рівень викидів шести типів газів (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, гідрофторвуглеводнів, перфторвуглеводнів, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub>) на 5,2% порівняно з рівнем 1990 року.

Згідно з цим документом, Україна може щорічно викидати в атмосферу до 925 млн тонн парникових газів. Проте такий об'єм промислових викидів здійснювався востаннє лише у 1990 році – після розвалу СРСР він скоротився більш ніж удвічі.

Завдяки цьому Україна тепер може реалізувати невживану частину квоти. За прогнозом Мінекономіки, у 2008-2015 рр. вона перевищить 2,2 млрд т.

Але, хоча Україна активно включилася до розв'язання кліматичних проблем та викиди парникових газів в атмосферу в Україні істотно зменшилися, слід відзначити, що причиною зменшення викидів є різке падіння промислового виробництва в Україні, обмеженість енергетичних ресурсів, застаріле технологічне обладнання та деформована промислова інфраструктура.

Діяльність уряду, за оцінкою громадських експертів, є однобічною, оскільки сконцентрована навколо двох пріоритетів: проекти спільного впровадження (спостерігається скоріше перешкоджання імплементації механізму за рахунок постійної зміни умов, правил та процедур розробки, підтримки та затвердження проектів спільного впровадження) та торгівля квотами (активне сприяння імплементації, проте без прозорості у питаннях, що стосуються використання на практиці коштів для забезпечення даного механізму)[53].

7 грудня 2009 року розпочались міжнародні переговори ООН зі зміни клімату у Копенгагені, Данія [54]. Мета переговорів – прийняття нової угоди, що прийде на зміну Кіотському протоколу у 2013 році.

Але переговорний процес затягнувся через небажання держав брати на себе зобов'язання та знижувати викиди парникових газів. Українська позиція залишається найбільш неконструктивною, що також гальмує переговори. У той час, коли ряд країн оголошують наміри скорочення викидів парникових газів, офіційна позиція України передбачає зростання викидів на 70% від рівня 2008 до 2020 р. [55].

Що ж вимагають від Уряду екологічні організації? «Україна входить до двадцятки найбільших країн-забруднювачів атмосфери у світі. А відтак наша держава також повинна брати на себе зобов'язання та принаймні зупинити ріст викидів парникових газів» – говорить Христина Рудницька, координатор програми зі зміни клімату в Національному екологічному центрі України [56].

### **21.10. Запобігання впливу кліматичних змін**

Отже, для запобігання впливу кліматичних змін потрібна розробка та впровадження національної стратегії щодо виконання Україною зобов'язань відповідно до Рамкової конвенції ООН, Кіотського протоколу та Копенгагенської резолюції.

#### **Контрольні запитання та завдання**

1. Дати визначення клімату.
2. Назвати основні причини, що спричиняють зміни клімату.
3. Пояснити вплив сонячної активності на клімат планети.
4. Які параметри земної орбіти викликають зміни інтенсивності сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні?
5. Назвати функції та завдання глобальної системи спостереження за кліматом.
6. З чого складається глобальна система спостережень?
7. Які гази спричиняють глобальне потепління?
8. Пояснити механізми глобального потепління.
9. Що таке рівноважна випромінювальна температура? Чому вона дорівнює?
10. Пояснити механізми виникнення парникового ефекту.
11. Що таке дипольний момент, електричний диполь?
12. Яка роль електричного диполя у парниковому ефекті?
13. Які тенденції спостерігаються у зміні концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері?
14. Пояснити причини підвищення глобальної температури поверхні Землі.
15. Охарактеризувати можливі соціальні сценарії, пов'язані з глобальним потеплінням клімату.
16. Надати прогнози щодо зміни льодового покриву та підймання рівня моря.
17. Які наслідки глобального потепління спостерігаються в Україні?
18. Охарактеризувати відношення України до Рамкової конвенції ООН, Кіотського протоколу та Копенгагенської резолюції.

#### *СЕМІНАР*

##### **Зміна клімату та глобальне потепління**

Причини зміни клімату. Збільшення глобальної температури. Танення полярного льоду. Збільшення рівня Світового океану. Озоновий шар та зміна клімату. Зміна концентрації парникових газів. Україна та глобальна зміна клімату. Підтоплення південних регіонів України. Україна та Кіотський протокол. Зміна клімату та міграція населення. Що треба робити?

## НАУКОВА РОБОТА

Студент забор'язаний самостійно знайти тему наукової роботи, присвячену проблемам контролю та охорони навколишнього середовища. Пропонуємо зразок можливої теми наукової роботи.

*Провести вимірювання ширини некротичної кромки листків каштана залежно від відстані до автостради (наприклад, на деревах, розташованих: поблизу автостради; на відстані 25 м та 50 м від автостради). Вимірювання проводити не менше, ніж три рази.*

*Визначити середнє значення кромки, довірчі границі випадкових, систематичних та сумарних похибок, відносну похибку вимірювань та побудувати графік залежності середньої ширини некротичної кромки листка каштана від відстані до автостради. На графіку позначити повні похибки вимірювань. Пояснити причини залежності, що спостерігається.*

### Структура наукової роботи

Титульна сторінка містить: назву роботи (вона має бути короткою та ємкою), Ваші прізвище та ім'я, навчальний заклад, номер мобільного телефону або електронну адресу (для зв'язку);

Вступ – короткий перелік тих досягнень у галузі, яка відповідає Вашим дослідженням; обов'язково зробити посилання на авторів та літературні джерела;

Мета наукової роботи – коротко, але чітко сформулювати основні завдання ваших досліджень;

Матеріали та методи – настільки детально описати технологію вимірювань, прилади та об'єкти досліджень, щоб інший дослідник, не знайомий з вами, був здатний повторити ваші дослідження; бажано додати кольорові електронні чи звичайні фотографії основних етапів досліджень;

Результати вимірювань – кожне вимірювання у даному режимі повторити не менше ніж 3 рази для обчислення похибок вимірювань. Результати повинні бути представлені у вигляді графіків, діаграм, таблиць, але обов'язково з середніми значеннями та похибками вимірювань;

Обговорення результатів та висновки – надати аналіз того нового, що ви одержали у процесі вимірювань; порівняти ваші результати з тими, які були отримані раніше (див. «Вступ»);

Перелік посилань – надати список літературних джерел за стандартом (див. «Приклади оформлення бібліографічного опису у списку джерел»).

Якщо вам у процесі роботи хтось допомагав, слід подякувати цій людині.

### Чого не можна робити!

1. Не можна брати («скачувати») будь-який матеріал з Інтернету та видавати його за свій. Такий недобросовісний підхід розцінюється як плагіат – практика претендування або припущання свого авторства на твір або частину твору, написаного чи виданого будь-яким іншим автором.

2. Не можна представляти роботу, виконану у рамках іншої дисципліни (біології, мікробіології, ботаніки) як наукову роботу з дисципліни «Моніторинг довкілля з основами метрології».

3. Не бажано кільком студентам повторювати одну тему.

4. Категорично забороняється використовувати як наукову роботу матеріали лекцій або публікації вашого лектора.

5. Не дозволяється формування «науково-дослідних колективів» – кожна наукова робота повинна мати лише одного автора.

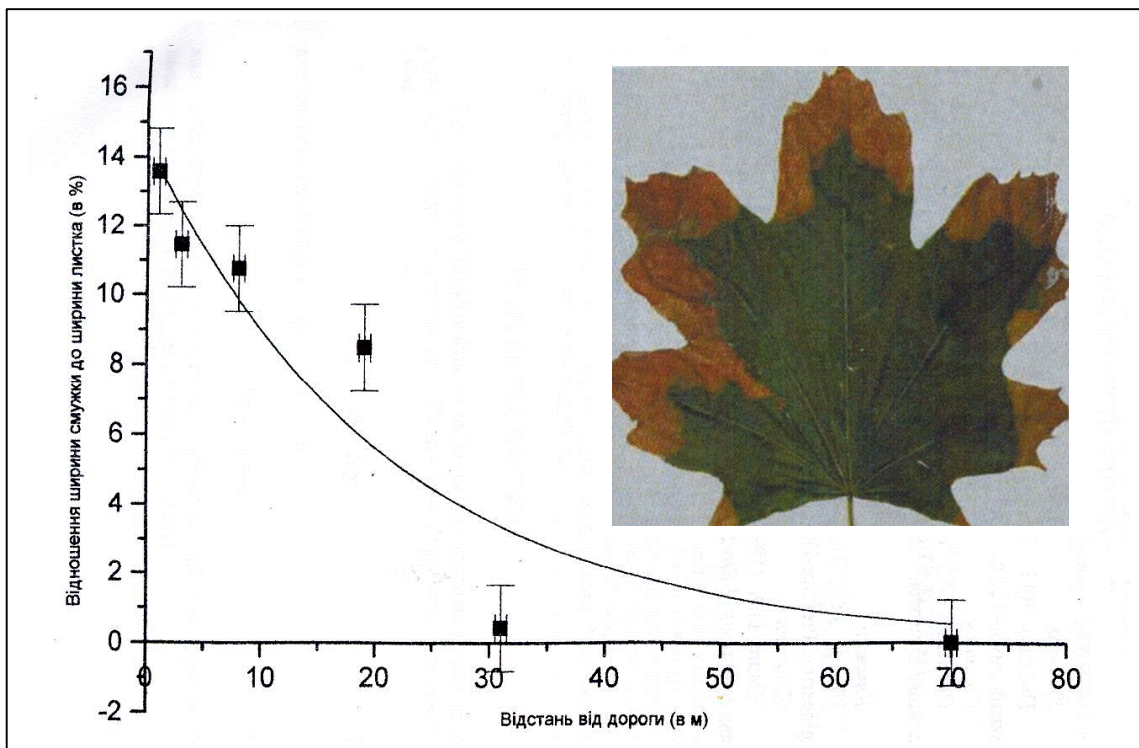
### Приклади оформлення бібліографічного опису у списку джерел

Характеристика джерела	Приклад оформлення
Книги: Один автор	Коренівський Д. Г. Дестабілізуючий ефект параметричного білого шуму в неперервних та дискретних динамічних системах / Коренівський Д. Г. — К.: Ін-т математики, 2006. — 111 с. — (Математика та її застосування) (Праці / Ін-т математики НАН України ; т. 59).
Два автори	Матяш І. Б. Діяльність Надзвичайної дипломатичної місії УНР в Угорщині: історія, спогади, арх. док. / І. Матяш, Ю. Мушка. — К.: Києво-Могилян. акад., 2005. — 397, [1] с. — (Бібліотека наукового щорічника «Україна дипломатична»; вип. 1).
Три автори	Акофф Р. Л. Идеализированное проектирование: как предотвратить завтрашний кризис сегодня. Создание будущей организации / Акофф Р. Л., Магидсон Д., Эддисон Г. Д. ; пер. с англ. Ф. П. Тарасенко. — Днепропетровск: Баланс Бизнес Букс, 2007. — XLIII, 265 с.
Чотири автори	Методика нормування ресурсів для виробництва продукції рослинництва/[Вітвіцький В. В., Кисляченко М. Ф., Лобастов І. В., Нечипорук А. А.]. — К. : НДІ «Украгропромпродуктивність», 2006. — 106 с. — (Бібліотека спеціаліста АПК. Економічні нормативи).
П'ять і більше авторів	Психология менеджмента/[ Власов П. К., Липницкий А. В., Лушихина И. М. и др. ] ; под ред. Г. С. Никифорова. — [3-е изд.]. — Х. : Гуманитар. центр, 2007. — 510 с.
Матеріали конференцій, з'їздів	Економіка, менеджмент, освіта в системі реформування агропромислового комплексу: матеріали Всеукр. конф. молодих учених-аграрників [«Молодь України і аграрна реформа»], (Харків, 11—13 жовт. 2000 р.)/М-во аграр. політики, Харк. держ. аграр. ун-т ім. В. В. Докучаєва. — Х.: Харк. держ. аграр. ун-т ім. В. В. Докучаєва, 2000. — 167 с.

Більш детальну інформацію щодо бібліографічних записів наведено на сайті [http://www.ukrbook.net/prykl\\_bib\\_zap.pdf](http://www.ukrbook.net/prykl_bib_zap.pdf)

#### Приклад оформлення графіків

Середні значення вимірювань наносити на графік як точки, а похибки вимірювань – у вигляді вертикальних розносок.



Заохочуються презентація карт місцевості, де проводили дослідження.







Отже, ваша наукова робота – ваше перше наукове дослідження, яке оформлюється у вигляді мікростатті.

Per aspera ad astra! Через терні – до зірок!



## III. БІОТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ

### 22. БІОІНДИКАЦІЯ ТА БІОТЕСТУВАННЯ

#### 22.1. Визначення біотичного моніторингу

*Біотичний моніторинг* – це контроль поточного стану біологічної складової (біоти) екосистем. Він передбачає реєстрацію відгуків біоти на антропогенні забруднення та впливи на рівнях, близьких до фонових, а також аналіз сукупності впливів життєдіяльності одних організмів на життєдіяльність інших та на неживе середовище мешкання. Основними методами біотичного моніторингу є *біоіндикація* та *біотестування*.

#### 22.2. Історія біотичного моніторингу

В історичному плані відомо, що канарки дуже чутливі до монооксиду вуглецю. Шахтарі давно помітили: якщо у шахтах з'являється газ, канарки припиняють співи, що свідчить про небезпеку. Діатомові водорості, вкриті кремнієвою оболонкою, широко застосовуються для оцінювання якості води з 1870 р. Біотичний моніторинг також був пов'язаний із застосуванням пестицидів у 1960 р., що призвело до погіршення якості шкаралупи яєць орлів та їх руйнування. Вчені звернулися до уряду з вимогою припинити застосування небезпечних агропрепаратів, після чого популяція орлів вернулася до норми. Відомо, що ваточник сирійський (*Asclepias Syriaca*) реагує на озон появою точок, пунктирів на листках або зміною кольору листків, або їх втратою.

#### 22.3. Біоіндикація

*Біоіндикація* – використання організмів або угруповань організмів, чий вміст певних елементів або сполук, а також морфологічна, гістологічна або клітинна структура, метаболічні та біохімічні процеси, поведінка та популяційна організація дають інформацію щодо *якості* навколишнього середовища або природи змін цього середовища.

*Біоіндикатори* – це біосистеми, фізіологічні функції яких так тісно корелюють з факторами навколишнього середовища, що можуть бути використані для оцінювання останніх. Багато організмів є чутливими до різних абіотичних та біотичних факторів середовища і можуть існувати лише в певних, часто дуже обмежених границях зміни цих факторів. Отже, спостереження за реакцією біоіндикаторів надаватиме інформацію щодо стану навколишнього середовища.

*Індикаційні ознаки* – це біологічні змінні, які характеризують стан окремих особин, групи організмів, популяцій та екосистем. Розглядаються та аналізуються ці ознаки на різних рівнях організації. Відгуки на нижчих рівнях організації характеризуються високою чутливістю та специфічністю, тоді як відгуки на вищих рівнях найкращі з екологічної точки зору.



Біологічні системи, які використовують як біоіндикатори, різноманітні: мікроорганізми, нижчі рослини, лишайники, гриби, багато вищих рослин, окремі види та суспільства тварин, клітинні та субклітинні компоненти організму можуть бути ефективними біоіндикаторами.

*Біомаркери* – це організми та їх характеристики, які дозволяють діагностувати *поточний* стан навколишнього середовища.

На відміну від біомаркерів, біоіндикатори не можуть миттєво реагувати на зміни екологічних умов, оскільки їх індикаторними властивостями є популяційні процеси та процеси угруповань в цілому.

### **22.3.1. Лишайники як біоіндикатори**

Як приклади чутливих біоіндикаторів атмосферного забруднення можна навести епіфітні лишайники (наприклад, *Hypogymnia physodes*), які чутливі до якості повітря. Багата флора лишайників свідчить про якісне повітря, тоді як відсутність лишайників указує на забруднення повітря  $SO_2$ .

Біоіндикаційні властивості лишайників базуються на основі аналізу рівня поселення та абсолютної поверхні лишайників на стовбурі дерева, видового складу, частоти, з якою зустрічаються лишайники.

### **22.3.2. Водорості як біоіндикатори**

Водорості – це гетерогенна група, яка охоплює кілька різних груп відносно простих за структурою живих організмів, які отримують необхідну для життєдіяльності енергію через фотосинтез. Вони мешкають переважно у водному середовищі чи вторинно пристосувались до мешкання у ґрунті та інших наземних місцезростаннях. У природі нараховується близько 35000 видів водоростей.

Водорості, що пливуть у товщі водної маси, називаються *фітопланктоном* (від грец. слів *φυτον* («phyton»), або «рослина» та *πλαγκτος* («planktos») – ширяючий). *Перифітон* складають водорості, які обростають підводні предмети або вищі рослини водойм.

Водорості мають дуже невеликий життєвий цикл та швидко розмножуються. На них безпосередньо впливають зовнішні фактори. Збирання зразків просте та недороге, не вимагає кваліфікованого персоналу.

Процес підвищення рівня первинної продукції водойм внаслідок збільшення у них концентрацій біогенних речовин (азоту, фосфору) називається *евтрофікацією*. Хоча хімічні фактори, що відповідають за евтрофікацію, можуть бути проаналізовані у лабораторії, вони у природних умовах характеризуються просторовими та часовими варіаціями.

Крім того, шкідливий вплив евтрофікації викликається не саме хімічними сполуками, а відгуком водних організмів (переважно водоростями) на ці сполуки.

Особливу увагу привертають *діатомові водорості* як біоіндикатори. Вони характеризуються великою кількістю та різноманітністю, чутливістю до хімічного складу середовища, мають вузький інтервал толерантності до рН, поживних речовин, солоності середовища.

Отже, біологічний моніторинг з використанням водоростей демонструє свою придатність.

### 22.3.3. Забруднення органічними речовинами

Здатність водних організмів мешкати у воді, що містить різну кількість органічних речовин, називається *сапробністю* (від грец. *sapros* – гнилий).

Характеристика ступеня забруднення водойми за видовим складом та масою гідробіонтів називається *сапробністю водойми*.

Можна виділити такі типи водойм (ці терміни походять від грецьких слів: *oligos* – небагатий; *mesos* – середній; *poly* – багатий):

*Полісапробні водойми*: найбільш забруднені; інтенсивне забруднення стічними водами та іншими органічними речовинами, масовий розвиток бактерій, висока швидкість споживання кисню, високий рівень продукції аміаку та сірководню.

Щодо живих організмів у полісапробних водоймах, то слід зазначити, що добре розвинені гетеротрофні організми, нитчасті бактерії (*Sphaerotilus*), сірчані бактерії (*Beggiatoa*, *Thiothris*), бактеріальні зооглеї (*Zoogloea ramigera*), найпростіші – інфузорії (*Paramecium putrinum*, *Vorticella putrina*), безбарвні джгутикові, олігохети *Tubifex tubifex*, водорість *Polytoma uvella*.

*α-мезосапробні водойми*: менш забруднені; інтенсивні окислювальні процеси, продукція сірководню відсутня, починається окиснення аміаку;

Серед живих організмів у *α-мезосапробних* водоймах зустрічаються у масі сидячі інфузорії (*Carchesium*), коловертки (*Brachionus*), багато забарвлених та безбарвних джгутикових.

*β-мезосапробні водойми*: слабко забруднені; низьке споживання кисню, мінералізація органічних речовин, значна кількість продуктів мінералізації, наприклад, нітратів.

Живі організми у *β-мезосапробних* водоймах предсталені діатомовими водоростями *Melosira varians*, *Diatoma*, *Navicula*; зеленими *Cosmarium*, *Botrytis*, *Spirogira crassa*, *Cladophora*; багатьма протококовими водоростями. Уперше зустрічається роголистник *Ceratophyllum demersum*. Багато корененіжок, сонцевиків, черв'яків, молюсків, личинок хирономід, з'являються моховатки. Зустрічаються ракоподібні та риби.

*Олігосапробні водойми*: найменш забруднені; процеси мінералізації закінчені, споживання кисню майже відсутнє.

Серед живих організмів в олігосапробних водоймах можна зустріти водорості *Melosira itallica*, *Draparnaldia glomerata* та *Draparnaldia plumosa*, коловертка *Notholka longispina*, рачки *Daphnia longispina* та *Bythotrephes longimanus*, личинки одноденок, веснянок, риби стерлядь, гольян, форель.

### 22.3.4. Індекси якості водойм

Кількісне оцінювання сапробності здійснюють за допомогою *індексу сапробності S*:

$$S = \frac{\sum sh}{\sum h} \quad (22.1)$$

де  $s$  – індикаторна значущість виду, що знаходиться з таблиці індикаторних організмів;  $h$  – відносна чисельність даного виду.

Згідно [58] індикаторна значущість  $s$  приймає такі значення: олігосапроби – 1;  $\beta$ -мезосапроби – 2;  $\alpha$ -мезосапроби – 3; полісапроби – 4.

Відносну чисельність  $h$  особин даного виду оцінюють так: випадкові знахідки – 1; зустрічуваність – 3; масовий розвиток – 5.

Отже, індекс сапробності може приймати такі значення:

*полісапробні водойми* – 4,0-3,5;

*$\alpha$ -мезосапробні водойми* – 3,5-2,5;

*$\beta$ -мезосапробні водойми* – 2,5-1,5;

*олігосапробні водойми* – 1,5-1,0.

Переведення індексу сапробності у бали якості води наведено у табл.

22.1

Таблиця 22.1. Переведення індексу сапробності у бали якості води

#### Індекс сапробності Клас якості Характеристика якості

водойми	води	води
> 4	6	Дуже брудна
3,51-4	5	Брудна
2,51-3,5	4	Забруднена
1,51-2,5	3	Помірно забруднена
1-1,5	2	Чиста
< 1	1	Дуже чиста

*Трофічний Індекс* характеризує наявність у водному середовищі фосфору.

*Індекс Надлишку Водоростей AAI* (Algal Abundance Index) визначається так:  $AAI = [(2Nn + Nz)/Ns] \cdot 100\%$ , де  $Nn$  – кількість поширених видів;  $Nz$  – кількість всіх видів;  $Ns$  – кількість сайтів – місць збирання зразків.

Значення трофічного індексу та індексу надлишку водоростей наведено у табл. 22.2.

#### *Індекс Солоності*

Кількість солей у прісній води незначна – менше 0,05%. Вода вважається солонуватою, якщо вона містить 3-5% солей. Природна солоність океану становить 3,5%. Мертве море, наприклад, характеризується 15%-ю солоністю.

Таблиця 22.2. Значення трофічного індексу та індексу надлишку водоростей

Трофічний статус	Загальний фосфор (мг/л)	Індекс надлишку водоростей (AAI)
Оліготрофний	<20	<20
Мезотрофний	>20, <99	>20, <49
Евтрофний	>100, <499	>50, <69
Гіпертрофний	>500	>70

Родовий Індекс Діатомових водоростей

$$GDI = \frac{\sum \text{чутливі}_\text{види}}{\sum \text{толерантні}_\text{види}}$$

У таблиці наведено типовий склад діатомових водоростей у водоймі та індекси якості, які вони демонструють. Слід відмітити чутливі та толерантні до забруднень види (табл. 22.3).

### 22.3. Родовий діатомовий індекс [58]

	Індекс солоності (прісноводний)	Трофічний індекс	Індекс сапробності
<b>Чутливі роди</b>	<i>Achnanthes</i>	<i>Achnanthes</i>	<i>Achnanthes</i>
	<i>Aulacoseira</i>	<i>Aulacoseira</i>	<i>Aulacoseira</i>
	<i>Cymbella</i>	<i>Cymbella</i>	<i>Cocconeis</i>
	<i>Eunotia</i>	<i>Eunotia</i>	<i>Cymbella</i>
	<i>Gomphonema</i>	<i>Neidium</i>	<i>Eunotia</i>
	<i>Neidium</i>	<i>Pinnularia</i>	<i>Neidium</i>
	<i>Pinnularia</i>	<i>Stauroneis</i>	<i>Pinnularia</i>
	<i>Stauroneis</i>		<i>Stauroneis</i>
			<i>Surirella</i>
<b>Толерантні роди</b>			
	<i>Amphora</i>	<i>Amphora</i>	<i>Amphora</i>
	<i>Mastogloia</i>	<i>Cocconeis</i>	<i>Cyclotella</i>
	<i>Nitzschia</i>	<i>Diatoma</i>	<i>Diatoma</i>
	<i>Surirella</i>	<i>Nitzschia</i>	<i>Mélosira</i>
			<i>Nitzschia</i>

В таблиці 22.4 наведено дані щодо кількісного оцінювання чутливих та толерантних видів, а також значення родового індексу діатомових водоростей, проаналізованих на різних ділянках річки.

Наприклад, на ділянці №1 відносна кількість чутливих водоростей становить 25,68 %, а толерантних – 28,72 %. Отже, величина родового індексу становить:  $25,68/28,72 = 0,89$ .

Таблиця 22.4. Кількісне оцінювання чутливих та толерантних видів, а також значення родового індексу діатомових водоростей [58]

Родовий діатомовий індекс	Номери ділянок					Опорна ділянка
	Назва	1	2	3	4	
<i>Achnanthes</i>	7,43 %	4,21 %	21,50 %	15,63 %	13,92 %	1,58 %
<i>Aulacoseira</i>						
<i>Cocconeis</i>	18,24 %	27,20 %	9,03 %	8,68 %	12,09 %	6,31 %
<i>Cymbella</i>						
<i>Eunotia</i>						
<i>Neidium</i>						
<i>Pinnulaha</i>						
<i>Stauroneis</i>						
<i>Surirella</i>	0,00 %	0,00 %	0,93 %	0,00 %	0,00 %	0,32 %
<b>Разом (чутливі до забруднень)</b>	<b>25,68 %</b>	<b>31,42 %</b>	<b>31,46 %</b>	<b>24,31 %</b>	<b>26,01 %</b>	<b>8,20 %</b>
<i>Amphora</i>	13,51 %	14,18 %	8,72 %	20,49 %	31,50 %	27,44 %
<i>Cyclotella</i>	10,14 %	2,68 %	4,36 %	10,42 %	5,13 %	1,26 %
<i>Diatoma</i>	0,34 %	0,00 %	0,93 %	0,35 %	0,00 %	0,32 %
<i>Melosira</i>						
<i>Nitzschia</i>	4,73 %	8,05 %	20,87 %	16,67 %	10,99 %	13,88 %
<b>Разом (толерантні до забруднень)</b>	<b>28,72 %</b>	<b>24,90 %</b>	<b>34,89 %</b>	<b>47,92 %</b>	<b>47,62 %</b>	<b>42,90 %</b>
<b>Родовий індекс</b>	<b>0,89</b>	<b>1,26</b>	<b>0,90</b>	<b>0,51</b>	<b>0,55</b>	<b>0,19</b>

### 22.3.5. Безхребетні як індикатори

До безхребетних відносять типи найпростіших, губок, кишкопорожнинних, голкошкірих, молюсків, кілька типів нижчих черв'яків (сколецид), кільчастих черв'яків, членистоногих та ряд інших, загалом до 1–2 млн видів тварин.

Переваги безхребетних як індикаторів: їх легко збирати та ідентифікувати; можна знайти та спостерігати неозброєним оком; збирання не потребує кваліфікованого персоналу та складного обладнання; безхребетні характеризуються толерантністю до різних типів забруднень; живуть більше року; мають обмежену рухливість; мають короткий термін розмноження; оскільки бентосні безхребетні накопичують токсичні речовини, хімічний аналіз можна здійснювати на дуже малих рівнях токсикантів, які не можна зареєструвати у воді.

Недоліки безхребетних як індикаторів: бентосні макробезхребетні не реагують на будь-який зовнішній вплив; сезонні варіації можуть заважати порівнянню зразків, що зібрані у різні сезони; дрейф у потоках може принести безхребетних туди, де вони нормально не існують; деякі групи дуже важко ідентифікувати на рівні видів.

### 22.3.6. Біоіндикатори чистої води

Одноденки (*Ephemeroptera*, від грец. *ephemeros* — «короткоживучий» та *pteron* — «крило») є дуже чутливими до забруднення, тобто якщо вони знайдені біля води, ця вода достатньо хороша для пиття без очищення або кип'ятіння.



Рис.22.1 . Одноденка  
*Ephemeroptera*

### 22.3.7. Біоіндикатори забрудненої води

До біоіндикаторів забрудненої води слід віднести: черв'яків та галиць (*Itonididae*), равликів (*Ampulariidae*) та гребляків (*Corixidae*).

Розглянемо як приклад індикаторів евтрофікації водойм комах-кровососів. За перші роки існування водойми видовий склад комах характеризується наявністю кровососів: гедзів (*Tabanidae*), мокреців (*Ceratopogonidae*), комарів (*Culicidae*).

Упродовж десяти років у замкнених водоймах накопичується велика кількість органічних забруднювачів. У мулі можна знайти личинки комарів з родини *Tipulidae*, у прибережній зоні — личинки гедзів, мокреців та комарів (*Culex*, *Aedes*, *Mansonia*).

Евтрофікація водойми вресі-решт призводить до зміни роду *Mansonia*, *Culiseta*, скорочується кількість видів гедзів; водночас фауна комах може бути представлена деякими видами з родини *Mucidae*, *Ceratopogonidae*, *Culicidae* (*Culex pipiens*, *Aedes caspius* Td. ін.).

### 22.3.8. Риби як біоіндикатори

Особливістю риб як біоіндикаторів є їх можливе пересування по водних потоках.

Переваги риб як біоіндикаторів: риби є індикаторами довготривалих ефектів; вони представляють велику різноманітність трофічних рівнів; їх легко збирати та ідентифікувати; вимоги до навколишнього середовища, історія життя та розподіл добре відомі для всіх видів; деякі види риб (лосось, форель) менш толерантні до забруднень, ніж інші; донні риби більш толерантні до забруднень, оскільки вони адаптовані до меншого споживання кисню; хижаки (наприклад, щука) чутливі до каламутності води; масова загибель риби свідчить про вичерпання кисню, наявність нафти, токсичних бактерій або планктону, хімічного забруднення.

Порушення руху, знаходження поблизу поверхні води, циркулярне або повільне плавання є ознакою водного забруднення або вичерпання кисню.

Недоліки риб як біоіндикаторів: рухливість та міграція призводить до помилок у визначенні місцезнаходження джерел забруднення; моніторинг лише одного виду обмежує інформацію, яку може надати аналіз угруповання; риби не так чутливі до забруднень, як безхребетні; моніторинг лише риб не забезпечує аналіз стану екосистеми в цілому.

### 22.3.9. Рослини як біоіндикатори

Відомо, що сільськогосподарські бур'яни проростають на ґрунтах певної якості. Так, *Teesdalia nudicaulis* можна зустріти лише на кислих ґрунтах, тоді як *Mercurialis annua* — на основних.

Діагностичними показниками стану хвойних дерев можуть бути обрані середня висота та діаметр дерев, річний приріст паростків, радіальний приріст деревини стовбура, віковий склад і вага хвої, стан генеративних органів, надземна біомаса середнього дерева, вміст забруднень у хвої тощо.

### 22.3.10. Переваги та недоліки методів біоіндикації

Методи біоіндикації підсумовують біологічно важливі дані щодо навколишнього середовища; спроможні реагувати на короткочасні та залпові викиди токсикантів; реагують на швидкість змін, які відбуваються у довкіллі; указують на місця накопичення забруднюючих речовин та шляхи їх міграції; дозволяють розробляти оцінки шкідливого впливу токсикантів на людину та живу природу на ранніх стадіях; дозволяють нормувати допустиме навантаження на екосистеми.

Втім, вони не дають інформацію про об'єктивні фізико-хімічні особливості стресового фактору, що діє; вони потребують, як правило, більшої повторності для отримання статистично значущих результатів [59].

## 22.4. Біотестування

*Біотестування* – це використання організмів або угруповань організмів, чий вміст певних елементів або сполук, а також морфологічна, гістологічна або клітинна структура, метаболічні й біохімічні процеси, поведінка та популяційна організація надають інформацію щодо *кількісної оцінки якості* навколишнього середовища або змін цього середовища [15,60].

*Тест-об'єкт* – організм або угруповання організмів, по ступеню впливу на які судять про якість (наприклад, токсичність) середовища.

*Тест-реакція* (або *тест-функція*) – фізіологічний або поведінковий відгук організму на зміну якості середовища.

### 22.4.1. Бактерії як тест-об'єкти

Як тест-об'єкти використовують бактерії *Baciillus cereus*, *Beneckea parvey*, *Vibrio fischeri*, *Vibrio harveyi*.

Тест-функції: інтенсивність розмноження, біолюмінесценція, активність окислювальних ферментів, проникність мембрани, механічна міцність.

Розглянемо принцип дії приладу на основі реєстрації біолюмінесценції. В основі приладу лежить реєстрація інтенсивності оптичного випромінювання, яке утворюють люмінесцентні бактерії. Бактерії, які попередньо підлягають ліофілізації (висушуванню у замороженому стані у вакуумі), приводять до нормального стану, після чого пропускають через зразок оптичне випромінювання. Інтенсивність цього випромінювання порівнюють з контрольним зразком, у якому бактерії відсутні. Комерційними зразками таких приладів слід вважати The Deltatox Analyzer та DeltaTox. У приладах цієї серії застосовують люмінесцентні бактерії *Vibrio fischeri* NRRL B-11177.

Ці прилади використовують для аналізу стічних вод, тестування очисних споруд, стоків, виявлення точкових джерел, раннього попередження забруднення систем водопостачання та поверхневих вод.

Перевагами методу біотестування на основі реєстрації біолюмінесценції є швидкодія та простота вимірювань, надійність результатів вимірювань, можливість аналізу високотоксичних середовищ.

### 22.4.2. Гриби як тест-об'єкти

Як тест-об'єкти використовують гриби та актиноміцети: *Aspergillus niger*; *Streptomyces olivaceus*.

Тест-функцією служить ростова реакція.

### 22.4.3. Водорості як тест-об'єкти

Як тест-об'єкти використовують *Scenedesmus quadricuada*, *Sc.acuminates*, *Chlorella vulgaris*, *Euglena gracilis*, *Dunaliella salina*, *D.viridis*.

Тест-функції: інтенсивність розмноження, рухлива активність, іммобілізація клітин, біоелектричні реакція, фотосинтетична активність клітин,



імпеданс суспензії, проникність мембрани, активний транспорт, параметри фото руху.

Автоматизовані системи біотестування водного середовища із застосуванням водоростей наведено на рис. 22.2 (на основі реєстрації фоторуху водоростей) та рис. 22.3 (на основі вивчення гравітаксису водоростей).

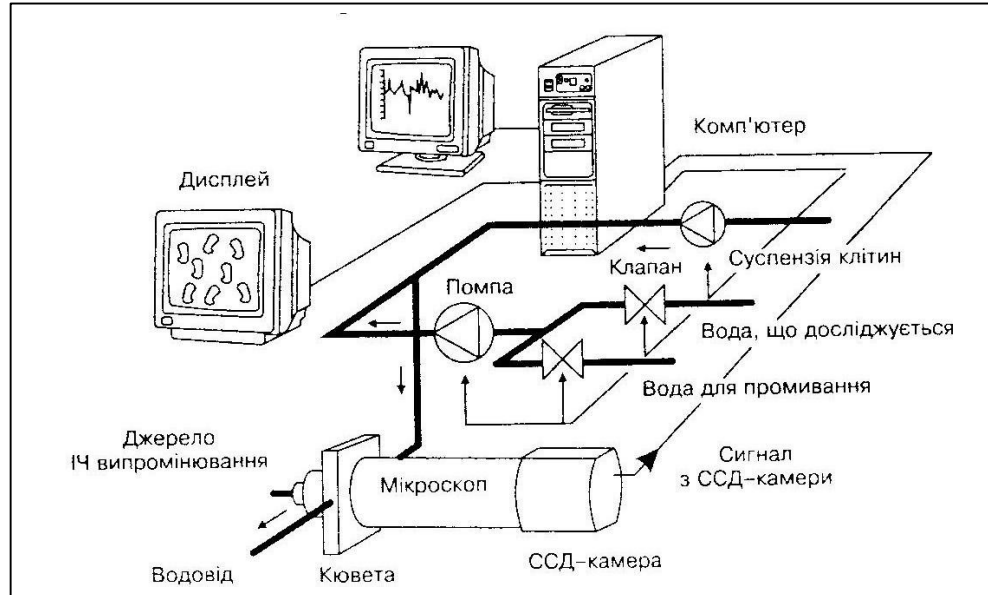


Рис. 22.2. Автоматизована система біотестування водного середовища на основі реєстрації фоторуху водоростей [15]

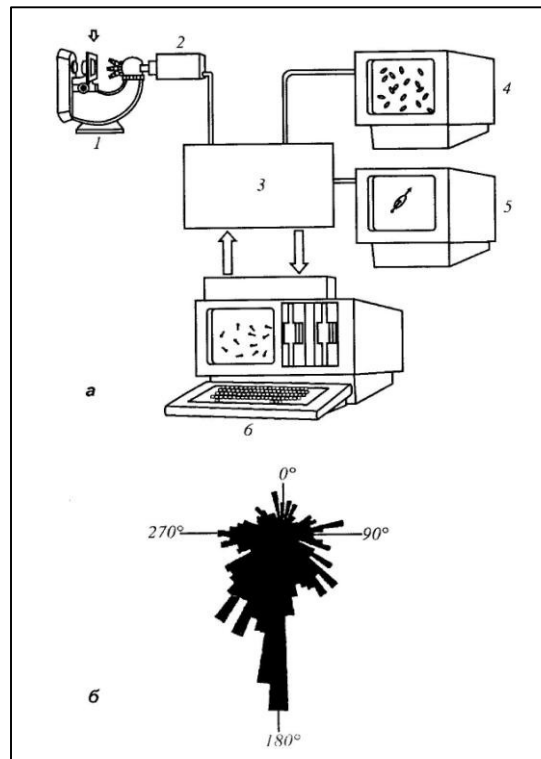


Рис. 22.3. Автоматизована система біотестування водного середовища на основі реєстрації гравітаксису водоростей [60]

#### 2.4.4. Безхребетні як тест-об'єкти

Як тест-об'єкти застосовують *Daphnia magna*; *Hydra attenuate*; *Hirudo medicinales*; *Unio tumidus*; *Eulimnogammarus verecosus*; *Myzuchopecten yessoensis*.

Тест-функції: виживаність, інтенсивність дихання та серцебиття, поведінкова реакція.

#### 2.4.5. Риби як тест-об'єкти

Як приклади тест-об'єктів можна навести *Perca fluviatilis*; *Phoxinus phoxinus*; *Cyprinus carpio*.

Тест-функції: поведінкова реакція, рухлива активність, інтенсивність дихання та серцебиття, зміна пігментації шкіри.

Основні методи біотестування з рибами як тест-об'єктами базуються на реєстрації таких тест-реакцій як поведінка, рухова активність, інтенсивність серцебиття та дихання, зміна рівня пігментації, порушення активності ферментів тощо. Розглянемо конкретні методи біотестування.

На рис. 22.4 представлено принципи дії біосигналізатора, в якому використовується поведінкова реакція риб. У відсутності токсикантів риби тримаються проти течії; мимовільному виходу риб з «житлової» зони заважає електричне поле, яке створюється електродами. Після підвищення токсичності води риби залишають цю зону, що фіксується фотоприймачами. Метод було застосовано для контролю вод, які містять активний хлор, аміак, мідь, залізо, спирти, альдегіди, нафтоли, поверхнево-активні речовини, аміно- та нітросполуки.

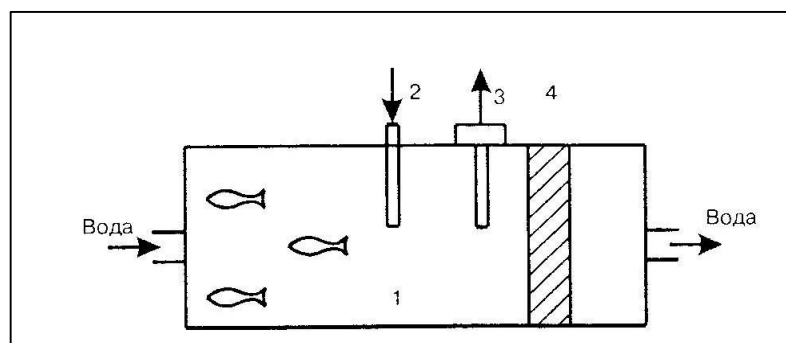


Рис. 22.4. Схема біосигналізатора, який використовується для біотестування стічних вод: 1 – акваріум; 2 – електроди; 3 – фотоприймач; 4 – система постачання чистої води[15,61]

Інший метод (рис. 22.5) передбачає реєстрацію електрокардіограми (ЕКГ) та електропневмограми (ЕПГ) риб, які розміщені у контейнері з проточною водою, обладнаному електродами. Визначення рівня токсичності води полягає у порівняльному аналізі середніх значень ЕКГ і ЕПГ для груп риб у розчинах з токсикантом та у контрольній воді.

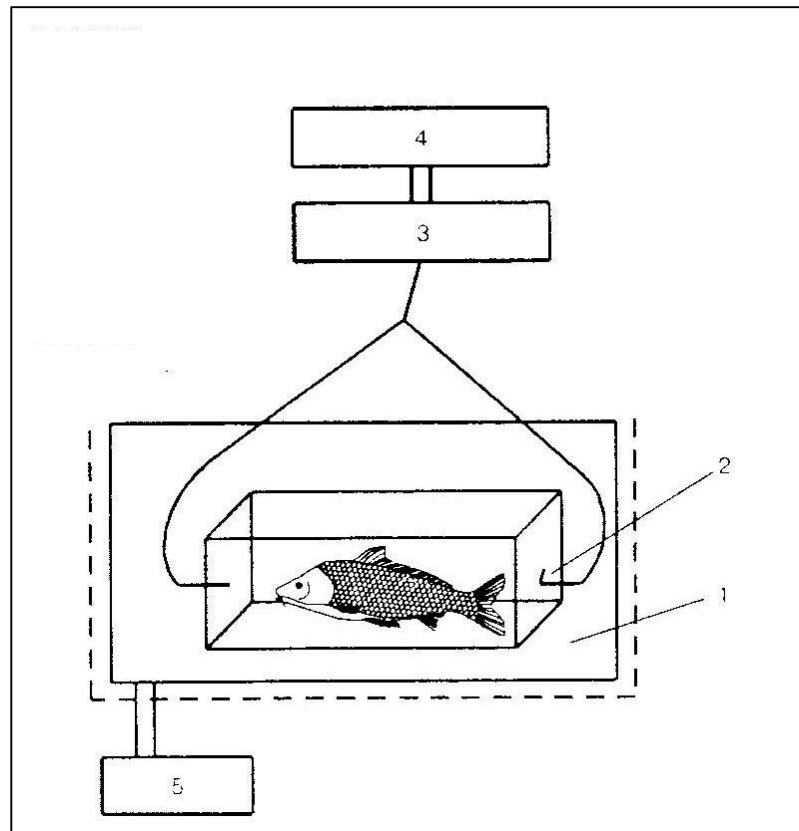


Рис. 22.5. Реєстрація електрокардіограми (ЕКГ) та електропневмограми (ЕПГ) риб [15,61]

Схему дистанційної системи біотестування з використанням риб наведено на рис. 22.6.

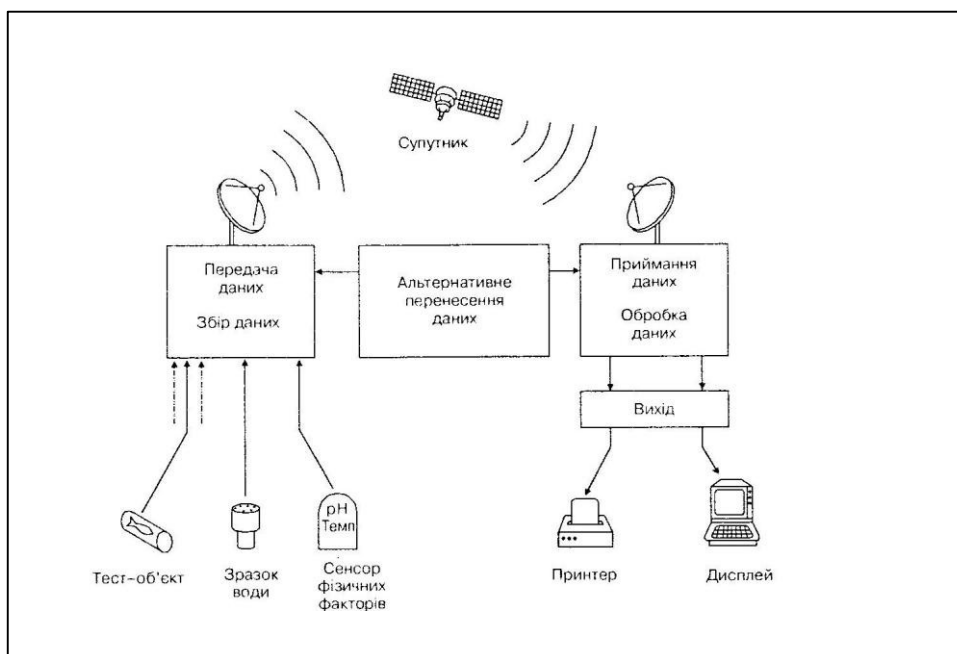


Рис. 22.6. Схема дистанційної системи біотестування з використанням риб [15]

#### 22.4.6. Переваги та недоліки методів біотестування

До переваг методів біотестування слід віднести високу чутливість, швидкодію, надійність, економність, можливість створення автоматизованих систем збору та обробки інформації.

До недоліків можна віднести відсутність кількісної оцінки всіх токсичних речовин, присутніх у середовищі, та можливої взаємодії окремих компонентів токсичних сполук, що знаходяться у суміші.

#### Контрольні завдання та запитання

1. Що таке біоіндикація?
2. Яка різниця між біомаркерами та біоіндикаторами?
3. Що називають біоіндикаційними ознаками?
4. Що таке сапробність водойм?
5. Написати формулу індекса сапробності та пояснити її.
6. Що таке родовий індекс діатомових водоростей?
7. Що таке біотестування?
8. Дати визначення тест-об'єкту та тест-функції.
9. До якого типу біотичних методів контролю навколишнього середовища – біоіндикації чи біотестування – можна віднести аналіз середньої висоти та діаметру хвойних дерев залежно від атмосферного забруднення?



## IV. МОНІТОРИНГ ОСНОВНИХ СКЛАДОВИХ БІОСФЕРИ

### 23. МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

#### 23.1. Атмосфера Землі

Атмосфера Землі – це оболонка, що оточує Землю; вона складається з газів та численних суспендованих рідких та твердих частинок. Близько 99% сухого повітря складається з азоту та кисню; решта припадає на інші гази та водяну пару.

Атмосфера Землі містить 78,08% азоту, 20,95% кисню, 0,93% аргону, слідові кількості інших газів, та водну пару (близько 1%) (табл.23.1).

#### 23.1. Склад чистого сухого повітря, присутнього у нижній атмосфері

Гази	Формула	Концентрація (% об'єму)	Роль у навколишньому середовищі
<i>Активні гази</i>			
Азот	N <sub>2</sub>	78,09	Інертний як N <sub>2</sub> ; суттєвий для життя як N
Кисень	O <sub>2</sub>	20,95	Суттєвий для життя; хімічно активний
Водень	H <sub>2</sub>	5·10 <sup>-5</sup>	Важливий у хімії атмосфери
<i>Інертні гази</i>			
Аргон	Ar	0,93	Інертний
Неон	Ne	1,8·10 <sup>-3</sup>	Інертний
Гелій	He	5,2·10 <sup>-4</sup>	Інертний
Криптон	Kr	1,0·10 <sup>-4</sup>	Інертний
Ксенон	Xe	8,0·10 <sup>-6</sup>	Інертний
Радон	Rn	6,0·10 <sup>-18</sup>	Радіоактивний
<i>Змінні гази</i>			
Двоокис вуглецю	CO <sub>2</sub>	3,6·10 <sup>-2</sup>	Суттєвий для життя; оптично активний
Озон	O <sub>3</sub>	1,0·10 <sup>-6</sup>	Токсичний; оптично та хімічно активний

#### 23.2. Джерела забруднень повітря

Згідно з даними, представленими у [62], в атмосфері є 189 небезпечних забруднюючих речовин. Забруднення атмосфери не знає державних або міжнародних кордонів, оскільки забруднюючі речовини вітром поширюються на значні відстані. Саме тому було розроблено низку законів,

програм та стандартів, спрямованих на зменшення перенесення небезпечних забруднюючих речовин повітря з одного місця у інше.

Природними джерелами атмосферних забруднень є пил, виверження вулканів, лісові пожежі, вітрова ерозія, життєдіяльність живих організмів, природна фонова радіоактивність. Причинами антропогенного забруднення є домашнє господарство (приготування їжі, прання, миття, чищення), комерційна активність (служб побутового сервісу, ресторанів, готелів, шкіл, друкарень), сільське господарство (гній, пестициди, добрива, нітрати, важкі метали, поверхнево-активні речовини), промисловість (високотемпературні виробничі процеси, горіння палива, діяльність паперових заводів, підприємств з обробки нафтопродуктів, металургійні процеси), транспортні засоби, військова та космічна техніка.

Загалом атмосферні забруднення впливають на клімат планети, на біогеохімічні цикли, на рослинні види та фітоценози, на тварин і, безсумнівно, на здоров'я людей [63,64].

### 23.3. Первинні забруднюючі речовини та критерії забруднення повітря

Усі забруднюючі речовини можуть бути поділені (згідно з ЕРА – Environmental Protection Agency) на *первинні*, якщо вони надходять безпосередньо в атмосферу, та *вторинні*, які утворюються у результаті реакцій з первинними забруднюючими речовинами та іншими складовими атмосфери. Первинні стандарти застосовують, коли йдеться про захист здоров'я людини, у першу чергу дітей, людей похилого віку, астматиків, тоді як вторинні стандарти стосуються людського комфорту, обмежень поганої видимості, шкоди для тварин, рослин та фасадів будівель.

Перелік найбільш токсичних неорганічних забруднюючих речовин атмосфери наведено у табл. 23.2.

23.2. Шість категорій первинних забруднюючих речовин повітря [62]

Забруднююча речовина	Вплив на здоров'я	Вплив на довкілля
Окис вуглецю CO	Подразнення, зменшення постачання кисню клітинам, органам, тканинам, порушення зору. Вплив на людей з серцевими захворюваннями.	
Діоксид азоту NO <sub>2</sub>	Подразнення дихальних органів. Вплив на людей з респіраторними захворюваннями	Кислотні дощі. Попередник формування озону. Поява бурої імлі над містом

Леткі органічні сполуки ЛОС	Токсичні та канцерогенні ефекти	Попередник формування озону.
Частинки PM <sub>10</sub> та PM <sub>2,5</sub>	Вплив на людей похилого віку та дітей, а також людей з респіраторними та серцевими захворюваннями. Шкідливий вплив на ніс, горло, легені, трахеї та бронхи. Можливий летальний вихід	Вплив на видимість
Діоксид сірки SO <sub>2</sub>	Респіраторні захворювання. Хрипіння, обмеженість скорочення дихання.	Кислотні дощі. Пошкодження та рослин. Неприємний запах
	Вплив на людей, хворих на астму	
Свинець Pb	Хронічна токсичність, порушення кровотворення, вплив на розвиток дітей	

Серед них шість категорій первинних забруднюючих речовин повітря відповідно до визначення ЕРА, такі що випро-мінюються безпосередньо в атмосферу зі стаціонарних та нестаціонарних джерел, а саме: монооксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), леткі органі-чні сполуки (ЛОС), частинки речовини (PM), діоксид сірки (SO<sub>2</sub>), свинець (Pb).

Озон (O<sub>3</sub>) не вважається первинною забруднюючою речовиною, але входить у перелік критеріїв забруднення. Озон є прикладом вторинних забруднюючих речовин, які формуються внаслідок фотохімічних реакцій у присутності CO, NO<sub>x</sub> та ЛОС.

До забруднюючих речовин атмосферного повітря можна віднести аміак NH<sub>3</sub>, хлор Cl<sub>2</sub>, двоокис вуглецю CO<sub>2</sub>, оксид азоту NO, пероксиди H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>NO<sub>2</sub>, HCHO, сірчані газу H<sub>2</sub>S, метилмеркаптан CH<sub>3</sub>SH, формальдегід HCHO, ізопрен CH<sub>2</sub>=C(CH<sub>3</sub>)CH=CH<sub>2</sub>, диметилсульфід ДМС (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S та ін.

### 23.4. Нормативи та стандарти якості атмосферного повітря

*Стандарт (норматив) якості* атмосферного повітря – критерій якості атмосферного повітря, який відображає гранично допустимий максимальний вміст забруднюючих речовин у атмосферному повітрі і при якому відсутній негативний вплив на здоров'я людини та стан навколишнього природного середовища.

ЕРА установило Національні стандарти якості оточуючого повітря для шістьох основних забруднюючих речовин, які назвали *критерії забруднення* (табл.24.3).

### 23.3. Національні стандарти якості оточуючого повітря для шести критеріїв забруднюючих речовин [62]

Забруднююча речовина	Середній час	Первинний стандарт	Вторинний стандарт
Окис вуглецю	8 г	9ppm (10 мг/м <sup>-3</sup> )	Немає
Діоксид азоту	1 г Щорічно	35ppm (40 мг/м <sup>-3</sup> ) 0,053 ppm (100 мкг/м <sup>-3</sup> )	Немає Такий, як первинний
Рівень приземного озону	8 г	0,08 ppm (155 мкг/м <sup>-3</sup> )	Такий, як первинний
	1 г	0,12 ppm (232 мкг/м <sup>-3</sup> )	Такий самий
PM <sub>10</sub>	Щорічно	50 мкг/м <sup>-3</sup>	Такий, як первинний
	24 г	150 мкг/м <sup>-3</sup>	Такий, як первинний
PM <sub>2,5</sub>	Щорічно	15 мкг/м <sup>-3</sup>	Такий, як первинний
	24 г	65 мкг/м <sup>-3</sup>	Такий, як первинний
Діоксид сірки	Щорічно	0,03 ppm (80 мкг/м <sup>-3</sup> )	Немає
	8 г	0,14ppm(365 мкг/м <sup>-3</sup> )	Немає
	3 г	Нет	0,5 ppm
Свинець	3 місяця	1,5 мкг/м-3	Такий, як первинний

*Гранично допустима концентрація (ГДК)* – показник безпечного рівня вмісту шкідливих речовин у навколишньому середовищі.

Відповідає максимальній кількості шкідливої речовини в одиниці об'єму або маси, яка при щоденному впливі протягом необмеженого часу не викликає будь-яких змін в організмі людини і несприятливих спадкових змін у потомства, а також не призводить до порушення нормального відтворення основних ланок екологічної системи природного об'єкта.



У вітчизняних документах розрізняють гранично допустиму концентрацію забруднюючої речовини у повітрі робочої зони  $ГДК_{рз}$ , гранично допустиму максимально разову концентрацію  $ГДК_{мр}$ , гранично допустиму середньодобову концентрацію  $ГДК_{сд}$ .

23.4. Гранично допустимі концентрації основних забруднюючих речовин в Україні та стандарти якості атмосферного повітря, прийняті WHO, ЕРА та ЕU

Забруднююча речовина	Час усереднення	МОЗ України, мг/м <sup>3</sup>	WHO, мг/м <sup>3</sup>	ЕРА, мг/м <sup>3</sup>	ЕU, мг/м <sup>3</sup>	
СО	15 хв	-	100	-	-	
	30 хв	5	60	-	-	
	1 год	-	30	40	-	
	8 год	-	10	10	10	
	24 год	3	-	-	-	
NO <sub>2</sub>	30 хв	0,085	-	-	-	
	1 год	-	0,2	-	0,2	
	8 год	5,0	-	-	Не повинна бути перевищена більш, ніж 18 разів за рік	
	24 год	0,04	-	-	0,125 Не повинна бути перевищена більш, ніж 3 рази за рік	
O <sub>3</sub>	Середня за рік	-	0,04	0,1	0,04	
	30 хв	0,16	-	-	-	
	1 год	-	-	0,232	-	
	8 год	-	0,12	0,157	-	
	24 год	0,03	-	-	-	
SO <sub>2</sub>	10 хв	-	0,5	-	-	
	30 хв	0,5	-	-	-	
	1 год	-	-	-	0,350	
	8 год	10,0	-	0,365	Не повинна бути перевищена більш, ніж 24 рази за рік	
	24 год	0,05	0,125	-	0,125 Не повинна бути перевищена більш, ніж 3 рази за рік	
PM <sub>10</sub>	Середня за рік	-	0,05	0,08	0,02	
	30 хв	-	-	-	-	
	24 год	-	-	0,15	0,05	
						Не повинна бути перевищена більш, ніж 3 рази за рік
	Середня за рік	-	0,05	0,05	0,02	

Між концентрацією  $C$  забруднюючої речовини та ГДК повинно виконуватися таке співвідношення:

$$C < \text{ГДК.}$$

( 23.1 )

Затверджені законодавчо ГДК у країнах СНД та стандарти якості повітря для короткочасних та тривалих впливів наведено у табл.23.4.

### **23.5. Якість повітря**

*Якість повітря* визначається як міра стану атмосферного повітря з точки зору задоволення вимог біотичних видів та потреб або намірів людини.

Для повсякденного оцінювання якості повітря застосовують *індекс якості повітря (Air Quality Index, AQI)*. Для кожного з основних забруднювачів повітря ЕРА (Environmental Protection Agency) установило національні стандарти якості повітря з метою захисту здоров'я людства (табл. 24.5). Величина  $AQI = 100$  відповідає безпечному рівню якості повітря. Рівень  $AQI < 100$  оцінює якість повітря як задовільну; а рівень  $AQI > 100$  відповідає небезпечній якості. Індекс якості повітря зіставляють із можливим впливом того чи іншого забруднення на здоров'я людини після вдихання забрудненого повітря впродовж кількох годин або днів.

### **23.6. Відбір проб повітря**

Зазвичай зразки повітря відбираються автоматично для їх подальшого аналізу на предмет наявності забруднюючих речовин. У деяких випадках можливо застосування спеціальних пластикових контейнерів, які передаються до лабораторії. Для аналізу газів, що надходять з ґрунту в атмосферу (таких як  $NO_2$ , наприклад) використовують камери, оскільки концентрація таких газів незначна.

Аналіз газів, що проходять через газопроводи чи труби (таких як  $SO_2$ ) здійснюється за допомогою спеціальних аспіраційних засобів, в основі яких лежить пропускання повітря через сорбент для накопичення забруднюючої речовини та її подальшого аналізу.

23.5. Індекси якості повітря для основних забруднювачів повітря [65]

Кількісна градація якості	Помірна		Небезпечна		Дуже небезпечна	Катастрофічна	
			для чутливих груп населення				
Індекс якості повітря	0-50	51-100	101-150	151-200	201-300	301- 100	401-500
Забруднюючі речовини	Діапазон концентрацій						
Окис вуглецю (ppm)	0-4,4	4,5-9,4	9,5-12,4	12,5-15,4	15,5-30,4	30,5-40,4	40,5-50,4
Діоксид азоту (ppm)	—	—	—	—	0,65-1,24	1,25-1,64	1,65-2,04
Озон ( 1 год в ppm)	—	—	0,125-0,164	0,165 – 0,204	0,205-0,404	0,405-0,504	0,505-0,604
Озон (8 год в ppm)	0-0,064	0,065-0,084	0,085-0,104	0,105-0,124	0,125-0,374	—	—
PM <sub>25</sub> (нгм <sup>-3</sup> )	0-15,4	15,5-40,4	40,5-65,4	65,5-150,4	150,5-250,4	250,5-350,4	350,5-500,4
PM <sub>10</sub> (нгм <sup>-3</sup> )	0-54	55-154	155-254	255-354	355-424	425-504	505-604
Діоксид сірки (ppm)	0-0,034	0,035-0,144	0,145-0,224	0,225-0,304	0,305-0,604	0,605-0,804	0,805-1,004

Практичне застосування індексу якості повітря передбачає шість кількісних градацій якості. Крім того, оцінювання якості повітря можна здійснювати за допомогою кольору [66]: добра – зелений; помірна – жовтий; небезпечна для чутливих груп населення – помаранчева; небезпечна – червоний; дуже небезпечна – фіолетовий; катастрофічна – коричневий.

Значення індексу якості повітря AQI = 100 відповідають таким концентраціям основних забруднювачів повітря:

- ∑ концентрації оксиду вуглецю CO  $9/10^6$  (усередненої за 8 годин);
- ∑ концентрації діоксиду азоту NO<sub>2</sub>  $0,525/10^6$  (усередненої за 8 годин);
- = концентрації озону  $0,075/10^6$  (усередненої за 8 годин);
- = концентрації частинок PM<sub>2,5</sub> розміром 2,5 мкм  $40 \text{ мкг/м}^3$  (усередненої за 24 години) або частинок PM<sub>10</sub> розміром до 10 мкм  $150 \text{ мкг/м}^3$  (усередненої за 24 години);
- ∑ концентрації діоксиду сірки SO<sub>2</sub>  $0,14/10^6$  (усередненої за 24 години).

### 23.7. Оксид вуглецю CO

Оксид вуглецю є безбарвний, без запаху газ, що утворюється при неповному згорянні палива. Автомобілі утворюють 95% цього газу у містах (рис. 24.1). Ще одним джерелом CO є пожежі. Цей газ проникає через легені до кровоносних судин, де зв'язується з гемоглобіном, який постачає кисень клітинам. Отже, оксид вуглецю зменшує кількість кисню, який досягає органів та тканин. Особливо чутливі до CO люди, які страждають від серцевих та респіраторних захворювань (наприклад, ангіни). Високі концентрації CO призводять до порушення зору.

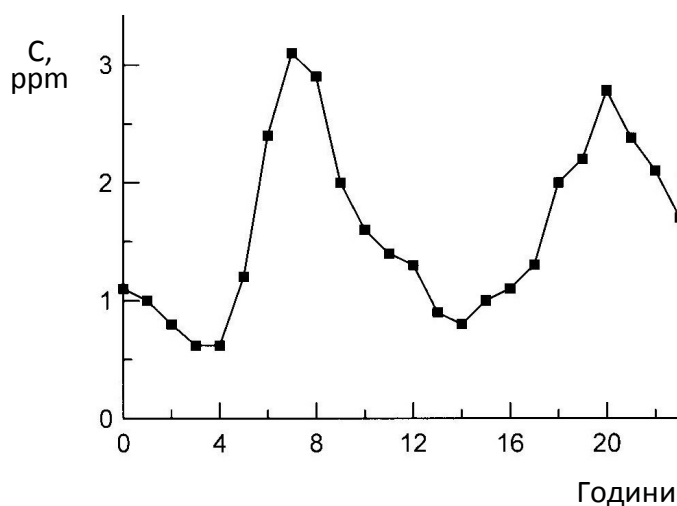


Рис. 23.1. Зміна концентрації оксиду вуглецю у штаті Арізона (США) упродовж дня внаслідок дорожнього руху [62]

Середній рівень CO у будинках без газового опалення складає від 0,5 до 5 ppm.

У будинках з газовим опаленням рівень CO може досягати від 5 до 30 ppm та вище.

Дія концентрацій CO на рівні 100 ppm та більше може бути небезпечною для здоров'я людини.

Стандарти: 9 ppm (8 годин); 35 ppm (1 година)

### 23.8. Вимірювання оксиду вуглецю

*Метод інфрачервоного поглинання.* Метод базується на здатності CO поглинати інфрачервоне випромінювання на довжині хвилі 4.7 мкм; рівень поглинання пропорційний концентрації CO. Схему інфрачервоного фотометра наведено на рис. 23.2.

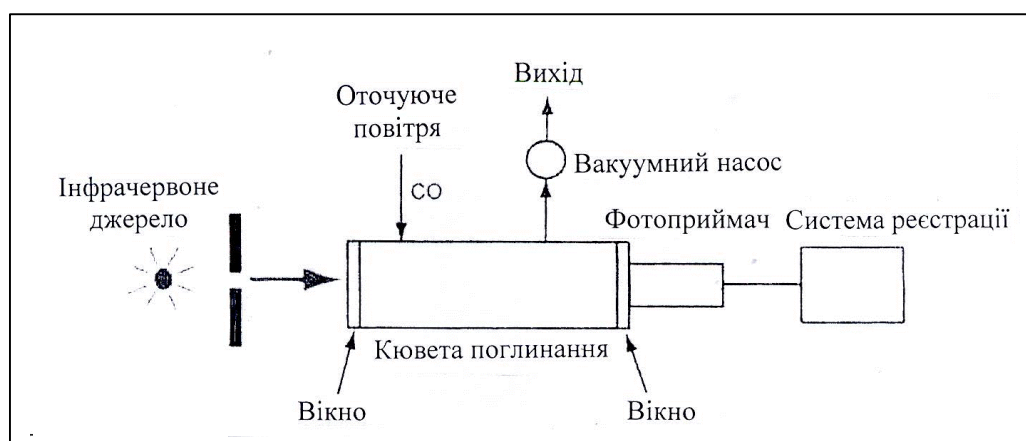


Рис. 23.2. Схема інфрачервоного фотометра для вимірювання оксиду вуглецю

### 23.9. Діоксид азоту NO<sub>2</sub>

*Оксиди азоту (NO<sub>x</sub>),* особливо діоксид азоту, виникають під час високотемпературного згоряння, яке може супроводжуватися появою бурі імлі над містом.

*Діоксид азоту* — за звичайних умов являє собою газову суміш бурого кольору з задушливим запахом.

Можливі джерела надходження діоксиду азоту у атмосферне повітря – виробництво електроенергії, газу та води, обробна промисловість, металургія та оброблення металу, викиди автотранспорту.

Викиди азоту в атмосферу, їх перетворення у нітрати та азотну кислоту призводить до виникнення кислотних дощів.

Діоксид азоту дисоціює під час опромінювання короткохвильовим сонячним випромінюванням; серія фотохімічних реакцій призводить до формування потужного окислювача – озону.

*Вплив NO<sub>2</sub> на здоров'я людини.* Діоксид азоту дуже отруйний. Вдихання його викликає сильне подразнення дихальних органів. Доведено, що короточасна дія NO<sub>2</sub> в діапазоні від 30 хвилин до 24 годин викликає запальовальні процеси у здорової людини та підсилення респіраторних симптомів у людей, хворих на астму.

Згідно з даними ЕРА населення, що мешкає поблизу автомагістралей (в межах 50 м), приречене на дію вищих (на 30-100%) концентрацій  $\text{NO}_2$ , ніж мешканці будинків, віддалених від транспортних артерій. Приблизно 16% громадян США живуть в межах 90 м від автомобільних доріг, залізничних колій та аеропортів, що становить 48 млн мешканців.

### 23.10. Вимірювання діоксиду азоту

*Хемілюмінесцентний метод визначення  $\text{NO}_2$ .* В основі методу лежить реакція між закисом азоту  $\text{NO}$  та озоном  $\text{O}_3$ , внаслідок якої утворюється збуджена форма двоокису азоту  $\text{NO}_2^*$ . Збуджений двоокис азоту переходить в основний стан з випромінюванням світла. В основному, спектр випромінювання хемілюмінесценції займає область близько 1200 нм.

У хемілюмінесцентному аналізаторі повітря, що подається в аналізатор, ділиться на два потоки (рис.23.3). В одному потоці  $\text{NO}_2$  перетворюється у  $\text{NO}$  завдяки молібденовому ( $\text{Mo}$ ) каталізатору, нагрітому до  $325^\circ\text{C}$ . Далі  $\text{NO}$  реагує з озоном (який утворюється штучно завдяки озонатору) у камері низького тиску, що призводить до утворення  $\text{NO}_2$  молекул. Частина з цих молекул знаходяться у збудженому стані ( $\text{NO}_2^*$ ) та беруть участь у випромінюванні світла під час переходу молекул в основний стан. Це світло реєструється та перетворюється на електричний сигнал, пропорційний інтенсивності світла.

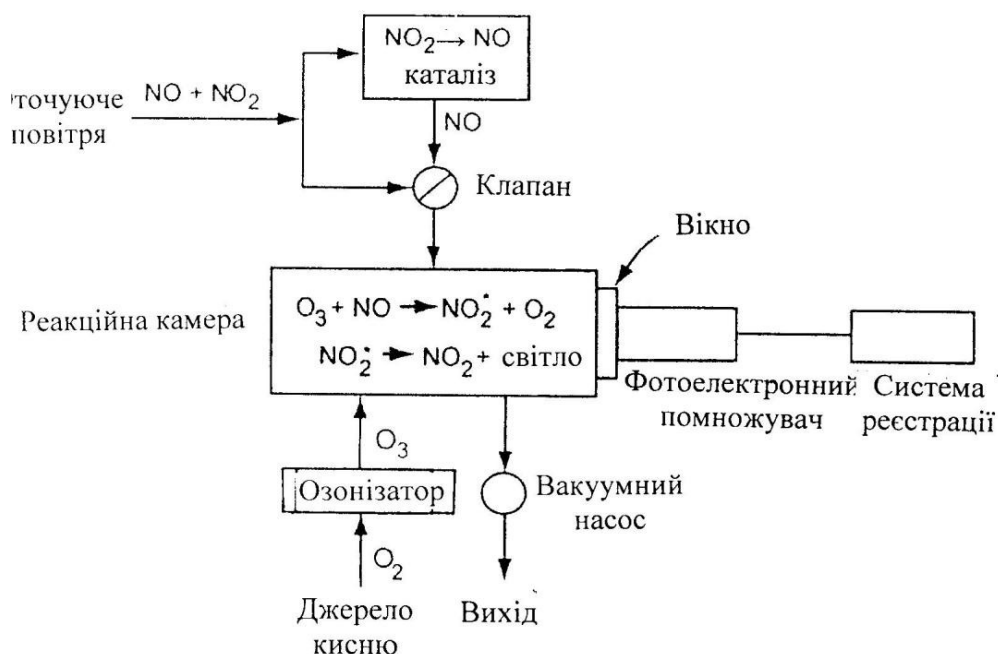


Рис. 23.3. Хемілюмінесцентний метод визначення  $\text{NO}_2$

У другому потоці  $\text{NO}$  обходить каталізатор та реагує з озоном, випромінюючи світло. Реальна концентрація  $\text{NO}_2$  підраховується як різниця між даними конвертованого та неконвертованого  $\text{NO}_2$ .

Чутливість вимірювання  $\text{NO}_2$  хемілюмінесцентним аналізатором (Model 42 Analyzer) становить  $5 \cdot 10^{-10} \text{ NO}_2$ .

### 23.11. Атмосферний озон

Основна маса озону атмосфери (близько 90 %) міститься в стратосфері на висоті 10–50 км з максимумом на висоті 20–25 км (рис. 23.4).

Слід відмітити, що незважаючи на незначну концентрацію озону, він здатний поглинати ультрафіолетове сонячне випромінювання: майже все випромінювання УФ-С області (200–300 нм) та частину випромінювання УФ-В області (280–320 нм).

Саме УФ-В область, у якій поглинають молекули ДНК та білків, призводить до еритеми, небезпечних генетичних порушень в організмі людини, раку шкіри.

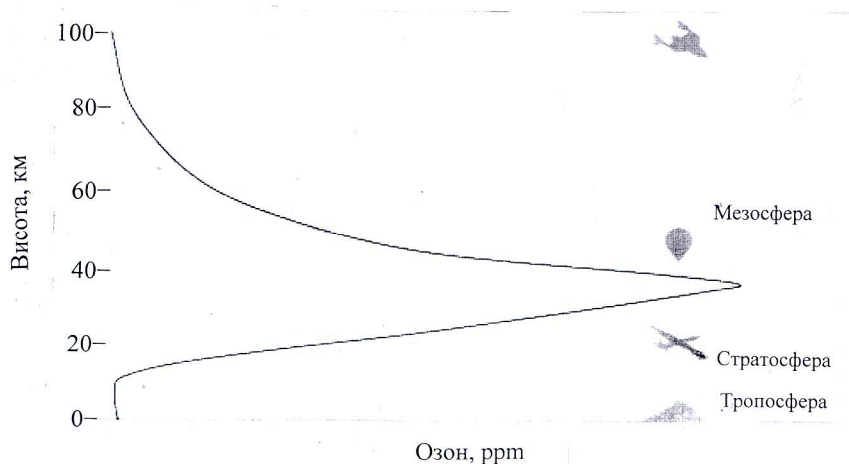


Рис. 23.4. Розподіл озону в стратосфері

### 23.12. Вимірювання атмосферного озону

До основних методів вимірювання атмосферного озону слід віднести спектрофотометри Добсона та Брюера, озонові зонди, лідари та супутники. До сучасних методів моніторингу озону слід віднести програму GOME (The Global Ozone Monitoring Experiment), яке здійснювали завдяки супутнику ESA ERS-2, що був запущений на полярну орбіту у 1995 році. Метою цієї програми було дослідження стратосферного озону, змін клімату та забруднення атмосфери. У результаті застосування програми GOME стало можливим оцінити вертикальний розподіл концентрації озону вздовж всього шару атмосфери та вивчити динаміку утворення озонової дірки.

Ще один метод передбачає застосування пасивного моніторингу озону за допомогою пластикових пакетів, обладнаних тефлоновим віконцем, через яке озон дифундує з оточуючого середовища. У середині пакета знаходиться барвник Індиго Кармін, який здатний змінювати своє забарвлення від світло-жовтого до темно-жовтого під впливом озону.

Діапазон концентрацій озону, які можна оцінювати під час застосування пасивного методу, варіює від  $< 0,045$  ppb до  $> 0,105$  ppb. У 1999 році добровольці з 122 країн застосували пасивні контейнери для вимірювання озону у 542 місцях (рис.24.5).

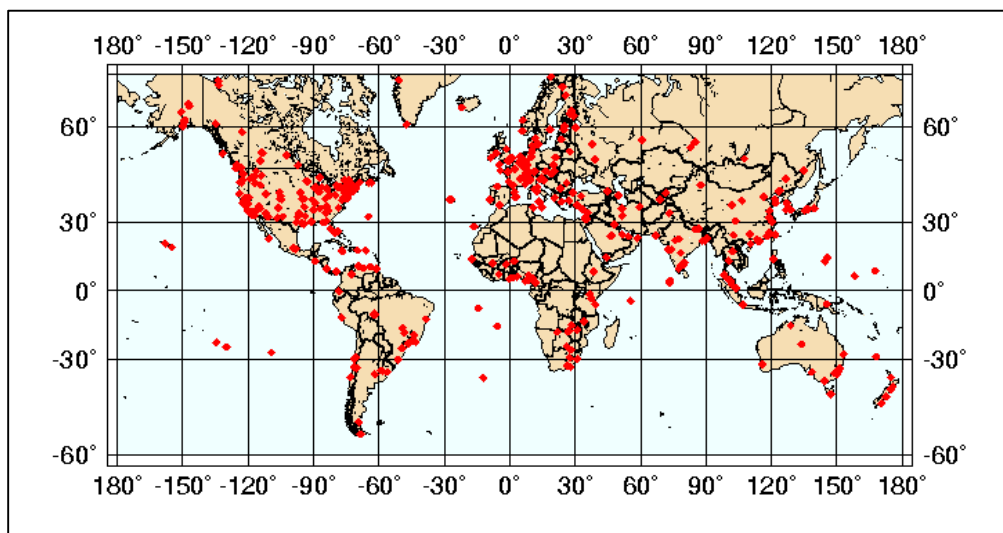


Рис. 23.5. Карта вимірювання озону за допомогою пасивного методу у 1999 році [67]

### 23.13. Приземний озон

Концентрація озону в нижніх шарах атмосфери варіює від 10 до 120 ppb (за об'ємом).

У нижніх шарах атмосфери приземний озон вважається «поганим». Вихлопні гази та індустриальні викиди, пари бензину та хімічні розчинники є джерелами емісії  $\text{NO}_x$  та ЛОС, які сприяють утворенню озону. Приземний озон є первинним компонентом смогу.

*Позитивна* роль озону – він виконує функції ультрафіолетового фільтру.

*Негативна* роль озону – на рівні земної поверхні озон формується, коли забруднюючі речовини, викликані автомобільним транспортом та заводами, вступають у хімічні реакції під впливом Сонця. У даному випадку озон є небезпечним забрудненням повітря, який проникає у легені (особливо, дітей, які більшу частину часу проводять на повітрі, та астматиків). Навіть при низьких концентраціях озон спричиняє порушення функцій легень; викликає гострі респіраторні проблеми; загострює симптоми астми; викликає запалення легень та інфекцію респіраторного тракту.

Приземний озон є небезпечним для рослин. Підвищення концентрації озону викликає руйнування листя та пригнічує ріст рослини та зменшення продуктивності рослинних угідь.



Рослини чутливі до концентрацій озону на рівні 40 ppb (частин на мільярд); серйозні порушення виникають при концентраціях більших, ніж 80 ppb.

Крім того, слід зазначити, що озон руйнує бактерії і, отже, збільшується вихід метану з ґрунту.

#### 23.14. Вимірювання приземного озону

*Хемілюмінесцентний метод* визначення озону. В основі методу лежить реєстрація хемілюмінесценції – процесу звільнення енергії у вигляді світла внаслідок хімічних реакцій.

Наприклад, хемілюмінесценція виникає під час реакції між закисом азоту NO та озоном O<sub>3</sub>.



Хемілюмінесценція реєструється фотоелектронним помножувачем, електричний сигнал з виходу якого пропорційний концентрації озону.

*Опорний метод EPA.* Цей метод базується на реакції O<sub>3</sub> з етиленом, який генерує фотони, що реєструються та перетворюються в електричний сигнал на виході фотоелектричного помножувача. Недоліки методу пов'язані з горючістю та токсичністю етилену. Крім того, він полімеризується у газовому потоці системи, викликаючи проблеми з компонентами системи – вимірювачами потоків, клапанами, регуляторами.

*Ультрафіолетова фотометрія.* Принцип дії приладу базується на поглинанні озonom ультрафіолетового випромінювання на довжині 254 нм. Рівень пропускання (поглинання) прямо пропорційний концентрації озону згідно з законом Бера-Ламберта:

$$T = (I/I_0) = \exp(-\alpha Cl), \quad (23.3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання озону;  $C$  – концентрація озону в атмосфері;  $l$  – довжина оптичного шляху.

Концентрація озону визначається за виразами:

$$C(\text{atm}) = -\frac{1}{\alpha l} \left[ \ln \left( \frac{I}{I_0} \right) \right], \quad (23.4)$$

$$C(\text{ppm}) = -\frac{10^6}{\alpha l} \left[ \ln \left( \frac{I}{I_0} \right) \right]. \quad (23.5)$$

Схему ультрафіолетового фотометра наведено на рис. 23.6.

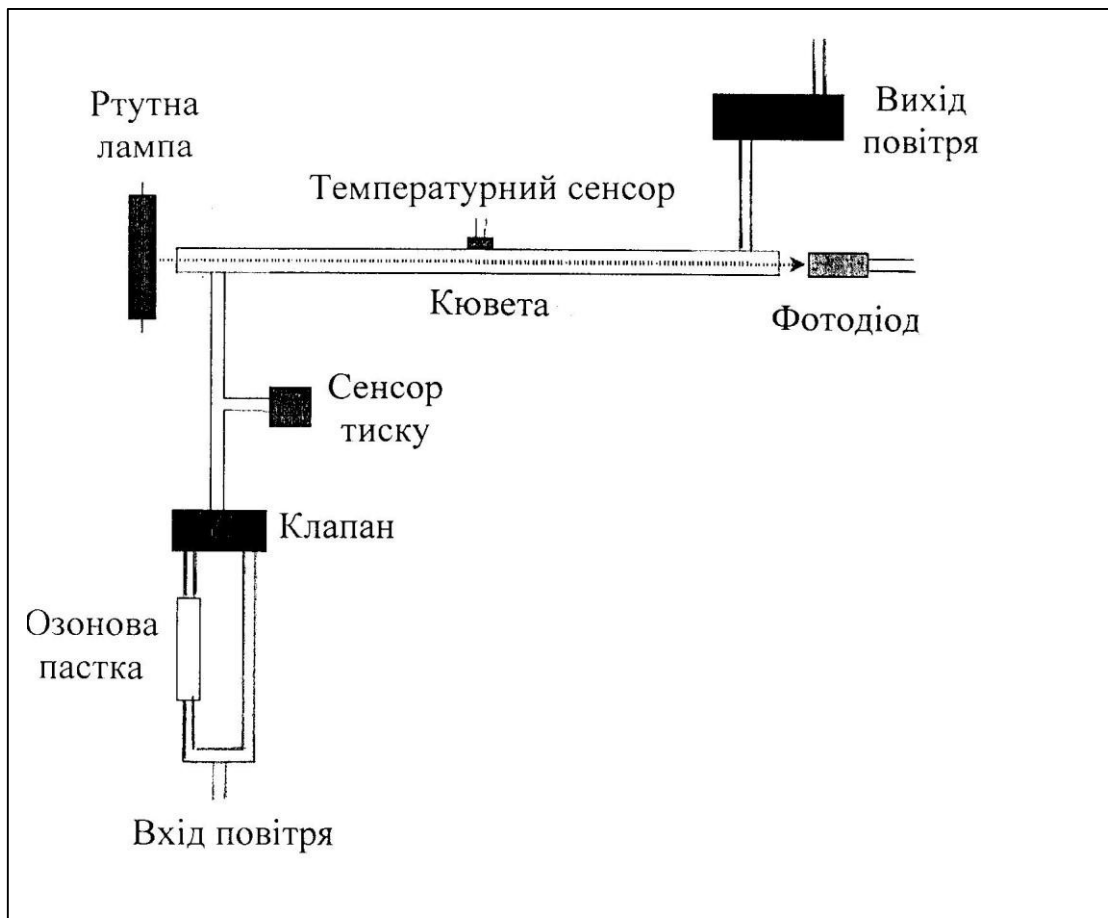


Рис. 23.6. Схема ультрафіолетового фотометра для вимірювання озону

### 23.15. Частинки

*Частинки* – це окремі порції твердої, рідкої або газоподібної речовини, розміри яких перевищують 1 нм.

Частинки  $PM_{2,5}$  розмірами меншими ніж 2,5 мкм можна побачити лише в електронному мікроскопі. Ці частинки є продуктами вихлопних газів, заводів, згоряння деревини, лісових пожеж.

Частинки  $PM_{10}$  розмірами від 2,5 до 10 мкм можуть виникати під час руху транспорту на дорогах.

Атмосферні частинки викликають небезпечні з точки зору серцевих та респіраторних захворювань; залежно від розмірів, вони здійснюють шкідливий вплив на ніс, горло, легені, трахеї та бронхи.

### 23.16. Техніка уловлювання частинок

#### 23.16.1. Інерційна багатоканерна система

Така система використовується для розділення частинок за розмірами. Частинки великого розміру (більшого за 10 мкм) взаємодіють з про-

кладками приладу, тоді як дрібні частинки залучаються фільтровальним папером, після чого їх зважують та оцінюють (рис. 23.7).

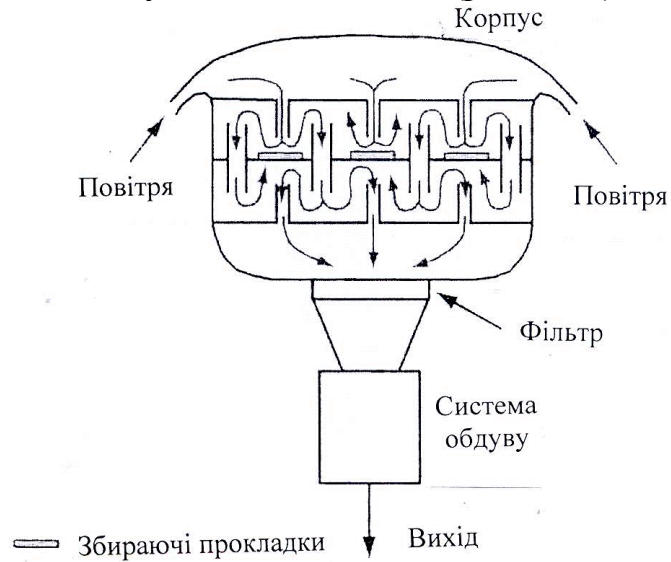


Рис. 23.7. Інерційна багатокамерна система

### 23.16.2. Гравітаційна камера осідання

На частинку, що рухається, діють горизонтальна сила в'язкості та вертикальна гравітаційна сила. На частину, що потрапляє у камеру осідання, діють сила гравітації  $F_{gp}$ , що спрямована вертикально, та сила опору  $F_{on}$ , що спрямована горизонтально. Завдяки дії цих двох сил частинка рухається у камері під кутом до її поздовжньої осі (рис.23.8).

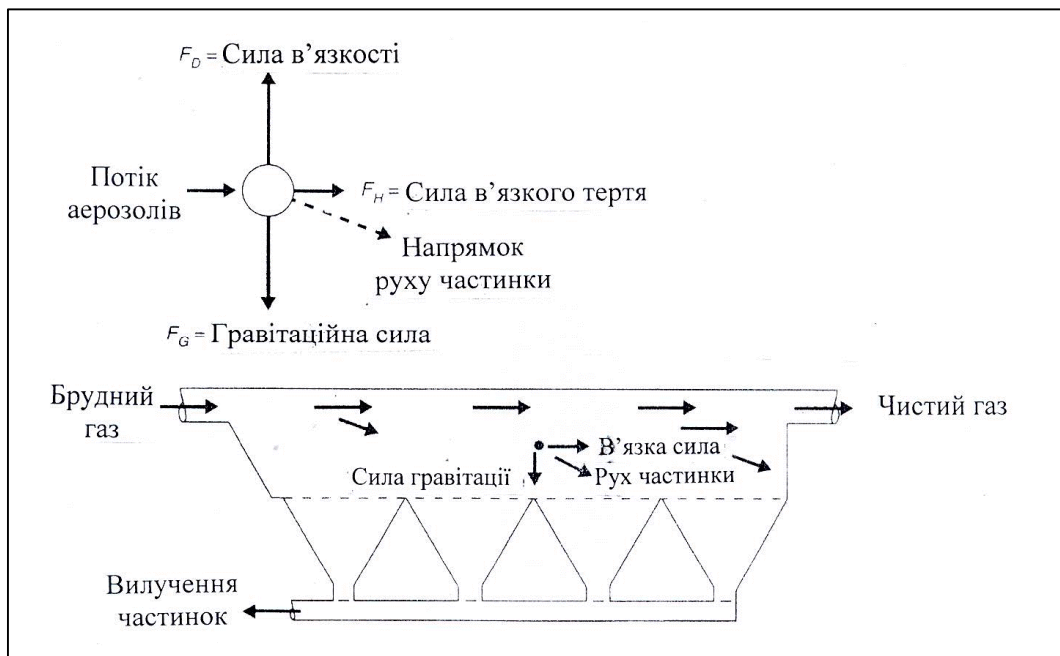


Рис. 23.8. Гравітаційна камера осідання

Ефективність віддалення частинок з потоку, яка залежить від густини частинок, швидкості їх руху та геометрії камери, визначається за виразом:

$$\phi_g = 1 - \exp\left[-\frac{gd_q^2\rho_qL}{18\eta vH}\right], \quad (23.6)$$

$d_q$  – діаметр частинки,  $\rho_q$  – густина частинки,  $\eta$  – в'язкість середовища,  $v$  – швидкість руху частинки,  $L$  – довжина камери,  $H$  – глибина камери.

### 23.16.3. Змочувальна камера

Частинки попадають у вузьку ділянку камери, де швидкість їх збільшується. У цій же ділянці у перпендикулярному напрямку подається потік рідини. Частинки взаємодіють з рідиною та утворюють краплі. Оскільки ці краплі більші за розмірами, ніж частинки, вони рухаються за іншою траєкторією, що дає можливість відділити їх від частинок (рис. 23.9).

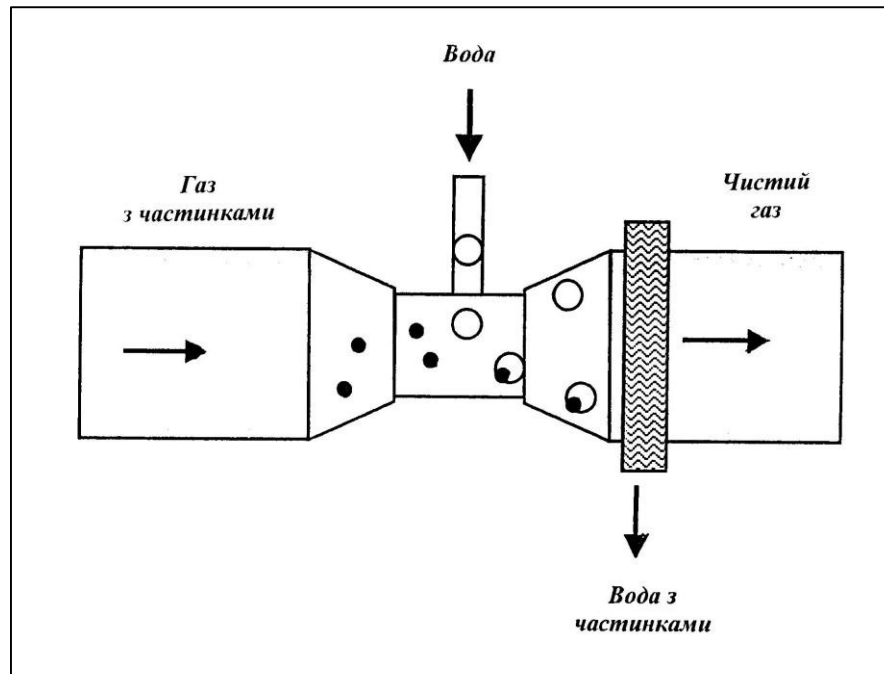


Рис. 23.9. Змочувальна камера

### 23.16.4. Електростатичний уловлювач

Електростатичні уловлювачі базуються на застосуванні електричного розряду в газах з метою віддалення продуктів їх згоряння та зменшення забруднення повітря. Сучасні системи такого типу здатні віддалити до 99% золи та пилу з індустріального диму. Принцип дії електростатичного уловлювача пояснюється на рис. 23.10. Вздовж вертикальної труби розташований спіралеподібний провідник; до труби та провідника прикладена висока (40–100 кВ) напруга, причому провідник приєднаний до позитивного

полюсу джерела напруги, так що електричне поле спрямовано до провідника. Оскільки напруженість електричного поля досить велика поблизу провідника, саме в цій області формується коронний розряд, що супроводжується появою іонів та електронів. Негативні іони та електрони рухаються до стінки труби і заряджають частинки пилу за рахунок зіткнень та взаємодії з іонами. Частинки теж досягають поверхні труби, після чого осідають на дно системи.

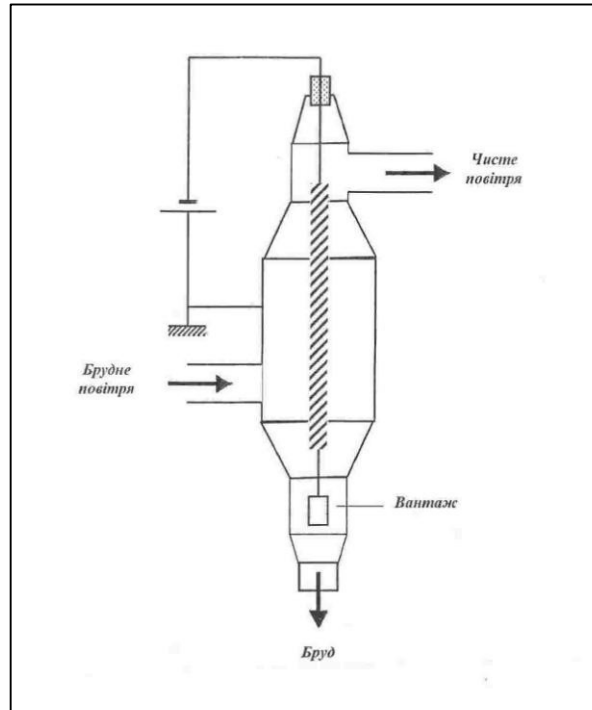


Рис. 23.10. Електростатичний уловлювач

### 23.16.5. Циклонний колектор

У цій інерційній системі на частинку діють відцентрова та гравітаційна сили (рис. 23.11).

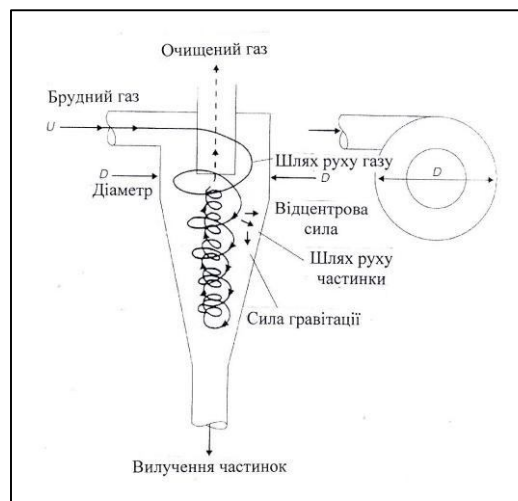


Рис. 23.11. Циклонний колектор

Залежно від співвідношення між цими силами (а воно визначається масою частинки та її швидкістю) частинки рухаються по спіралі, після чого досягають вихідного отвору колектора.

### 23.16.6. Дихотомна система

Принцип дії системи полягає у розділенні частинок за розмірами завдяки двом каналам, які відрізняються перерізом і, отже, швидкістю повітряного потоку (рис. 23.12).

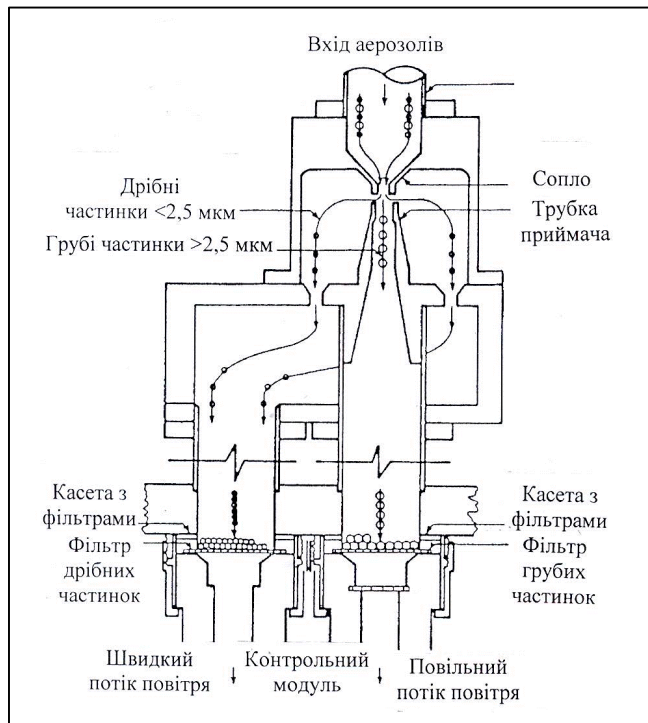


Рис. 23.12. Дихотомна система

### 23.17. Діоксид сірки SO<sub>2</sub>

Діоксид сірки є безбарвний газ, який виникає під час згоряння вугілля та нафти, які містять сірку.

За високими концентраціями діоксид сірки викликає хрипіння, обмеженість та скорочення дихання навіть у здорових людей.

Довготривала дія діоксиду сірки призводить до респіраторних захворювань. Люди з серцевими захворюваннями особливо чутливі до SO<sub>2</sub>.

У 1952 році близько 4000 смертельних випадків сталося у Лондоні внаслідок 4-денного забруднення повітря SO<sub>2</sub>.

Максимальна концентрація SO<sub>2</sub> становила 1.34 ppm (3510 мкг/м<sup>3</sup>).

Для порівняння зазначимо, що у США первинний стандарт якості повітря для SO<sub>2</sub> становить 0,03 ppm або 80 мкг/м<sup>3</sup> упродовж року; 0,14 ppm або 365 мкг/м<sup>3</sup> за 24-год період; 0,50 ppm або 1300 мкг/м<sup>3</sup> за 3-год період.

## 23.18. Вимірювання діоксиду сірки

*Флуоресцентний метод визначення SO<sub>2</sub>.* Метод базується на поглинанні молекулою SO<sub>2</sub> ультрафіолетового (УФ) випромінювання та збудженні цієї молекули на одній частоті  $\nu_1$  з подальшим випромінюванням флуоресценції на другій частоті  $\nu_2$ :



Ультрафіолетове випромінювання спрямовується в реакційну камеру, яка містить повітря з SO<sub>2</sub> (рис.23.13). Деякі молекули SO<sub>2</sub> збуджуються ультрафіолетовим випромінюванням та швидко переходять у основний стан, випромінюючи фотони інфрачервоного діапазону. Фотопомножувач перетворює світловий сигнал на електричний, величина якого пропорційна концентрації SO<sub>2</sub>.

Інтенсивність флуоресценції прямо пропорційна концентрації SO<sub>2</sub>.

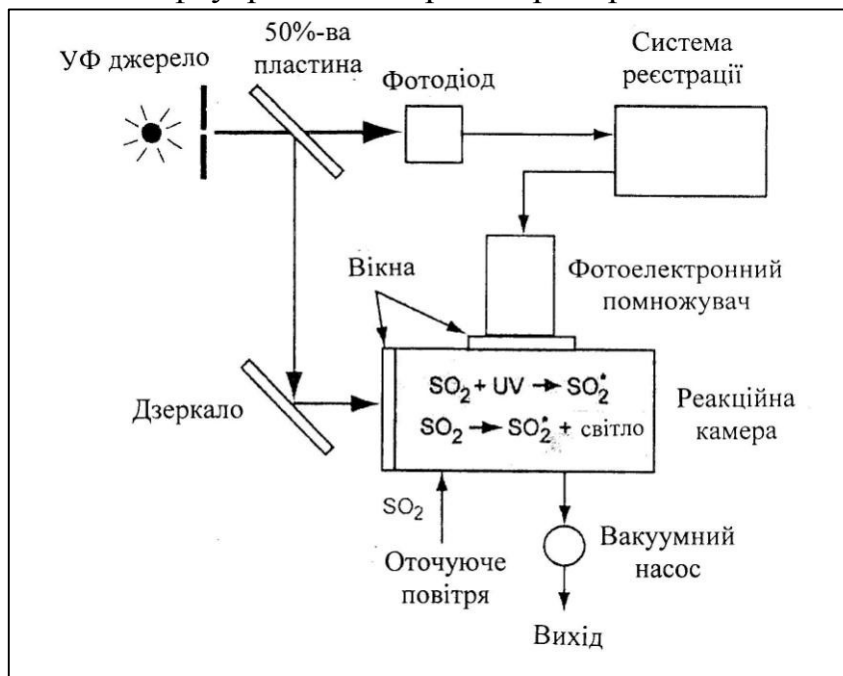


Рис. 23.13. Флуоресцентний метод визначення SO<sub>2</sub>

## 23.19. Відкриті системи аналізу повітря

### 23.19.1. Диференційна оптична спектроскопія поглинання

Основна ідея методу полягає у порівнянні концентрації забруднюючої речовини з поглинанням оптичного випромінювання цією речовини згідно з законом Бера-Ламберта. Проте, слід відмітити, що застосування цього закону ускладнюється через можливий вплив розсіювання атмосферних молекул та аерозолів. Отже всі ці компоненти вносять вклад у загальне поглинання атмосфери. Ці труднощі можна подолати завдяки диференційній оптичній спектроскопії поглинання (Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS).

Типовий диференційний спектрометр поглинання складається з джерела світла (ксенонова лампа), випромінювання якої проходить через телескоп, який виконує функції коліматора, ретрорефлектора, який відбиває оптичне випромінювання у зворотному напрямку, кварцового світловода для передачі випромінювання з телескопа у монохроматор, спектрографа, що містить монохроматор з дифракційною решіткою та системи реєстрації (рис.23.14). Оптичне випромінювання проходить через атмосферу (оптичний шлях може досягати 0,5–1,5 км), що аналізується.

Диференційний спектрометр поглинання вимірює поглинання на двох довжинах хвиль – випромінювання однієї ( $\lambda_0$ ) довжини хвилі співпадає зі смугою поглинання об'єкта (газу чи забруднення), тоді як випромінювання другої ( $\lambda_{\omega}$ ) довжини хвилі співпадає з основою смуги поглинання. Поглинання об'єкта порівнюється з поглинанням забруднюючої речовини з відомою концентрацією; такі дані містяться у банку даних спектрометра.

За допомогою диференційного спектрометра поглинання можливо вимірювати компоненти смогу у повітрі міст (такі як  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{O}_3$ , формальдегід), забруднюючі речовини у повітрі індустриальних зон, аеропортів та автострад, здійснювати моніторинг якості повітря тропосфери та стратосфери.

Ця техніка може бути застосована для одержання томографічних зображень просторового розподілу забруднень у атмосфері. З цією метою застосовують дві вежі з диференційними спектрометрами поглинання та кількома (від 4 до 20) ретрорефлекторами. Така система надає можливість побудувати дво- та тривимірні зображення (томограми) слідових концентрацій забруднювачів у просторі [68].

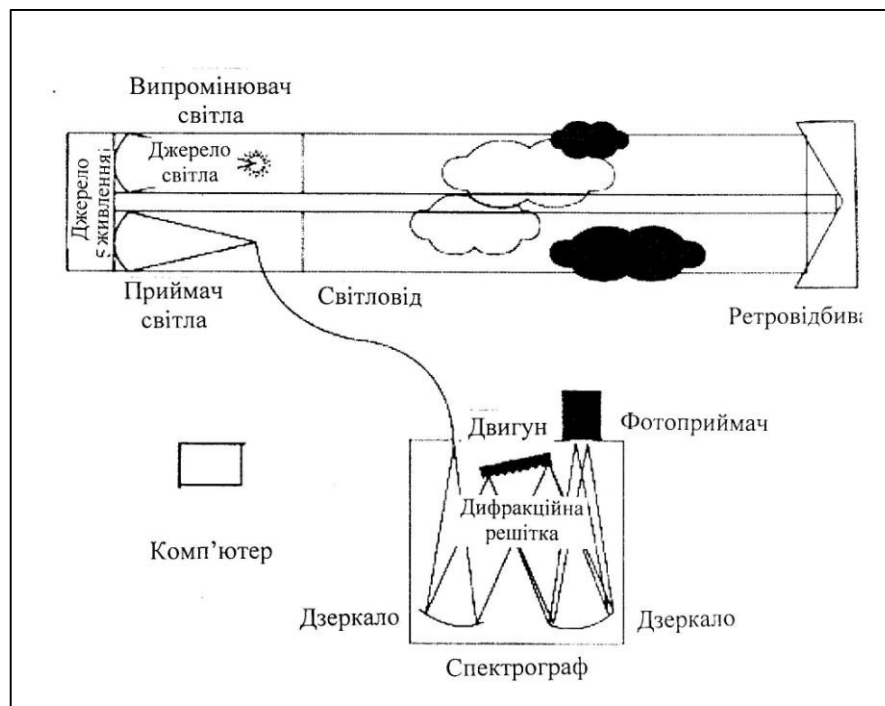


Рис. 23.14. Схема типового диференційного спектрометра поглинання

[68]



На рис. 23.15 наведено можливе застосування диференційного спектрометра поглинання для контролю концентрації викидів з труби промислового підприємства [62]. Оптичне випромінювання у цьому разі пропускають через віконця у трубі.

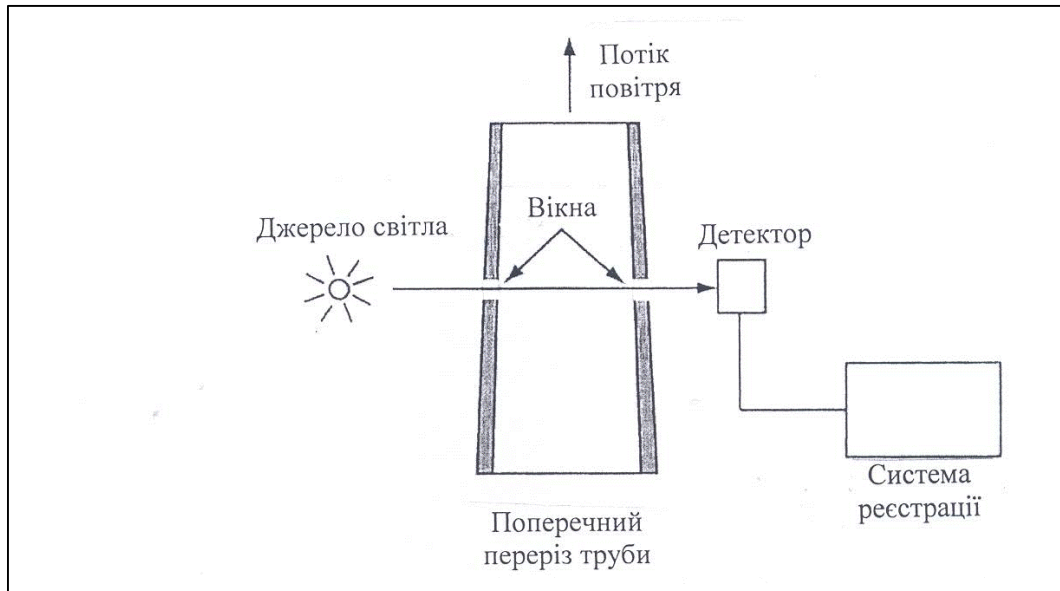


Рис. 23.16. Застосування диференційного спектрометра поглинання для контролю концентрації викидів з труби промислового підприємства [62]

### 23.19.2. Спектроскопія Фур'є перетворення

Згідно з перетворюванням Фур'є будь-яке складне коливання  $y(t)$  можна представити як комбінацію достатньо великої кількості синусоїдних та косинусоїдних хвиль, які утворюють *ряд Фур'є* :

$$y(t) = \sum_n (A_n \sin 2\pi\nu_n t + B_n \cos 2\pi\nu_n t), \quad (23.9)$$

де  $A_n$  і  $B_n$  – амплітуди гармонічних коливань;  $\nu_n$  – частота  $n$ -го коливання.

Залежність відносної інтенсивності гармонік від їх частоти називається *гармонічним спектром* складного коливання. Приклад розкладання складного коливання у ряд Фур'є наведено на рис. 23.17.

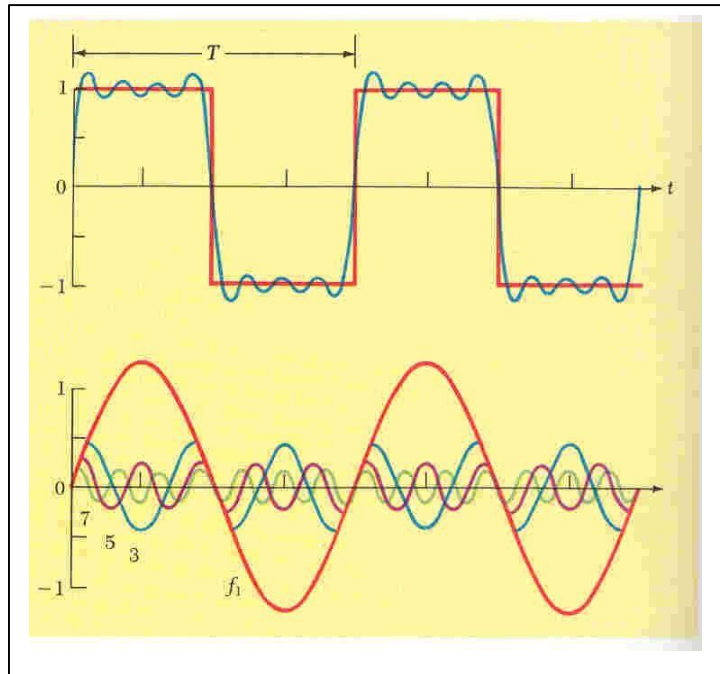


Рис. 23.17. Розкладання складного коливання у ряд Фур'є

Результати розкладання представлені у *часовому домені* (домен – це набір або область всіх можливих величин незалежних змінних деякої функції). Якщо побудувати залежність інтенсивності гармонік від частоти (використати *частотний домен*), то залежність інтенсивності гармонік, з яких складаються складний сигнал, від частоти називається *спектром* складного сигналу.

Інформацію, яка надається у часовому домені, можна порівняти з інформацією у частотному домені за рахунок Фур'є-перетворення.

Пряме перетворення має вигляд:

$$S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\nu) e^{-i2\pi\nu t} d\nu, \quad (23.10)$$

а зворотне перетворення описується так:

$$I(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{i2\pi\nu t} dt \quad (23.11)$$

Тут сигнал  $S(t)$  являє собою суму всіх гармонік у частотному домені, а  $I(t)$  – у часовому домені.

Якщо сигнал характеризується лише однією частотою, він буде зображуватися у часовому домені синусоїдою, а у частотному – однією спектральною лінією (рис. 23.18,*a*)

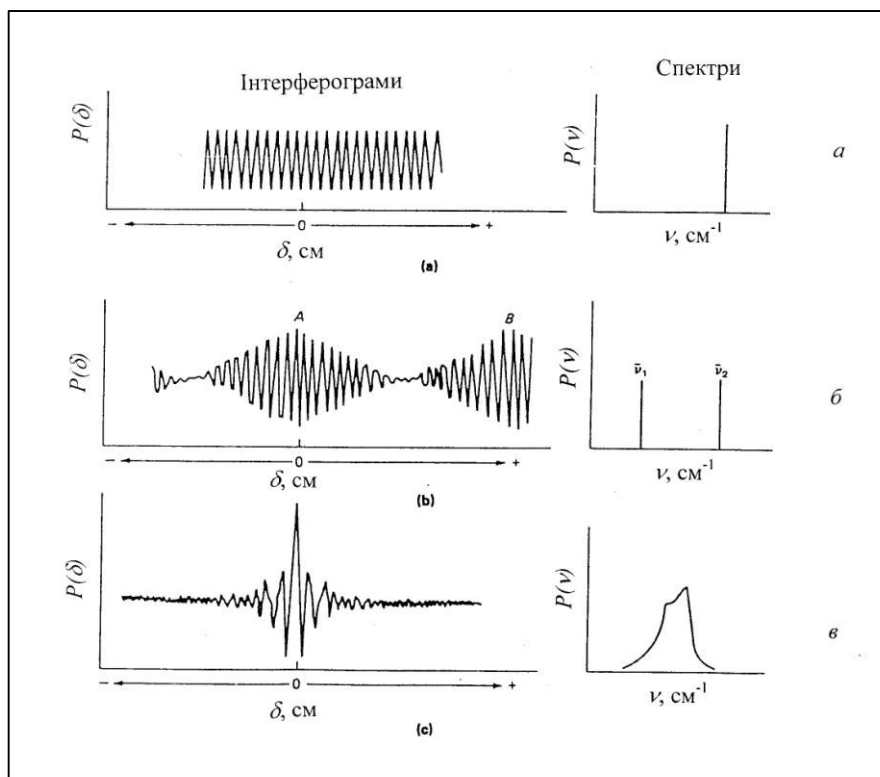


Рис. 23.18. Спектр оптичного випромінювання в часовому і частотному масштабах

Якщо сигнал містить дві гармоніки, вони утворюють внаслідок накладання коливань *биття*. Тоді такий сигнал буде зображуватися у часовому домені накладанням коливань, а у частотному – двома спектральними лініями (рис.23.18,б).

Складний сигнал, що складається з великої кількості гармонік, характеризується *інтерферограмою* (результатом накладання багатьох гармонік) у часовому домені та спектральною смугою у частотному домені (рис. 23.18,в).

### 23.19.3. Фур'є-спектрометр

Основу цього приладу становить інтерферометр Майкельсона, у якому використовується джерело монохроматичного оптичного випромінювання. Одне з дзеркал інтерферометра може рухатися поступально. Якщо це дзеркало переміщується на відстань, яка дорівнює  $\lambda/4$  (де  $\lambda$  – довжина хвилі оптичного випромінювання), то два променя будуть знаходитися у протифазі, коли вони будуть досягати детектора. Під час руху дзеркала з постійною швидкістю детектор буде реєструвати модульований за синусоїдним законом світловий сигнал, якщо використати джерело монохроматичного випромінювання (рис. 23.19).

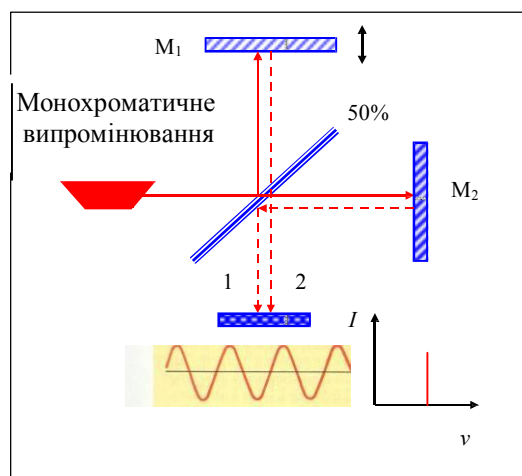


Рис. 23.19. Реєстрація детектором модульованого за синусоїдним законом світлового сигналу під час руху дзеркала з постійною швидкістю, якщо використати джерело монохроматичного випромінювання

Якщо використовувати джерело немонохроматичного оптичного випромінювання (рис.23.20), то завдяки Фур'є-перетворенню можна будь-якому частотному спектру зіставити специфічну інтерферограму – так званий *спектр Фур'є*; цій інтерферограмі відповідає реальний спектр речовини, що досліджується.

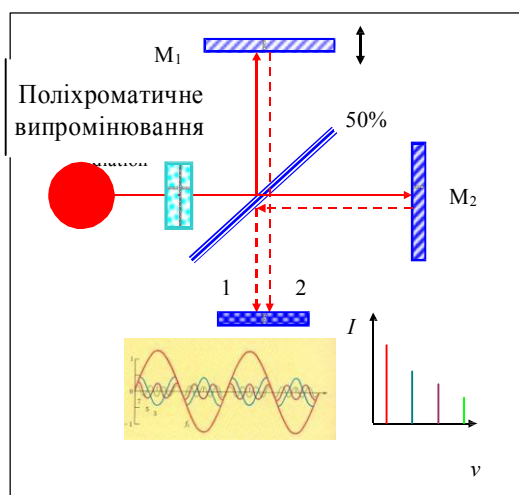


Рис. 23.20. Реєстрація детектором інтерферограми (спектра Фур'є) під час руху дзеркала з постійною швидкістю, якщо використати джерело поліхроматичного випромінювання

Традиційна спектроскопія оперує у частотному масштабі, тобто досліджує потужність оптичного випромінювання залежно від частоти (довжини хвилі); спектроскопія Фур'є перетворення використовує часовий масштаб, якщо реєструються зміни потужності оптичного випромінювання у

часі. Методи спектроскопії Фур'є перетворення характеризуються високою роздільною здатністю ( $< 0,1 \text{ см}^{-1}$ ), точністю і відтворюваністю.

#### 23.19.4. Відкрита система Фур'є-спектрометра

Принцип дії відкритої системи Фур'є-спектрометра пояснюється на рис. 23.7. Він включає джерело оптичного випромінювання, інтерферометр Майкельсона, детектор та систему реєстрації.

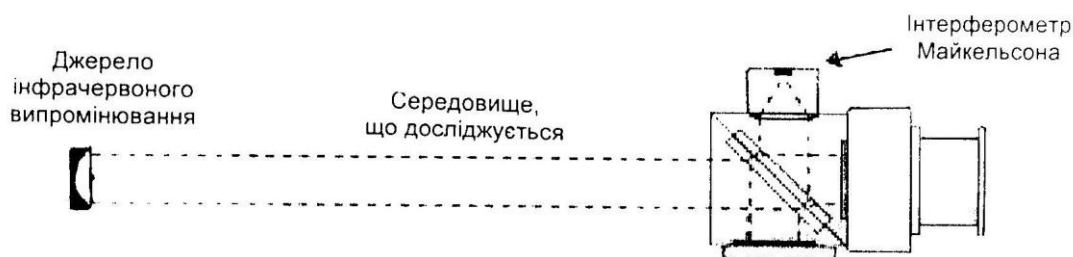


Рис. 23.21. Схема відкритої системи Фур'є-спектрометра

Такий спектрометр Фур'є може бути застосований для ідентифікації та кількісного визначення молекул, що входять у склад індустриальних викидів, з високою чутливістю та роздільною здатністю.

#### 23.20. Мініатюрні системи газового аналізу на основі вологої хімії

Мобільний моніторинг навколишнього середовища за допомогою портативних газоаналізаторів, які характеризуються високою чутливістю та високою роздільною здатністю, став поширеним останніми роками під час досліджень забруднення повітря, детектування нервово-паралізуючих газів та продуктів вибухів внаслідок терористичної діяльності.

Методи *вологої хімії* базуються на збиранні газів, накачуванні цих газів у колектор з подальшою їх участю у хімічних реакціях та колориметрії або флуориметрії зразка. Цей метод використовують для аналізу неорганічних газів та тих газів, що розчинюються у воді.

Рідкі краплини та рідкі плівки, як мають велике відношення площі поверхні до об'єму, зручні для збирання розчинених у воді газів.

Коли газовий потік проходить через рідку краплину, розчинні компоненти, які містяться у газі, дифундують та розчинюються у цій краплині.

Дуже часто виникає необхідність розділяти газ від частинок певними фізичними засобами, оскільки та ж сама субстанція, що аналізується, може знаходитися у обох фазах. Через те, що коефіцієнти дифузії газу у близько 4 рази більші, ніж у дрібних частинок атмосферних аерозолів, очевидною

стає можливість розділення газів та частинок за дифузійними параметрами.

Краплина води є природним колектором розчинних газів. Яскравим прикладом є відчуття свіжого повітря після дощу чи зливи. Цікаво відмітити також, що під час випаровування газів з поверхні краплини потік молекул, що залишають поверхню, не дає частинкам наблизитися до краплини.

### 23.20.1. Краплинний колектор

Зображення колектора [69] наведено на рис. 23.22.

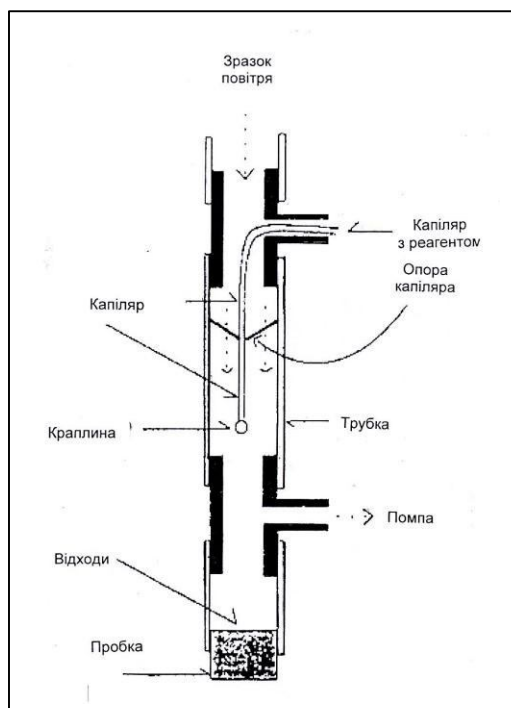


Рис.23.22. Краплинний колектор [69]

Один кінець кварцового капіляра розташований у центрі трубки великого діаметра, вздовж якої пропускають газ, що аналізується. Необхідний розчин накачується через капіляр, на кінці якого утворюється краплина для збирання газів. Газ проходить через краплину, молекули газу дифундують через її поверхню і збираються у ній. Концентрація газів у краплині визначається після засмоктування краплини в автоматизовану систему реєстрації.

Ще одна модифікація [70] передбачає використання краплини розчину з реагентом, яка формується на кінці трубки в циліндричній камері. Краплина являє собою не лише колектор для збирання газів, але й реактор, де відбувається хромогенна (із зміною кольору) реакція; колір розчину залежить від концентрації зібраних газів (рис. 23.23).

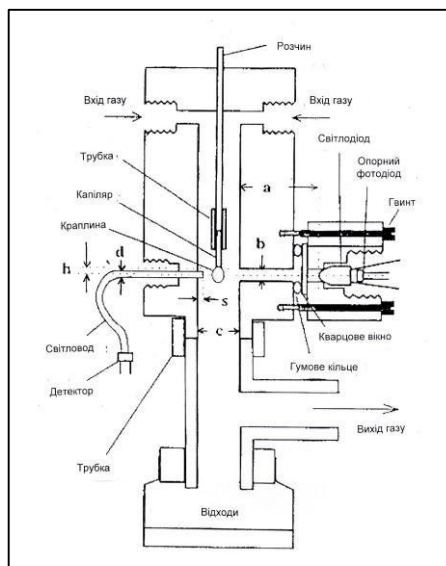


Рис. 23.23. Модифікація краплинного колектора [70]

### 23.20.2. Вимірювання $\text{NO}_2$ на $\text{ppb}$ рівні

Описується процедура вимірювання  $\text{NO}_2$  на рівні  $\text{ppb}$ .

Експериментальна установка [71] складається з двох оптичних волокон, які знаходяться у контакті з двох сторін краплини, яка підтримується U-подібною платиноюю провідкою та двома тefлоновими трубками.

Оптичне випромінювання (555 нм) подається на рідку плівку, що утворюється на платиновій рамці краплиною, у якій знаходиться реагент Griess-Saltzman.

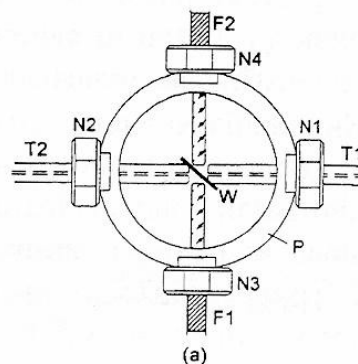


Рис. 23.24. Краплинна камера для збирання та аналізу  $\text{NO}_2$  на рівні  $\text{ppb}$  [71]

Випромінювання, що пройшло через плівку, реєструється фотодетектором. Газ, що аналізується, проходить через краплину. Сигнал, що реєструється детектором, пропорційний концентрації газу.

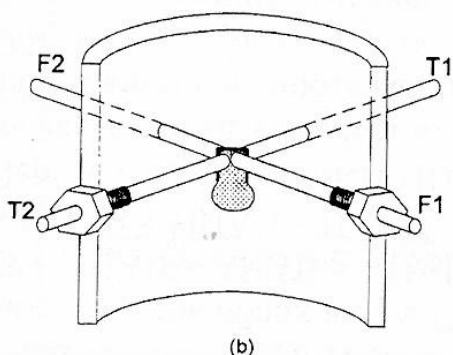


Рис. 23.11. Мікрокамера для збирання та аналізу краплин з газом [71]

Схему приладу наведено на рис.23.10. Платинова рамка (3×5 мм) у вигляді перегорнутої літери U закріплена між тефлоновими (T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>) трубками та кремнієвими волокнами (F<sub>1</sub>-F<sub>2</sub>) під кутом 45° (рис. 23.11). Діаметр волокон становить 1 мм. Рідина тече через трубку T<sub>1</sub> та формує краплину, яка розтікається у вигляді плівки на рамці. Система передбачає постачання реагенту S до рідкої плівки.

Трубка T<sub>2</sub> потрібна для підтримки конструкції. Випромінювання 555 нм світлового діода подається через волокно F<sub>1</sub>, плівку та волокно F<sub>2</sub>, після чого реєструється рівень оптичного пропускання фотодетектором.

Концентрація газів у плівках визначається шляхом вимірювання електропровідності або хемілюмінесценції.

### 23.20.3. Мініатюрні мембрани з дифузійною пасткою

Використовують мембрану, що здатна підтримувати розділення двох фаз – рідину та повітря.

В основі дифузних пасток лежить використання гідрофобних пористих мембран для розділення рідкої та твердої фаз речовини. Зазвичай застосовують пористі мембрани, виготовлені з політетрафлуороетилену (pPTE) або пористого поліпропілену (pPP), та непористі мембрани на основі полідиметилсілоксану (PDMS) або Nafion. Молекули повітря дифундують через мембрану та захоплюються пасткою.

Типовий об'єм такої мембрани становить близько 100 мклітрів.

Такі системи використовують для аналізу SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HCHO.

В основі дифузних пасток лежить використання гідрофобних пористих мембран для розділення рідкої та твердої фаз речовини. Молекули повітря дифундують через мембрану та захоплюються пасткою.

Пропонуються автоматизовані системи портативних флуориметрів для вимірювання атмосферного H<sub>2</sub>S [72]. Повітря, що аналізується, спрямовують через дифузійну мембранну пастку (або скребачку – membrane based diffusion scrubber), що збирають його у колекторі, заповненому розчином на основі лужного флуоресцеїн-ртутного ацетатного розчину (ФРА). Сульфід водню, що збирається, гасить флуоресценцію розчину. Інтенсивність випромінювання флуоресценції, що вимірюється, пропорційна концентрації атмосферного H<sub>2</sub>S.

Є ще такі типи мембранних трубок для аналізу поглинутого газу.

Тефлонова трубка Teflon AF є прозора для оптичного випромінювання; коефіцієнт заломлення тефлону менший, ніж у води, отже він разом з розчином виконує функції рідкого світловоду (рис. 23.12). Випромінювання флуоресценції від світлового діода (460 нм) розсіюється на розчині і збуджує його флуоресценцію з максимумом при 530 нм, яка реєструється детектором. Інтенсивність останньої залежить від концентрації ФРА.



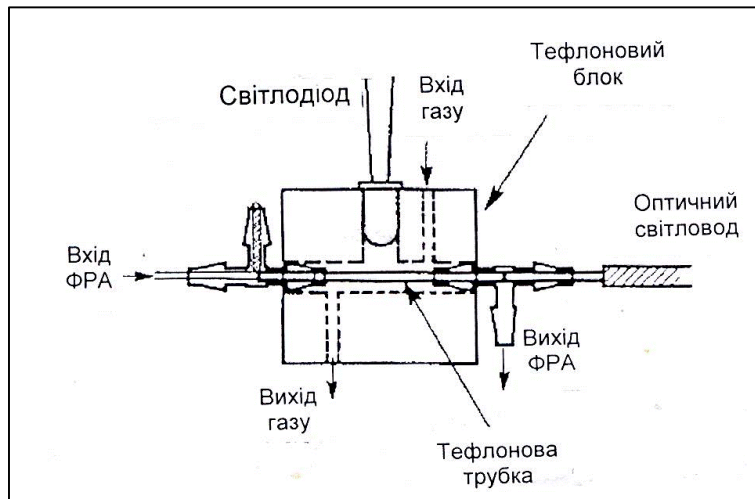


Рис. 23.12. Дифузна пастка на основі тефлонової трубки, що виконує разом з розчином функції рідкого світловоду [72]

Є ще конструкції – з детектором V-подібної форми (рис. 23.13), у якій світлодіод має прямий контакт з розчином, або з перпендикулярним розташуванням трубки та фотодіода (рис. 23.14) [72].

Випромінювання флуоресценції від світлового діода (460 нм) розсіюється на розчині і збуджує його флуоресценцію з максимумом при 530 нм.

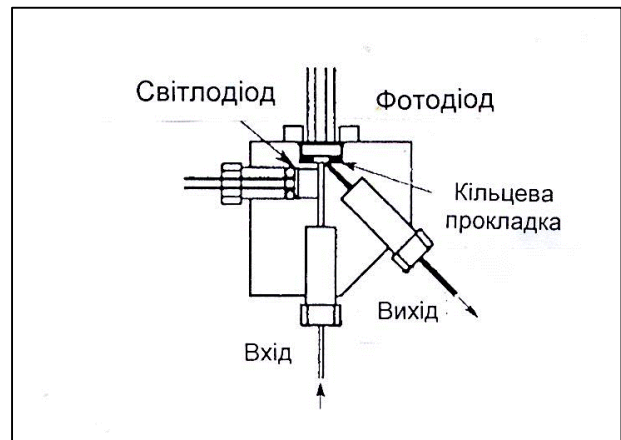


Рис. 23.13. Дифузна пастка на основі застосування детектора V-подібної форми [72]

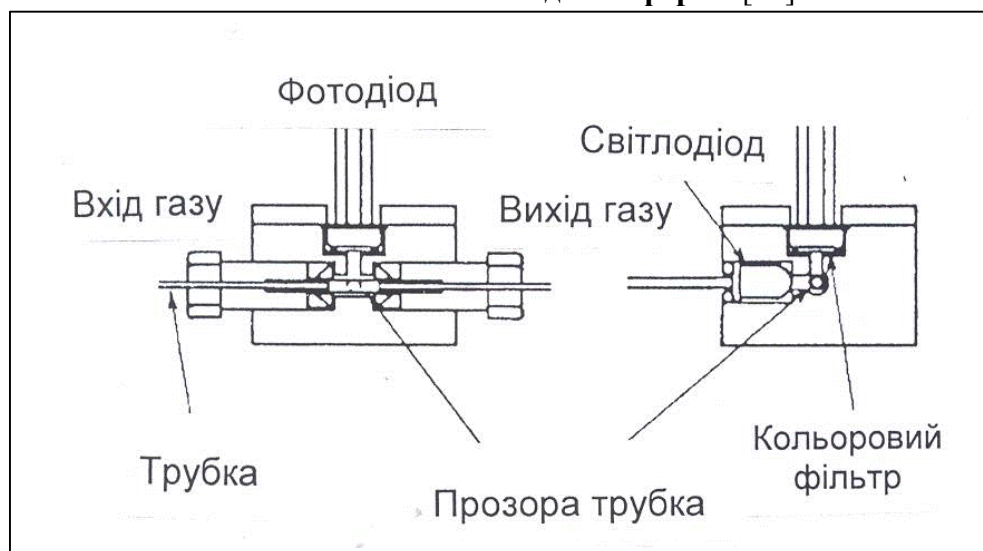


Рис. 23.14. Дифузна пастка на основі застосування прямого детектора [72]

Такі системи застосовують для аналізу таких газів як  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{NO}_2$ ,  $\text{HCHO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_3\text{SH}$ ,  $\text{SO}_2$ .

Пориста трубка виконує у даному випадку функції як газового колектора, так й довгої і тонкої оптичної чарунки, яка поєднана з джерелом світла та фотодетектором (рис. 23.15) [72].

Довга трубка має переваги, оскільки забезпечує збільшення поглинання. Такі системи застосовують для аналізу  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HONO}$ .

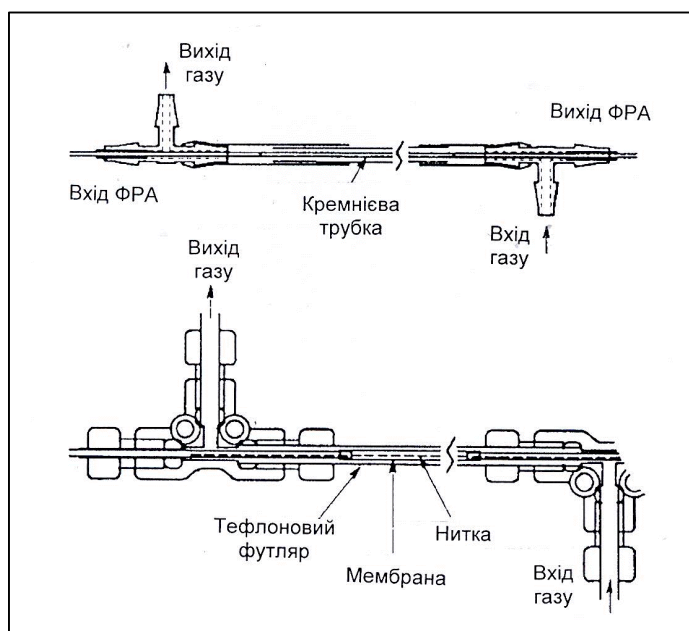


Рис. 23.15. Дифузна пастка на основі застосування кремнієвого або нафійонового поглиначів [72]

Застосування силіконових та нафійонових поглиначів дає можливість ефективно збирати  $\text{H}_2\text{S}$ . Після накопичення газу вмикається світловий діод і вимірюється рівень сигналу до та після його вмикання.

#### 23.20.4. Пористі скляні прилади

В основі таких приладів лежить пориста скляна пластина, просякнута реагентом Сальтцмана. Поглинання пластини залежить від концентрації атмосферного азоту. Можливе вимірювання хемілюмінесценції.

Більшість оксидів азоту надходить у атмосферу завдяки автомобільному транспорту та роботі установок для спалювання сміття. Вони дифундують у атмосферу та діють безпосередньо на людину, або як фотохімічний смог. Оксиди азоту складаються з монооксиду азоту та діоксиду азоту. Стандарти щодо контролю навколишнього середовища оцінюють діоксиди азота, тоді як стандарти з емісії газів враховують обидва оксиди.

### 23.20.5. Хемілюмінесцентний метод визначення оксидів азоту

В основі методу лежить реакція монооксиду азоту з озоном, внаслідок якої утворюється діоксид азоту у збудженому стані. Повернення діоксиду азоту із збудженого стану в основний супроводжується випромінюванням світла – *хемілюмінісценцією*. Вимірювання інтенсивності хемілюмінесценції дає можливість оцінити концентрацію монооксиду азоту.

Якщо газ проходить через конвертер, де відбувається перетворення діоксиду азоту у монооксид, концентрація оксидів азоту вимірюється через інтенсивність хемілюмінесценції, після чого концентрація діоксиду азоту оцінюється як різниця між двома оксидами.

Спектр випромінювання, який одержують завдяки реакції між монооксидом азоту та озоном, займає область 600-3000 нм. Максимум спектра припадає на 1200 нм. Для запобігання іншим хемілюмінесцентним ефектам використовують фільтр перед фотодетектором (фотоелектронним помножувачем або силіконовим фотодіодом).

Для перетворення монооксиду азоту в діоксид азоту застосовують конвертери двох типів: перший тип передбачає розкладання діоксиду азоту при температурі 600-800 °С, тоді як другий базується на використанні хімічної реакції на основі каталізатора (графіту, молібдену, вольфраму тощо), які нагріваються до 100-400 °С.

### 23.20.6. Вимірювання поглинання на основі реакції Сальцмана

Атмосферний діоксид азоту реагує з реагентом Сальцмана, що знаходиться у водному розчині (N-1 нафтилендіамін дигідрохлорид, сульфат нілова кислота, та оцтова кислота) та утворює при цьому азобарвник.

Концентрацію діоксиду азоту визначають шляхом вимірювання поглинання на довжині хвилі 545 нм. Оскільки монооксид азоту не реагує з реагентом Сальцмана, він окислюється під час пропускання його через окислювальний розчин (марганцевокислого калію), після чого вимірюється його концентрація.

### 23.20.7. Мікросистеми газового аналізу для розчинених у воді газів

В цих системах застосовують мікропотоки. Чутливість  $C_s$  таких приладів обернено пропорційна товщині  $d$  поглинаючого шару, який формується мікроканалами, та прямо пропорційна часу  $T$  поглинання [73]:

$$C_s = kTC_g/d, \quad (23.1)$$

де  $C_s$  – концентрація газу, що аналізується, у розчині;  $k$  – швидкість проникності газу через мембрану;  $T$  – час поглинання газу;  $C_g$  – концентрація газу, що аналізуються, у зразку;  $d$  – товщина шару поглинання.

Система складається з мініатюрних помпи, колектора, реактора та детектора. Для отримання суттєвого поглинання колектор містить систему шестигональних мікроканалів (як у бджолиній чарунці).

Типову конструкцію мікроколектора наведено на рис. 23.16.

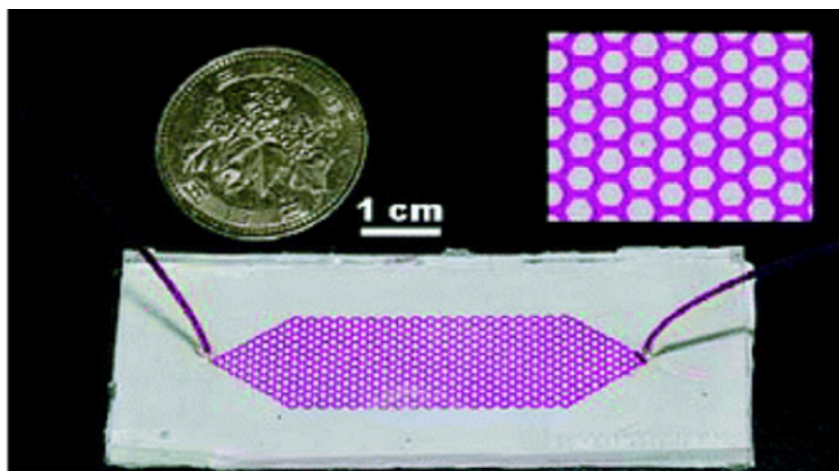


Рис. 23.16. Загальний вигляд мікроколектора, що складається з шестигональних мікро каналів [73]

Близько 500 шестигональних мікроканалів нанесені методом фотолітографії на прозору пластикову пластину ( $26 \times 76$  мм). Довжина сторони окремої чарунки становить 600 мкм, а товщина кожного каналу – 100 мкм. Таку систему було застосовано для вимірювання  $\text{H}_2\text{S}$  та  $\text{SO}_2$  на ppb-рівні.

Як поглинаючий розчин було використано флуоресцеїново-ртутний ацетат (ФРА) з 0,1 М NaOH для  $\text{H}_2\text{S}$  та  $5 \mu\text{M H}_2\text{SO}_4 + 0,006\% \text{H}_2\text{O}_2$  для  $\text{SO}_2$ . Флуоресценція ФРА, яка збуджується світловим діодом, гаситься під час  $\text{H}_2\text{S}$ , що аналізується. Отже, рівень інтенсивності флуоресценції ФРА залежить від концентрації  $\text{H}_2\text{S}$ .

Під час аналізу  $\text{SO}_2$  газ розчинюється у  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$  та окислюється до  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Концентрацію  $\text{SO}_2$  визначають шляхом вимірювання електропровідності розчину.

Схему установки для аналізу газів наведено на рис. 23.17 [74]. Газ збирається у мікроканалну пастку MCS, яка являє собою набір гексагональних мікроканалів, що покриваються пористою мембраною. Поглинаючий розчин (3% триетаноламін) ТЕА подається через пастку зі швидкістю 0,1 мл/хв за допомогою помпи МР.

Після проходження пастки розчин негайно змішується з розчином реагенту GS (Griess-Saltzman) і вводиться у реактор RC, де нагрівається до  $50^\circ\text{C}$  і набуває рожевого кольору.

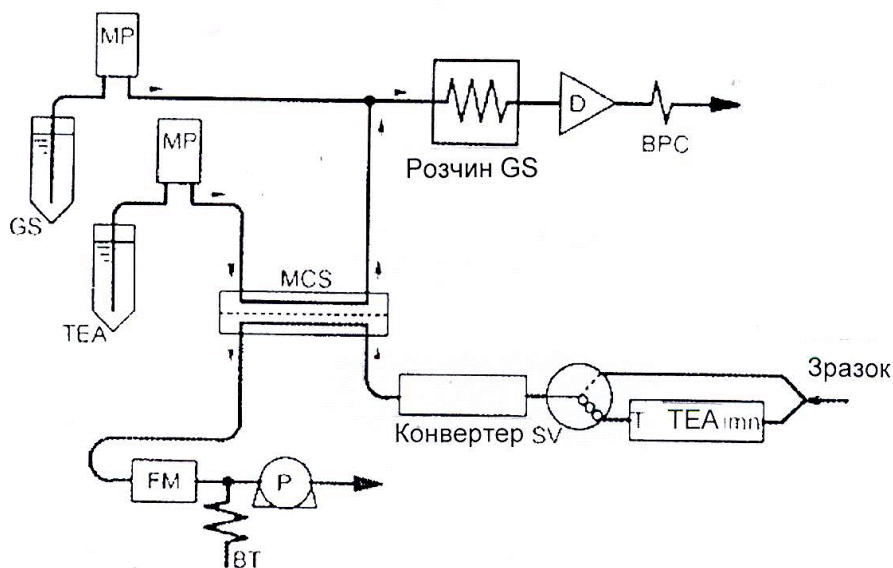


Рис. 23.17. Схема установки для аналізу газів [74]

Поглинання розчину, що пропорційне концентрації NO та NO<sub>2</sub>, вимірюється мініатюрним детектором D, конструкція якого наведено на рис. 23.18.

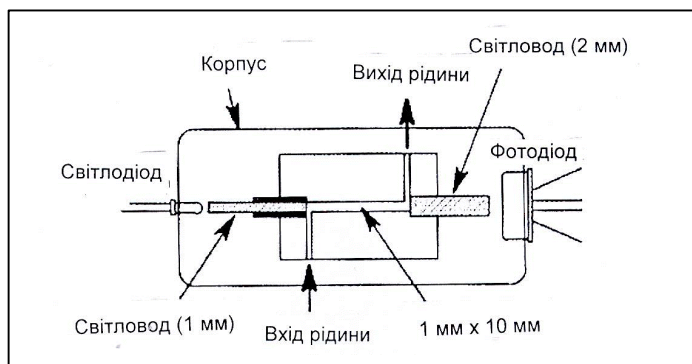


Рис. 23.18 – Мініатюрний детектор, що працює на основі поглинання газу [74]

Під час вимірювань NO використовують мікроконвертор NO в NO<sub>2</sub>, обладнаний ультрафіолетовою лампою (рис. 23.19).

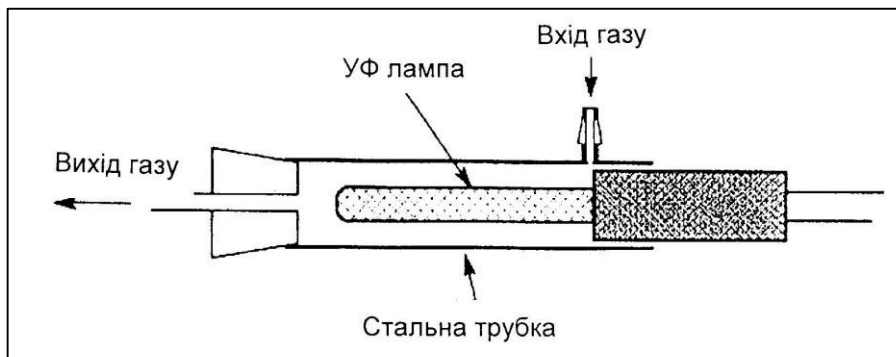


Рис. 23.19. Мініатюрний конвертор NO в NO<sub>2</sub> з використанням ультрафіолетової лампи [74]

Типову карту розподілу NO<sub>2</sub> над землею поверхнею, отриману за допомогою мікросистеми газового аналізу, наведено на рис. 23.20 [74].

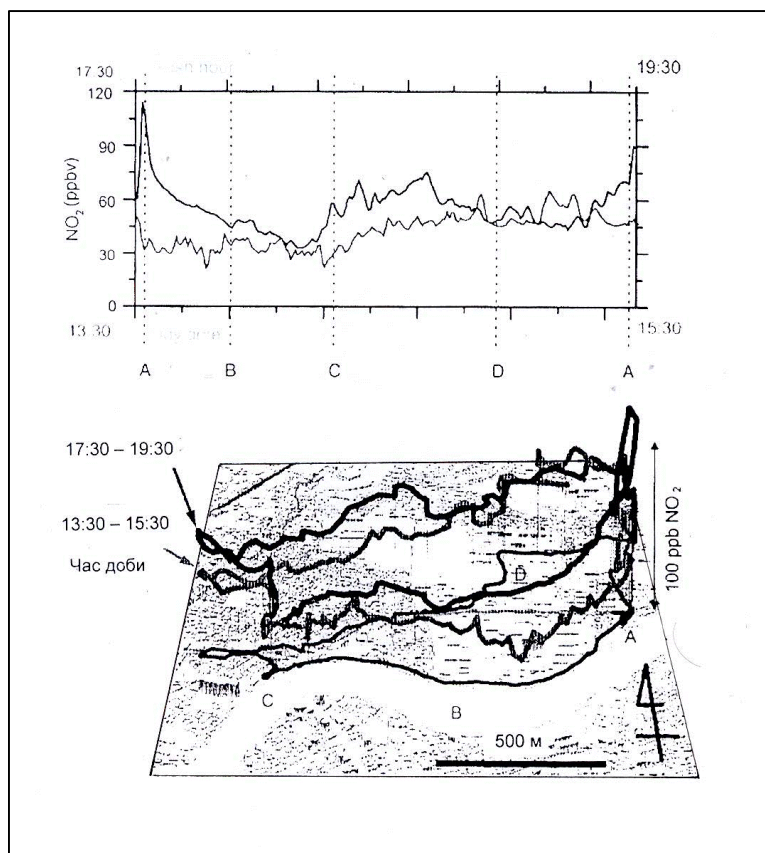


Рис. 23.20. Застосування мікросистеми газового аналізу: *a* – зміна у часі концентрації NO<sub>2</sub> над землею поверхнею; *b* – картографування розподілу NO<sub>2</sub> над землею поверхнею [74]

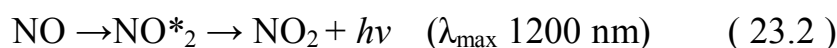
### 23.21. Мініатюрні системи газового аналізу на основі сухої хімії

Методи *сухої хімії* застосовують для органічних газів через суху предконцентрацію газів.

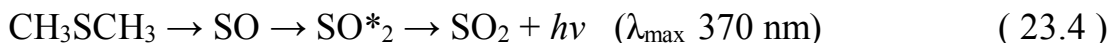
Більшість таких атмосферних забруднювачів як леткі органічні сполуки (ЛОС), леткі сірчані сполуки (ЛСС), ізопрен та ін. не розчинюються у воді, через що методи вологої хімії не можуть бути застосовані до цих сполук.

#### 23.21.1. Методи хемілюмінесценції

Принцип дії аналізу газів на основі хемілюмінесценції базується на розташуванні фотопомножувача безпосередньо поблизу реакційної камери, де утворюється озон з повітря або кисню. Реакції різних газів (NO, ізопрен, диметилсульфід ДМС) наведено нижче:







Хемілюмінесценція газів характеризується певними спектрами. Типові спектри разом зі спектральними кривими чутливості фотопомножувачів наведено на рис. 23.21 [75].

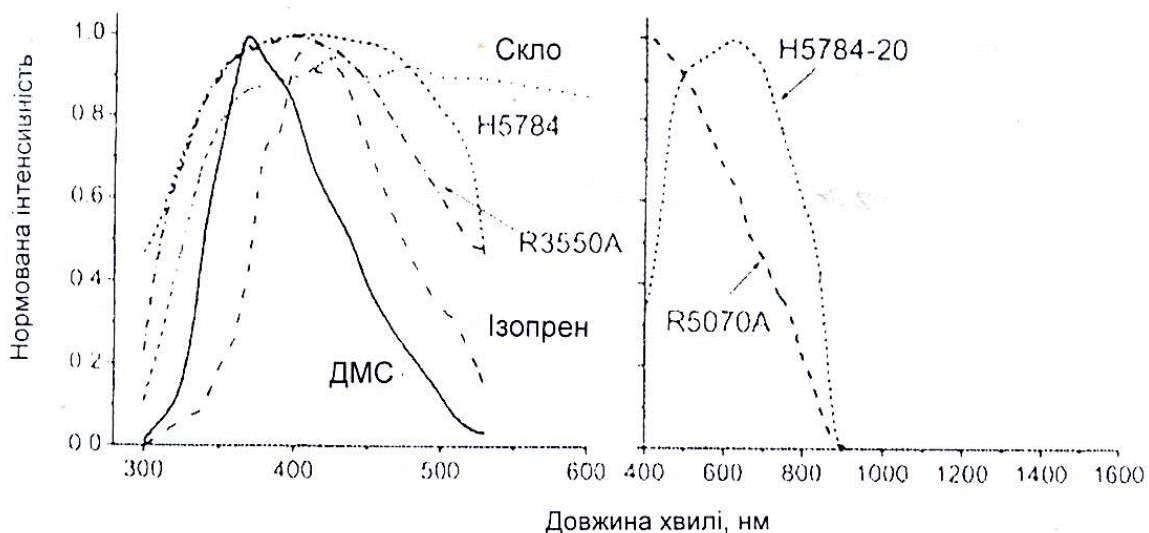


Рис. 23.21. Спектри випромінювання хемілюмінесценції диметилсульфіду (DMS), ізопрену, NO, скляного фільтру та фотоелектронних помножувачів [75]

### 23.21.2. Леткі сірчані сполуки ЛСС

Леткі сірчані сполуки ЛСС є продукти випаровування відходів, з неприємним запахом, вкрай токсичні та з корозійними властивостями. ЛСС висилаються седиментами у зоні узбережжя, перетворюються у  $\text{SO}_2$  та можуть бути ядрами конденсації хмар.

### 23.21.3. Диметилсульфід ДМС

Диметилсульфід (ДМС) – органосірчана сполука з формулою  $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ . Диметилсульфід є водонерозчинною горючою рідиною, що кипить при  $37^\circ\text{C}$  і має характерний неприємний запах. Ця речовина утворюється при приготуванні деяких овочів, таких як кукурудза, капуста і буряк, та морепродуктів. Диметилсульфід ДМС також висилається морською поверхнею та водоростями.

### 23.21.4. Метилмеркаптан $\text{CH}_3\text{SH}$

Меркаптани – органічні похідні сірководню з загальною формулою  $\text{RSH}$ , де R – вуглеводневий радикал. Меркаптани – легколеткі рідини (метилмеркаптан – газ) з сильним, неприємним запахом.

Схема тефлонової хемілюмінесцентної чарунки, призначеної для визначення диметилсульфіду та метилмеркаптану, наведено на рис. 23.22 [76].

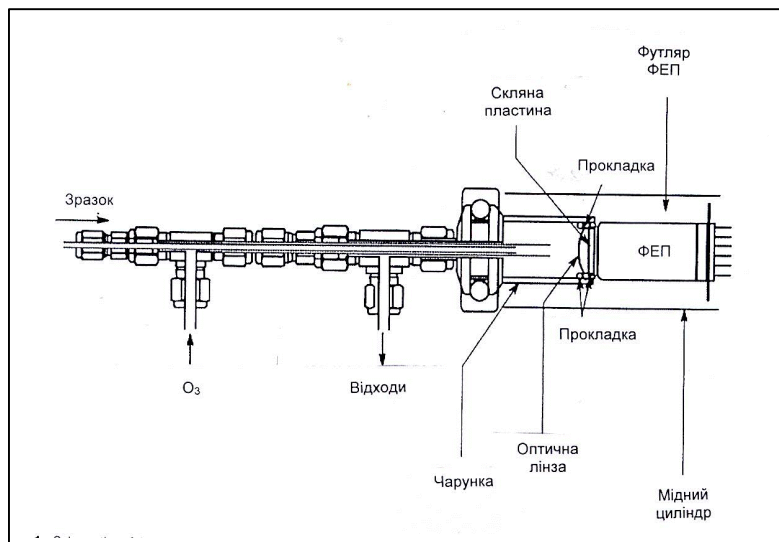


Рис. 23.22. Схема хемілюмінесцентної чарунки, призначеної для визначення диметилсульфіду та метилмеркаптану [76]

### 23.21.5. Ізопрен

Ізопрен  $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}=\text{CH}_2$  — ненасичений вуглеводень, безбарвна рідина, розчинна у етанолі. Однак, ця сполука є надзвичайно легкою через низьку температуру кипіння. Більшість атмосферного ізопрену обумовлено емісією рослинних покривів. Ізопрен утворюється та висилається в атмосферу багатьма видами дерев (дуб, тополя, евкаліпт) та овочами. Щорічне продукування ізопрену становить  $6 \cdot 10^8$  т. При високих концентраціях може бути небезпечним забруднювачем та токсикантом.

Ізопрен (2-метил-1,3-бутадиєн) є продукт життєдіяльності бактерій; він є попередником атмосферного формальдегіду під час росту рослин; Більшість атмосферного ізопрену обумовлено емісією рослинних покривів. Ізопрен складає приблизно половину вмісту природних летких органічних сполук. Концентрація ізопрену у атмосфері коливається від 0 до більш ніж 30 ppbv впродовж дня.

Крім того, ізопрен бере участь у біосинтезі холестерину і являє собою один з основних вуглеводнів у продуктах дихання. Концентрація ізопрену у продуктах дихання (12-580 ppbv) займає місце позаду лише за ацетоном (1- 1880 ppbv), етанолом (13-1000 ppbv) та метанолом (160-2000 ppbv).

Особливістю ізопрену є його здатність вступати у реакцію з озоном, яка супроводжується хемілюмінесценцією з максимумом при 410 нм (рис. 23.23) [77].



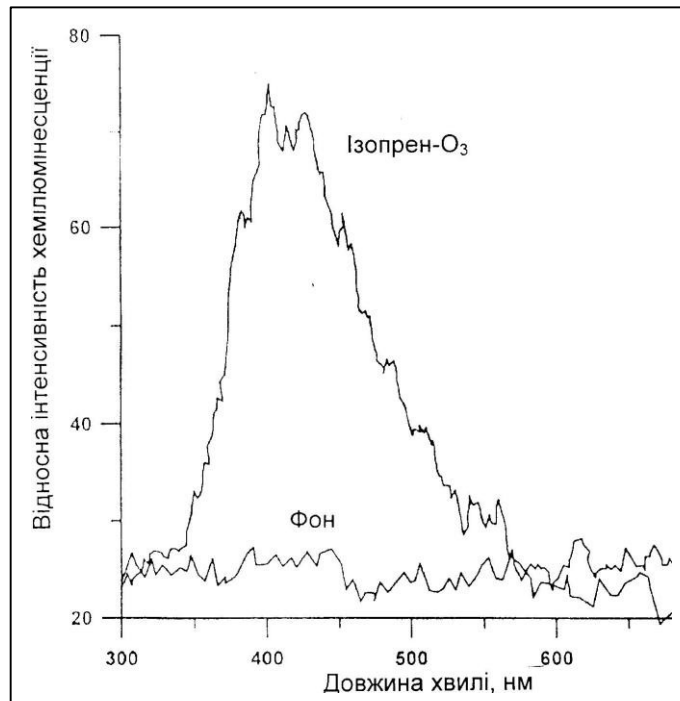


Рис. 23.23. Спектр хемілюмінесценції ізопрену з озоном [77]

### 23.21.6. Мікроекстракція твердої фази

Метод базується на використанні колонки, покритої рідким (полімер) або твердим (сорбент) екстрагентом (рис. 23.24). Кількість речовини, що екстрагується, пропорційна концентрації зразка.

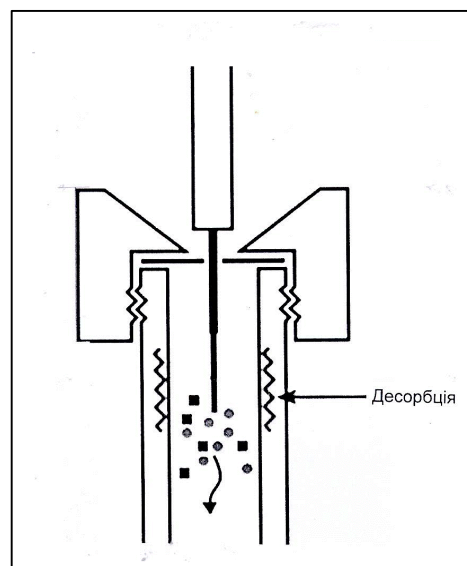


Рис. 23.24. Суть методу мікроекстракції твердої фази

Як сорбенти використовують тверді тіла або рідини, що вибірково поглинають (сорбують) з довкілля газу, пару або розчинені речовини.

Залежно від характеру сорбції розрізняють:

*абсорбенти* – тіла, що утворюють з поглинутою речовиною твердий чи рідкий розчин;

*адсорбенти* – тіла, що поглинають речовину на своїй поверхні (зазвичай, дуже розвиненій);

*хімічні поглиначі*, які зв'язують речовину, що поглинається, за рахунок хімічної взаємодії.

### 23.21.7. Метод предконцентрації

Схема установки для збирання зразків ізопрену та вимірювань його концентрації наведено на рис. 23.25 [77]. Установка містить поглинаючу колонку, систему вентилів, хемілюмінесцентну камеру, систему постачання повітря та систему генерації озону.

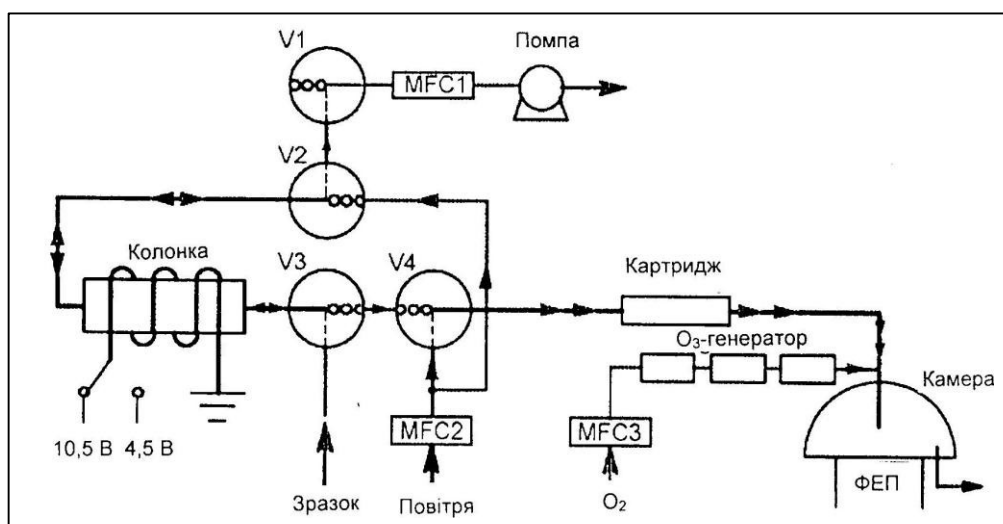


Рис. 23.25. Схема, що пояснює процес предконцентрації (пояснення в тексті) [77]

Газ, що аналізується, подається на колонку (300 мм×6,5 мм) з твердим вуглецевим сорбентом, що нагрівається до 55 °С (4,5 В). Повітряний потік подається в систему для отримання нульового сигналу.

Ізопрен, що виділився при нагріванні до 155 °С (10,5 В), надходить у камеру, де бере участь у реакції з озоном, яка супроводжується хемілюмінесценцією. Срібний картридж необхідний для вилучення сірчаних газів. Тут: MCF (mass flow controllers) – вимірювачі масового потоку.

Чутливість системи становить для: диметилсульфіду ДМС – 10 ppb; метилмеркаптану CH<sub>3</sub>SH – 10 ppb; NO – 100 ppb; ізопрену – 185 ppb.

Таким чином, мініатюрні системи аналізу газів характеризуються компактністю, високою точністю; вони можуть бути застосовані у польових та виробничих умовах для визначення забруднення навколишнього середовища, детектування нервово-паралітичних газів та вибухівки, продуктів дихання пацієнтів з метою діагностики можливих захворювань. Всі ці

прилади та методи відкривають нову еру для моніторингу довкілля та контролю здоров'я людства.

### 23.22. Автоматизовані системи спостереження за атмосферним повітрям

Автоматизований метод моніторингу якості повітря у режимі реального часу [78] передбачає аналіз концентрації атмосферних забруднюючих речовин, а саме CO (інфрачервона фотометрія), NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> (хемілюмінесценція), SO<sub>2</sub> (флуоресцентна спектроскопія), O<sub>3</sub> (ультрафіолетова фотометрія), CH<sub>4</sub>, неметанові та загальні вуглеводні ВВ (полум'яно-іонізаційне детектування), частинки PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> (аналізатор LVS3). Схему такої системи наведено на рис.23.26. Тут: 1 – вимірювач потоку калібруючих газів; 2 – анемометр; 3 – вимірювачі температури, атмосферного тиску та вологості; 4 – колектор атмосферних частинок; 5 – радіометр; 6 – дощомір; 7 – система аналізу даних; 8 – комп'ютер.

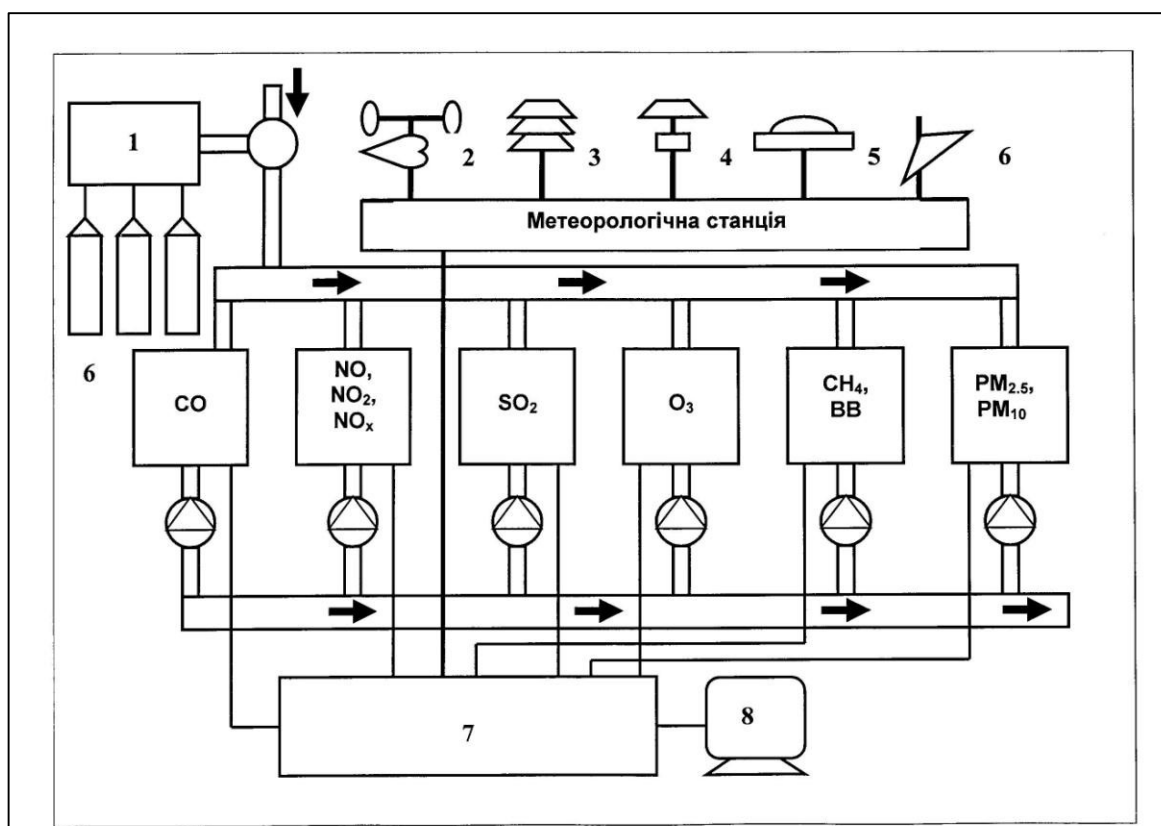


Рис. 24.26. Метод моніторингу якості повітря в режимі реального часу [78]

Серед вітчизняних автоматизованих систем моніторингу якості атмосферного повітря слід відзначити (АСКНС-АГ) або (АНКОС-АГ), призначені для контролю викидів промислових підприємств та транспорту, забруднення повітря такими забруднюючими речовинами, як оксид вуглецю CO, діоксид сірки SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO та NO<sub>x</sub>, вуглеводні (за винятком метану), озон O<sub>3</sub>, а також для вимірювання метеорологічних параметрів.

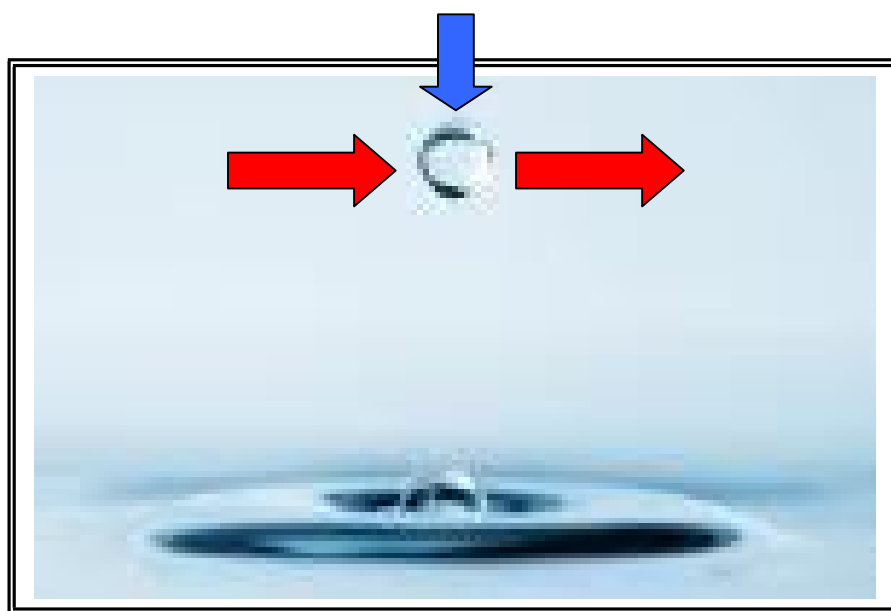
У 2005 році ЗАТ «Всеукраїнський НДІ аналітичного приладобудування» (ЗАТ «Украналіт») розробив новий автоматичний стаціонарний

пост спостереження за станом атмосферного повітря «Атмосфера-10», що являє собою інформаційно-вимірювальну систему, призначену для автоматичного безперервного спостереження (моніторингу) за станом приземної атмосфери міст і великих промислових центрів.

Основу посту «Атмосфера-10» складають сучасні автоматичні газоаналізатори для контролю таких забруднюючих речовин, як оксиди азоту ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ), діоксид сірки ( $\text{SO}_2$ ), оксид вуглецю ( $\text{CO}$ ) та вимірювання температури, відносної вологості навколишнього повітря, атмосферного тиску, швидкості і напрямку вітру.

### Контрольні запитання та завдання

1. Сформулювати поняття «якість повітря».
2. Що таке стандарт якості атмосферного повітря?
3. Охарактеризувати індекс якості повітря.
4. Пояснити метод інфрачервоного поглинання.
5. У чому полягає суть хемілюмінесцентного методу?
6. Порівняти атмосферний (10–50 км) та приземний озон.
7. У чому полягає пасивний моніторинг озону?
8. Пояснити метод ультрафіолетової фотометрії.
9. Пояснити принцип дії інерційної багатокамерної системи; гравітаційної камери осідання; циклонний колектор.
10. Як працює змочувальна камера? електростатичний уловлювач?
11. Пояснити принцип дії дихотомної системи.
12. У чому полягає суть флуоресцентного методу визначення  $\text{SO}_2$ ?
13. Пояснити принцип диференційної оптичної спектроскопії поглинання.
14. У чому полягає метод спектроскопії Фур'є перетворення?
15. Назвати основні мініатюрні системи газового аналізу.



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

### ЧАСТИНКИ

#### Приклад

Визначити швидкість седиментації частинки мулу густиною  $2650 \text{ кг/м}^3$  та діаметром  $0,03 \text{ мм}$ , яка осідає у воді при  $20^\circ\text{C}$ . В'язкість води при цій температурі становить  $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

#### Розв'язання

Підставляємо числові дані у рівняння, що описує швидкість седиментації частинки:

$$\begin{aligned} v_{\text{сед}} &= \frac{2}{9} g(\rho - \rho_0) r^2 / \eta = \\ &= \frac{2}{9} (9,8 \text{ м/с}^2)(2650 - 998,2)(15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2) / (1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}) = 8,1 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}. \end{aligned}$$

#### Контрольні завдання

*Варіант 1.* Визначити швидкість седиментації частинки глини густиною  $2650 \text{ кг/м}^3$  та діаметром  $2 \text{ мкм}$ , яка осідає у воді при  $20^\circ\text{C}$ . В'язкість води при цій температурі становить  $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

*Варіант 2.* Потік води рухається через ґрунтову пору діаметром  $D = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  зі швидкістю  $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ . Визначити число Рейнольдса, якщо температура ґрунту становить  $20^\circ\text{C}$ .

*Варіант 3.* Визначити швидкість седиментації сферичної частинки густиною  $2650 \text{ кг/м}^3$  та діаметром  $0,1 \text{ мм}$ , яка осідає у воді при  $20^\circ\text{C}$ . В'язкість води при цій температурі становить  $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Чи встигне частинка досягнути дна танка за 2 год, якщо глибина танка  $3,5 \text{ м}$ ?

*Варіант 4.* Визначити швидкість седиментації сферичної частинки густиною  $2650 \text{ кг/м}^3$  та діаметром  $0,001 \text{ мм}$ , яка осідає у воді при  $20^\circ\text{C}$ . В'язкість води при цій температурі становить  $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Чи встигне частинка досягнути дна танка за 2 год, якщо глибина танка  $3,5 \text{ м}$ ?

*Варіант 5.* Визначити час падіння пилинки у кімнаті заввишки  $3 \text{ м}$ , якщо в'язкість повітря становить  $175 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , діаметр пилинки  $5 \text{ мкм}$ , а густина пилинки  $2500 \text{ кг/м}^3$ .

*Варіант 6.* Оцінити відстань, на яку переміщується частинка густиною  $1600 \text{ кг/м}^3$  з вершини гори висотою  $3000 \text{ м}$ , яка піднялася на висоту  $10000 \text{ м}$ , якщо розміри частинки  $70 \text{ мкм}$ , а швидкість руху  $15 \text{ м/с}$ . Температура повітря  $20^\circ\text{C}$ .

## 24. МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ПРИМІЩЕНЬ

### 24.1. Леткі органічні сполуки та їх характеристики

Якість повітря приміщень означає вміст та природу внутрішнього повітря, яке впливає на здоров'я та комфорт мешканців будівель.

За даними досліджень, проведених у США та Європі, населення індустріалізованих країн проводить понад 90% свого часу у приміщеннях, з них майже 50% – на роботі, де якість повітря часто гірша, ніж ззовні. Приблизно 50% цього часу людина проводить в умовах роботи [79].

Повітря приміщень часто забруднюється різними токсикантами, концентрація яких може бути дуже високою через малий простір. Внутрішнє повітря у містах може бути у 100 разів бруднішим, ніж зовнішнє. Згідно з даними Світової організації здоров'я (The World Health Organization) щорічне забруднення повітря приміщень є причиною смерті 1,6 мільйонів людей та 2,7 % хронічних захворювань [80]. Питання якості внутрішнього повітря обговорювалися упродовж Саміту у Копенгагені. Експерти стверджують, що близько 2 млн осіб помирають щороку через погану якість повітря приміщень [81].

До основних забруднюючих речовин внутрішнього повітря можна віднести:

- неорганічні забруднюючі речовини (діоксид вуглецю, оксид вуглецю, діоксид азоту, діоксид сірки, озон);
- органічні забруднюючі речовини (леткі органічні сполуки, формальдегід, пестициди, вуглеводні, аліфатичні та аліциклічні вуглеводні, кетони, спирти, глікольєфіри, ефіри, феноли, хлоровані вуглеводні, терпени, альдегіди, ацетати);
- фізичні забруднення (частинки, азбест, мінеральні нитки, радон);
- тютюновий дим у доквіллі, продукти згоряння, біологічні аерозолі, радіоактивні забруднювачі.

Серед основних небезпечних забруднюючих речовин внутрішнього повітря слід зазначити леткі органічні сполуки (ЛОС) [82,83].

Метою цього розділу є вивчення джерел летких органічних сполук у повітрі приміщень, їх концентрації, залежності від зовнішніх факторів, впливу на здоров'я людини та токсичності, а також запобігання шкідливої дії на людський організм.

Леткі органічні сполуки при нормальних температурі та тиску через малу точку кипіння легко випаровуються в атмосферу.

ЛОС класифікуються так [84-86]:

*Дуже леткі (газові) органічні сполуки* які мають температуру кипіння від  $< 0^{\circ}\text{C}$  до  $50\text{-}100^{\circ}\text{C}$ ;

*Леткі органічні сполуки* – від  $50\text{-}100^{\circ}\text{C}$  до  $240\text{-}260^{\circ}\text{C}$ ;

*Напівлеткі органічні сполуки* – від  $240\text{-}260^{\circ}\text{C}$  до  $380\text{-}400^{\circ}\text{C}$ .

Розвиток передових технологій у сучасному індустріалізованому суспільстві супроводжується значним збільшенням кількісної різноманітності супроводжується швидким зростанням переліку ЛОС, що потрапляють у повітря приміщень з різних джерел. Це ароматичні гідро вуглецеві,

аліфатичні та аlicиклічні гідровуглеці, кетони, спирти, глікольєфіри, ефіри, феноли, хлоровані гідровуглеці, терпени, альдегіди, ацетати. Детальний список типів, концентрацій та поширення ЛОС у повітрі приміщень наведено у монографії «Indoor Air Quality» (1995) [87].

До основних джерел ЛОС належать побутові матеріали, зокрема меблі (дерев'яні поверхні, оброблені лаками, фарбами, політурою тощо); покриття підлог, серед яких паркет, синтетичні покриття, лінолеуми та різноманітні компоненти цих матеріалів, такі як барвники, добавки, розчинники, пластифікатори; килими, порт'єри, покривала, що містять синтетичні нитки, компоненти латексу та клею; книжки, газети, журнали; побутова техніка, зокрема копіювальні машини, тонери, принтери, нагрівачі, вентилятори, кондиціонери; побутова хімія та матеріали, які включають мийні речовини, воски, освіжувачі повітря, шпалери, пластикові покриття, матеріали для клеєння; нові та відновлені будинки; вихлопні гази автомобілів, транспортні речовини, що містять бензин, мастила, автомобільні рідини, компоненти внутрішнього оздоблення нових автомобілів (шкіряні покриття та тканини); тютюновий дим, біологічні частинки, такі як віруси, бактерії, гриби, пилок, послід птахів, комахи, гризуни, екскременти тварин, декоративні рослини. Килими розглядаються не лише як потенціальні джерела ЛОС, оскільки можуть виконувати також функції адсорбційної пастки, що здійснює ре-емісію ЛОС упродовж тривалого часу [84-86].

Загальна кількість летких органічних речовин (ЗЛОС) визначає реакцію людського організму:

- концентрація ЗЛОС  $< 0,20 \text{ мг/м}^3$  комфортна для людини;
- у межах  $0,20\text{-}3,00 \text{ мг/м}^3$  – з'являється подразнення;
- $3,00\text{-}25,00 \text{ мг/м}^3$  – надзвичайно дискомфортна;
- $> 25,00 \text{ мг/м}^3$  спричиняє отруєння [88].

Типові значення концентрацій ЛОС у будинках залежать від віку будинку, рівня його оновлення, внутрішнього клімату, оздоблення, режиму вентиляції, швидкості руху повітря, температури, відносної вологості, розташування поблизу доріг, пори року.

#### **24.2. Вплив на здоров'я та токсичність летких органічних сполук**

Відомо, що промислові викиди ЛОС від десяти до сотень разів перевищують ті, що притаманні житловим будинкам та офісам; втім, концентрація ЛОС у просторі приміщень у 2-100 разів може перевищувати концентрацію ЛОС у зовнішньому просторі.

Найпоширенішим впливом ЛОС у повітрі приміщень слід вважати подразнення органів зору, носоглотки, горла, головний біль, запаморочення, нудоту.

Деякі з ЛОС, такі як бензол, стирол, тетрахлоретилен, 1,1,1-трихлоретан, трихлоретилен, дихлоробензол, мителенхлорид та хлороформ можуть спричинити мутагенні або канцерогенні ефекти.

ЛОС відіграють суттєву роль у провокуванні астми та пов'язаних з їх вмістом у повітрі будинків захворювань. Для визначення того, чи спричи-

нюють суміші ЛОС порушення функцій легенів або їх запалення через повітряні шляхи у пацієнтів без бронхіальної гіперчутливості, автори провели серію експериментів, у яких концентрацію ЛОС контролювали за допомогою повітряних фільтрів.

Дія ЛОС пов'язана з подразненням органів зору та респіраторного тракту, пригніченням центральної нервової системи. Деякі з них є канцерогенами для людей та тварин, впливають на серце, нирки та легені, погіршують пам'ять, спричиняють риніти, носові кровотечі (особливо формальдегід), фарингіт, кашель, хрипливість, погіршення стану, астму, кон'юнктивіти, головний біль або запаморочення, летаргію, втомленість, нездужання, анорексію, індивідуальні зміни, висип, міалгію (гіперчутливий пневмоніт, водну гарячку), втрату слуху, алергічні реакції шкіри.

До 60 млн людей, що працюють у приміщеннях, страждають на подразнення очей, носа та горла, головний біль та втомлюваність. Основною причиною цього є будівельні матеріали, миючі засоби та ін. Крім того, нові сполуки (гліюксал, метилгліюксал, гліюкоальдегід, діацетил) виникають як продукти реакцій ЛОС з  $\text{OH}^-$  чи  $\text{NO}_3^-$  радикалами або  $\text{O}_3$  у приміщенні. Експериментальна або комп'ютерна ідентифікація цих сполук як сенсibilізаторів допоможе пояснити вплив їх на здоров'я.

### **24.3. «Синдром Хворого Будинку»**

Вплив багатьох ЛОС, що легко поглинаються нашим тілом, ще недостатньо вивчений. Відомо, що погана якість повітря приміщень призводить до «багаторазової хімічної чутливості», «синдрому нового будинку», «синдрому хворого будинку» (комбінації захворювань, пов'язаних з індивідуальним місцем на роботі чи вдома), алергію, втомлюваність, головний біль, неспокій, що погіршують «якість життя» [89]. Незважаючи на відносно низьку концентрацію, ЛОС може провокувати симптоми «хворого будинку» через подразнення сенсорних систем та шкіри, нейротоксичні ефекти, неспецифічні гіперчутливі реакції, зміни в сприйманні запаху та смаку.

### **24.4. Оцінювання дії ЛОС**

Для розуміння впливу хронічної дії низько інтенсивних рівнів ЛОС необхідна розробка аналітичних методів для кількісного оцінювання полярних органічних сполук за низькими концентраціями. Потрібні критерії для вивчення емісії ЛОС у внутрішнє повітря, достатності вентиляції, сукупних чи синергічних ефектів, що утворюються сумішами ЛОС, токсичності продуктів розкладання мікроорганізмів, застосування об'єктивних тестів для дослідження дії забруднюючих речовин повітря приміщень на здоров'я мешканців, покращення індексів їх якості.

Варто відмітити цікавий підхід щодо оцінювання зв'язку між факторами, що впливають на якість повітря у приміщеннях нових будинків, та синдромом хворого будинку, запропонований японськими вченими [90-92].



Було досліджено симптоми 343 мешканців у 104 котеджах Хоккайдо (Японія); 429 осель у м. Саппоро та 135 – поблизу міста; анкетне опитування було розповсюджене серед мешканців 1240 будинків, що були побудовані упродовж останніх 7 років.

Оцінювання симптомів хворого будинку провели за допомогою стандартизованих анкетних опитувань, які проводились серед мешканці будинків у Японії. Серед типових запитань слід відзначити вік мешканців, стать, ставлення до куріння, схильність до алергічних захворювань, наявність тварин у приміщеннях, період проживання у будинку, розміри домашнього господарства, рід занять (повний чи неповний робочий день, пенсіонер чи безробітний). Серед основних запитань, пов'язаних з будинками, були: структура будинку (дерев'яний, бетонний чи залізо-бетонний), вік будинку, оновлення чи ремонт упродовж останніх двох років, наявність покриття підлоги, тип оформлення стін, наявність вогкості, присутність курців, використання ароматизаторів та репелентів.

Анкетні опитування склали інформацію щодо медичної історії мешканців (наявність астми чи алергії), загальні симптоми (втомлюваність, відчуття важкої голови чи головний біль, нудота, запаморочення), скарги на зір (свербіння чи подразнення очей) та носоглотку (подразнення, нежить), проблеми з горлом та дихальною системою (хрипіння, сухість, кашель) або шкірою.

#### **24.5. Запобігання впливу ЛОС на здоров'я мешканців у приміщеннях**

Покращити якість повітря приміщень та запобігти небезпечному впливу ЛОС можна шляхом ретельного контролю якості повітря, застосування вентиляційних систем. Щоб запобігти забрудненню повітря, необхідно контролювати джерела забруднень. Для побудови «здорових» будинків, комфортних для проживання людей, необхідно використовувати нешкідливі будівельні матеріали.

Дослідження емісії ЛОС з принтерної та копіювальної техніки показало, що високі концентрації ЛОС супроводжують процеси друку та копіювання з використанням паперу, одержаного в результаті рециркуляції. Доведено, що вибір певного типу принтерної техніки може забезпечити зменшення рівня ЛОС у 25 разів. Вважається недоцільним розташувати лазерні принтери з традиційним коронним розрядом поблизу робочих місць. У добре вентильованих приміщеннях офісів концентрації ЛОС у повітрі знаходяться у межах рекомендованих рівнів. Застосування вентиляції повітря та адсорбуючих матеріалів у системах очищення повітря сприяє ефективному зменшенню рівня формальдегіду та ЛОС у повітрі.

Фотокаталітичне окиснення ЛОС є надзвичайно привабливою альтернативною технологією щодо очищення та дезодорування повітря. Доведено, що застосування звичайних флуоресцентних ламп може сприяти ефективному вилученню низьких концентрацій ЛОС з мало забрудненого повітря.

Однією з багатообіцяючих технологій очищення повітря приміщень, яка застосовується впродовж останніх років, є фіторемедіація (див. розділ VII).



## 25. МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА АНАЛІЗУ ЛОС

Всі методи аналізу ЛОС складаються з таких принципових етапів:

- 1) відбирання зразків (захоплення зразків з повітря та їх збирання);
- 2) предконцентрація зразків та їх збагачування;
- 3) віддалення ЛОС з повітряного зразка до аналітичного приладу;
- 4) детектування та ідентифікація ЛОС

### 25.1. Відбирання зразків та предконцентрація

Існує два методи відбору зразків – *активний відбір зразків*, який базується на застосуванні активного пропускання повітря, що аналізується, через сорбент, та *пасивний відбір зразків*, що реалізує процес дифузії зразка завдяки концентраційному градієнту.

До активного вибору зразків слід віднести *термодесорбцію* – застосування нагрівання для збільшення леткості сполук, що аналізуються, та перенесення їх з сорбенту у аналітичний прилад.

Є три основних типи твердих сорбентів: *неорганічні сорбенти* (наприклад, силікагель); *пористі матеріали* на основі вуглецю; *органічні полімери*.

Найкращими з точки зору захоплення ЛОС є такі тверді сорбенти (рис. 25.1) як пористі матеріали на основі вуглецю (активоване деревне вугілля, вуглецеві молекулярні сита, графітована сажа) та органічні полімери (на основі стиrolу або феніл-фенілену).

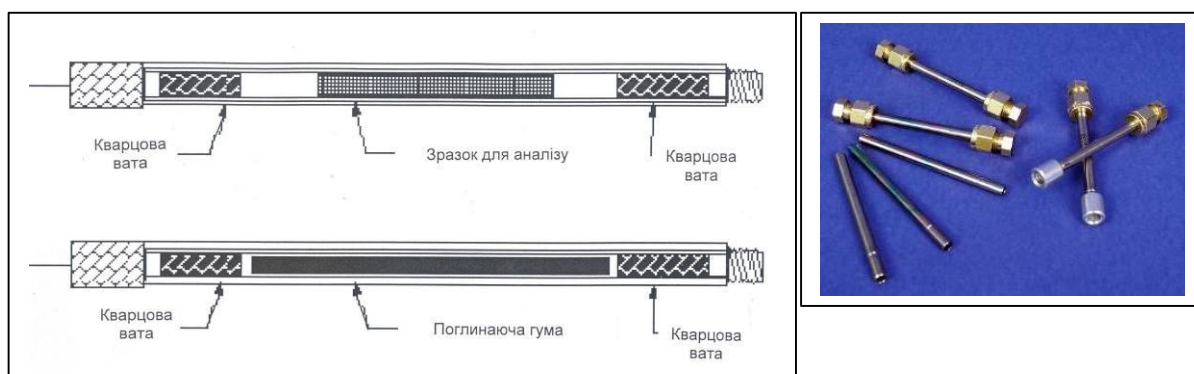


Рис. 25.1. Конструкція та загальний вигляд трубок з твердим сорбентом

До пасивного вибору зразків можна віднести *екстрагування розчинника* – спосіб розділення суміші речовин на складові частини за допомогою розчинника, у якому вони розчиняються неоднаково.

Екстрагування розчинника базується на відносно різній розчинності суміші у двох різних рідинах, що не змішуються, зазвичай води та органічного розчинника.

Розглянемо як приклад збирання зразків ЛОС, які виділяються рослинами [93]. Зразки рослин розміщували у пластикових контейнерах (497 мл), обладнаних кришками з циліндричними трубками (рис.25.2).



Рис. 25.2. Зразки рослин у пластикових контейнерах

За допомогою помпи (Model 224-44XR) створювали потік повітря (20 мл/хв.), який містить газову атмосферу, що оточує рослину.

Вхідне повітря пропускали через фільтр (1 см×5 см) з деревним вугіллям, який перед цим очищували та активували продуванням очищеного азоту (температура 200 °C, тривалість 24 години).

Леткі органічні сполуки збиралися упродовж 4 годин за допомогою сорбційних пасток (Tenax-ТА, 60/80, Alltech).

Після цього десорбційну трубку розміщували на вході інжектора та газової колонки газового хроматографа. Температурний режим передбачає зміну температури від 35 °C до 240 °C. Після десорбції запускають інертний газ як рухому фазу на вхід інжектора.

## 25.2. Газова хроматографія (ГХ)

Метод розділення, знаходження і визначення речовин, оснований на неоднаковості їх поведінки у системі із двох фаз, які не змішуються (*рухомій* і *нерухомій*), називається *хроматографією*. Рухомою фазою може бути рідина (розчин суміші речовин, що аналізуються) або газ (суміш газів), нерухомою – тверда речовина або рідина, адсорбована на твердій ре-

човині, що називають *носієм*.

Під час руху рухомої фази вздовж нерухомої кожна компонента суміші осідає (сорбується) на нерухомій фазі (сорбенті) відповідно до матеріалу сорбенту, затримується і сповільнює свій рух. Через те, що різні компоненти мають різну спорідненість, відбувається просторове розділення цих компонентів – одні компоненти затримуються на початку шляху, інші просуваються уперед тощо.

Газова хроматографія передбачає використання інертного газу як рухомої фази та діатоміту (гідратованого селікагелю) як носія; останній розміщують у спіральних або капілярних колонках. Довжина спіральних колонок досягає 50 м при діаметрі 50 мкм.

Механізми осідання компонентів суміші на нерухомій фазі можуть бути різними (рис. 26.3): розчинена речовина адсорбується (поглинається) поверхнею нерухомої фази; розчинена речовина розчинюється у рідкій фазі, що покриває поверхню твердої речовини; рухомі аніони утримуються катіонами, що ковалентно з'єднані з нерухомою фазою; відділення дрібних молекул, які проникають через пори частинок речовини, від великих; спорідненість одних молекул суміші другим молекулам, що ковалентно зв'язані з нерухомою фазою.

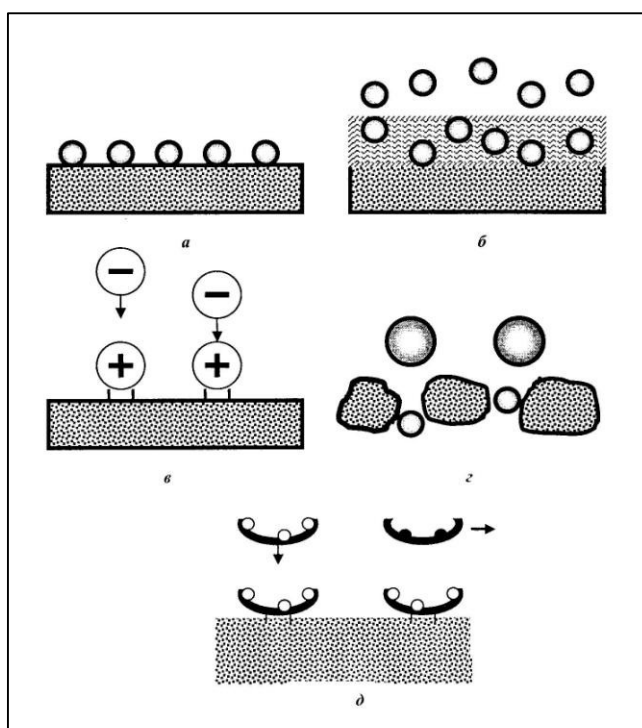


Рис.25.3. Механізми осідання компонентів суміші на нерухомій фазі: *a* - розчинена речовина адсорбується (поглинається) поверхнею нерухомої фази; *б* - розчинена речовина розчиняється в рідкій фазі, що покриває поверхню твердої речовини; *в* - рухомі аніони утримуються катіонами, що ковалентно з'єднані з нерухомою фазою; *г* - відділення дрібних молекул, які проникають через пори частинок речовини, від великих; *д* - спорідненість одних молекул суміші іншим молекулам, що ковалентно зв'язані з нерухомою фазою

Принцип дії газового хроматографа пояснюється на рис.25.4.

Нехай різні молекули, що аналізуються, будуть представлені різними фруктами та ягодами. Тобто, всі молекули мають різні форми, розміри та кількість окремих елементів (атомів). Відповідно, швидкість руху таких молекул буде різною. Якщо всі ці молекули стартуватимуть одночасно, та на фініші детектор буде реєструвати кожену молекулу окремо, у свій влас-



ний момент часу. При цьому детектор видає сигнал реєстрації (максимум хроматограми).

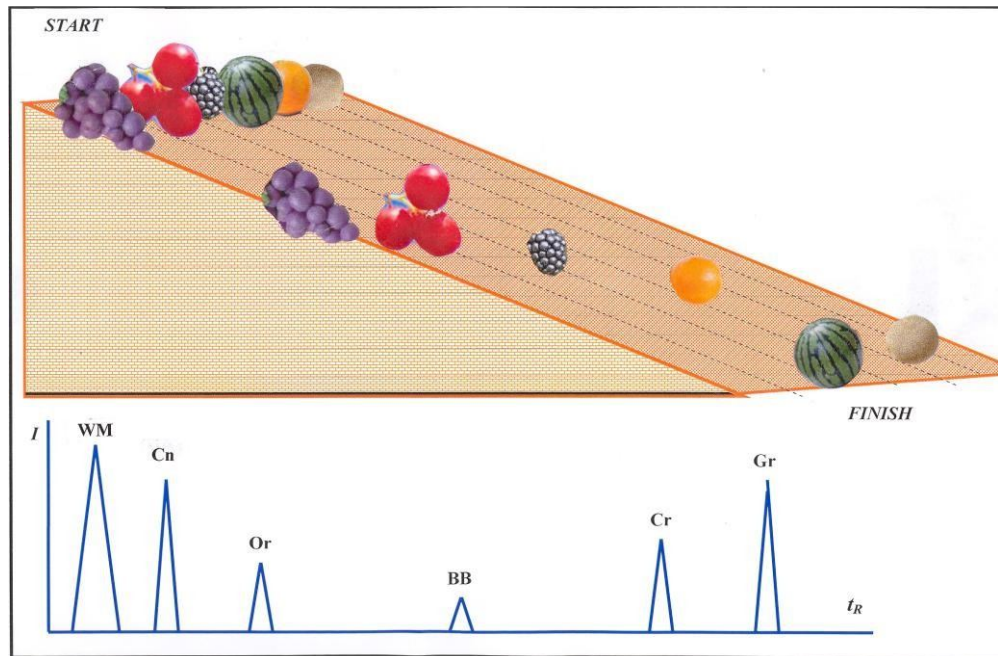


Рис. 25.4. Принцип дії газового хроматографа. По осі ординат – амплітуда сигналу, що реєструється детектором; по осі абсцис – час реєстрації [94]

Будову газового хроматографа, основними елементами якого є балон з газом-носієм, інжектор, через який запускають газ, що аналізується, капілярна колонка та детектор. наведено на рис.25.5.

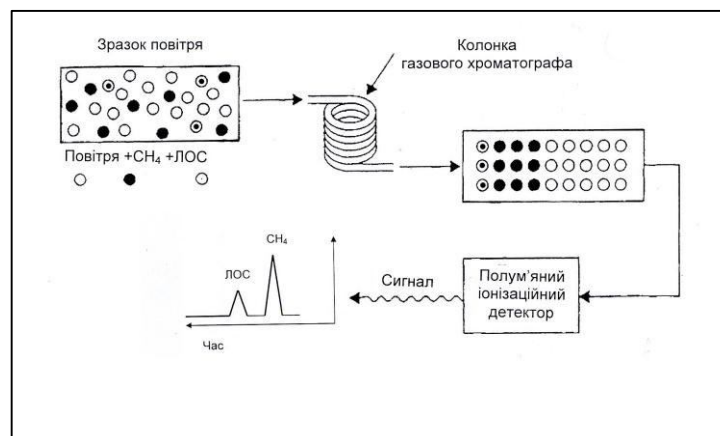


Рис. 25.5. Будова газового хроматографа

### 25.3. Мас-спектрометрія (МС)

Техніка розділення іонізованих молекул і атомів відповідно їх масам, яка базується на дії магнітних і електричних полів на пучки іонів у вакуумі, називається мас-спектрометрією. Мас-спектрометр складається з системи підготовки речовини, у якій вона перетворюється на газ; пристрою

для іонізації молекул газу; засобу виділення іонів певного знаку з плазми та їх прискорення у даному напрямку; дисперсійного елемента, здатного розділити у просторі або у часі іони певного відношення  $m/q$ ; детектора, який здатний кількісно оцінювати іони даного масового числа (сумарної кількості нейтронів і протонів), які проходять крізь вхідну апертуру; вакуумної установки; системи обробки, аналізу і реєстрації інформації.

Принцип дії мас-спектрометра пояснюється на рис.25.6.

Відомо, що якщо частинка з зарядом  $q$  проходить крізь однорідне поле, то на неї діє сила Лоренца, під впливом якої частинка буде рухатися по криволінійній траєкторії. Баланс сил описується рівнянням:

$$mv^2/r = qvB, \quad (25.1)$$

де  $m$  – маса частинки;  $q$  – її заряд;  $v$  – швидкість руху частинки;  $r$  – радіус кривизни траєкторії;  $B$  – магнітна індукція.

Іони, які проходять послідовно крізь системи магнітного і електричного відхилення, розділяються у просторі відповідно величинам відношення  $m/q$ .

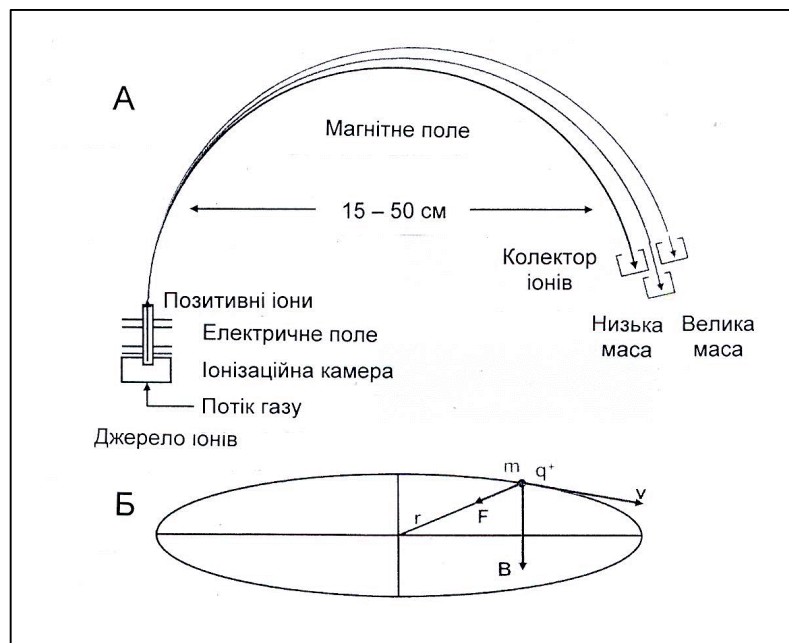


Рис. 25.6. Принцип дії мас-спектрометра (пояснення в тексті)

#### 25.4. Комбінація методів хроматографії та мас-спектрометрії (ГХ/МС)

Поєднання газової хроматографії та мас-спектрометрії дозволяє поєднати хроматографічне розділення компонентів суміші з мас-спектрометричною ідентифікацією окремих компонентів (рис. 25.7).

Поєднання газової хроматографії з мас-спектрометрією дає можливість реалізувати інжекцію газової суміші, що аналізується, у колонку газового хроматографа, де компоненти розділяються внаслідок взаємодії з колонкою. Розділені компоненти подаються на вхід мас-спектрометра, який реєструє мас-спектр кожного компонента.

Таким чином, інформація, яку надає система ГХ/МС, багатша. Для аналізу компонентів, що аналізуються, у пам'яті комп'ютера є електронна бібліотека, що містить дані щодо кількох тисяч можливих компонентів.

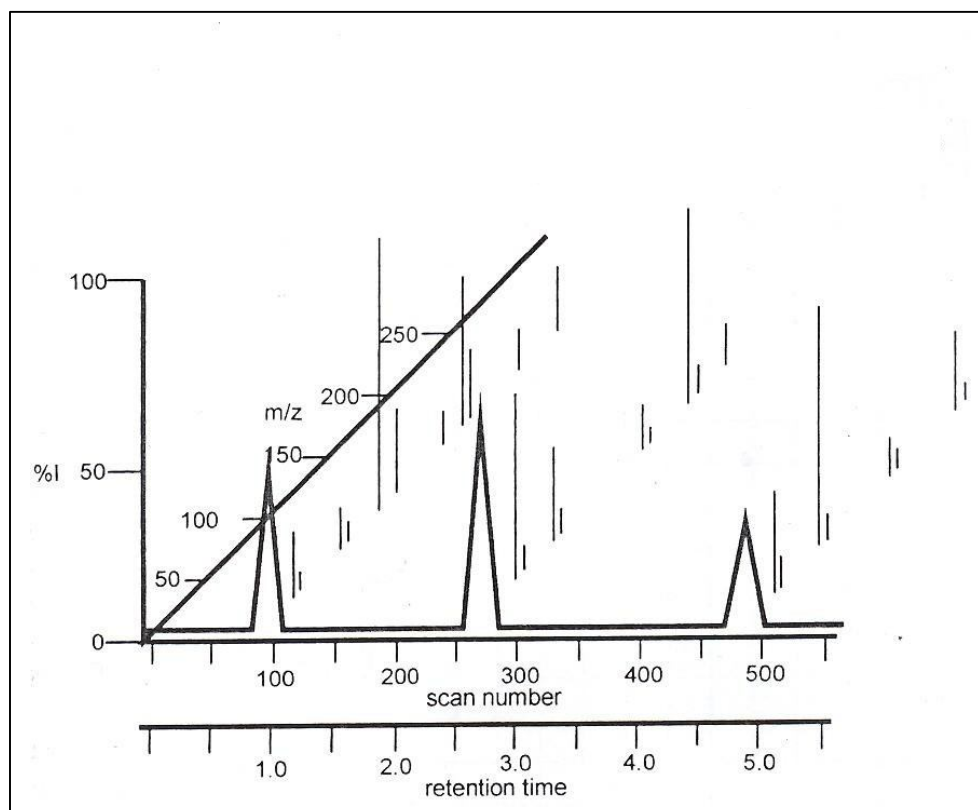


Рис. 25.7. Хроматографічне розділення компонентів суміші з мас-спектрометричною ідентифікацією окремих компонентів під час застосування ГХ/МС методу [96]

### 25.5. Детектори у системах ГХ, МС та ГХ/МС

Найбільш поширені детектори ГХ, МС та ГХ-МС систем є полум'яно-іонізаційні та термокондуктометричні детектори.

Принцип дії *полум'яно-іонізаційного детектора* пояснюється на рис. 25.8.

Газ (А) з колонки хроматографа надійде у ділянку (В), де утворюється висока температура для того, щоб суміш знаходилася у газоподібному стані.

Після змішування з воднем (С) газ подають у форсунку детектора (Е), горіння якої підтримується за рахунок постачання кисню (D).



Полум'я (F) іонізує газ, що знаходиться у просторі між електродами (G,H). Іонізовані частинки зменшують опір та суттєво підвищують струм, який вимірюється дуже чутливим амперметром.

Продукти згоряння проходять через отвір (J).

*Термокондуктометричний детектор* (катарометр) являє собою електричний міст, плечі якого містять дві комірки для вимірювання теплопровідності (рис. 25.9). Через одну протікає газ-носії, через другу – газова суміш.

Теплопровідність останньої відрізняється від теплопровідності газу-носія (теплопровідність більшості газів менша, ніж у гелію), тому під час проходження суміші через чутливий елемент детектора (нагріту спіраль з платини чи вольфраму, опір якої становить 10-80 Ом) змінюється температура та опір спіралі залежно від концентрації компонента.

Чутливість такого детектора варіює у границях  $10^{-6} - 10^{-7}$  г/мл.

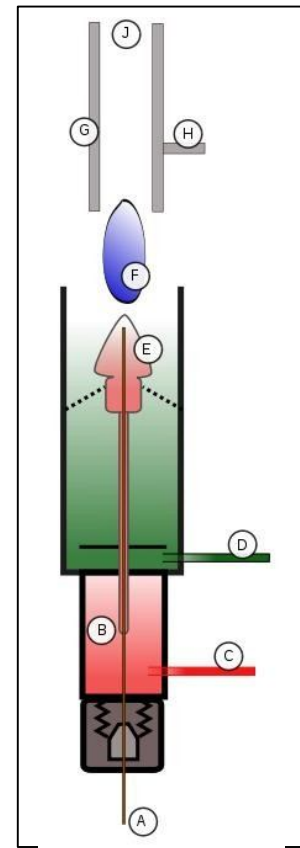


Рис. 25.8. Будова полум'яно-іонізаційного детектора

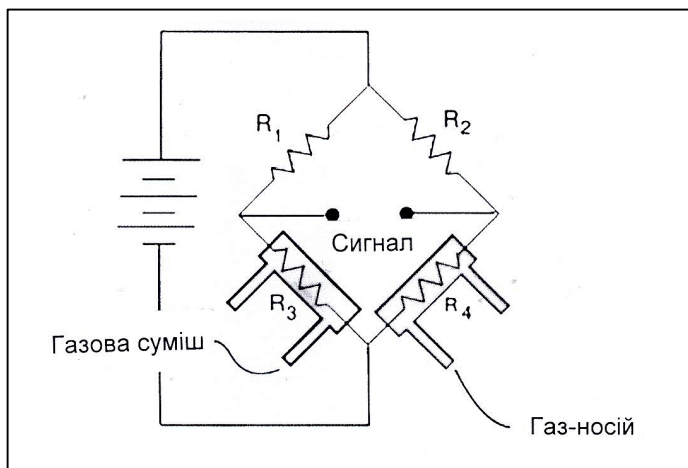


Рис. 25.9. Термокондуктометричний детектор

## 25.6. Метод оптико-акустичної спектроскопії (ОАС)

Цей метод базується на перетворенні поглинутого випромінювання у звукові коливання. Процедура вимірювань полягає у модуляції оптично-

го (лазерного) випромінювання, яке подається на зразок, розміщений у камері з прозорим вікном. Модульоване випромінювання частково поглинається зразком, а частково витрачається на тепло, яке розсіюється в оточуючий простір. Причому, теплове випромінювання змінюється з частотою модуляції. Якщо в камері знаходиться газ, тиск газу буде також змінюватися з тією ж самою частотою, тобто утворювати акустичні коливання. Зміни тиску можна зареєструвати за допомогою мікрофона (рис. 25.10).

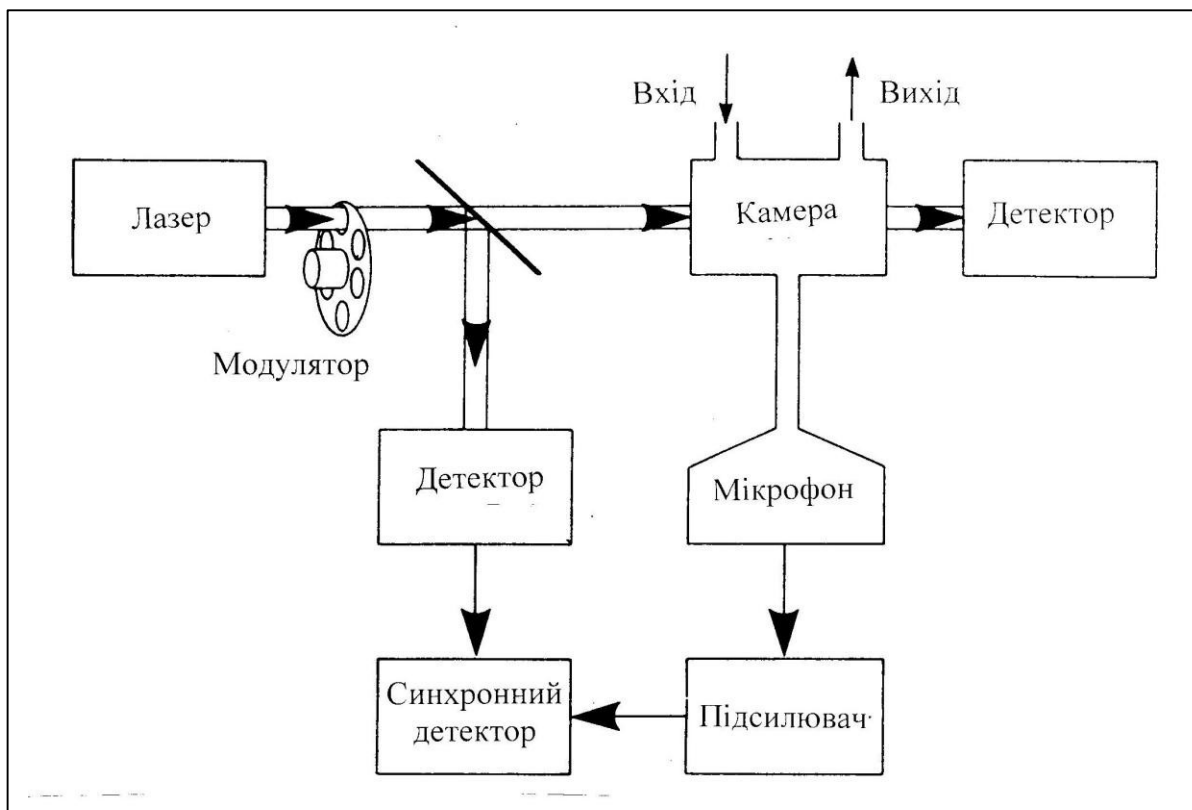


Рис. 25.10. Схема оптико-акустичного спектрометра

Як приклад застосування ОАС можна навести детектування у продуктах дихання пацієнта n-бутану ( $C_4H_{10}$ ), який є біомаркером раку легень на ранніх стадіях [95].

### 25.7. Техніка мас-спектрометрії на основі реакцій переносу протона (РПП/МС)

Цей метод ґрунтується на «м'якій» іонізації, пов'язаній з утворенням молекулярних іонів шляхом додавання або відбирання протону [96-98].

Більшість молекул ( $R$ ) іонізуються при додаванні протону ( $R + H^+$ ). В основі реакції переносу протона лежить процес заряджання молекули во-

ди, що супроводжується утворенням іону  $H_3O^+$ , з подальшою передачею заряду летким органічним компонентам  $V$ , які аналізуються. При цьому відбувається реакція переносу протона:



Схему РПП/МС-системи наведено на рис. 25.11.

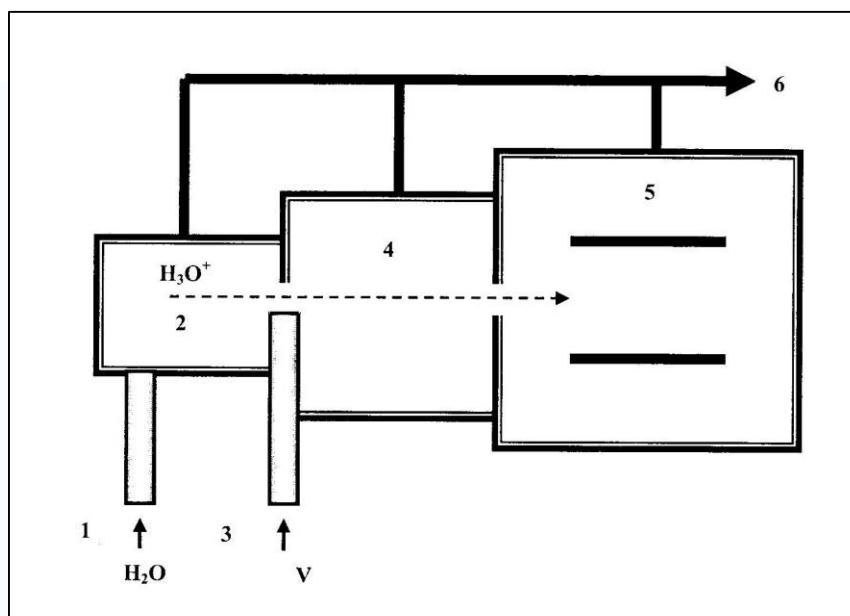


Рис. 25.11. Схеми РПП/МС системи: 1 – вхід водяної пари; 2 – система утворення іонів; 3 – вхід повітря з ЛОС; 4 – дрейфова камера; 5 – мас-спектрометр; 6 – насос [99]

Водяна пара під тиском 150 Па подається на вхід 1 системи 2 утворення іонів. Близько 98% пари  $H_2O$  перетворюється у іони  $H_3O^+$ . Повітря з леткими речовинами  $V$ , що аналізуються, подається через вхід 3 у дрейфову камеру 4, куди потрапляють завдяки прикладеному слабкому електричному полю іони  $H_3O^+$ . У дрейфовій камері відбувається реакція переносу протона, що супроводжується утворенням іонів  $V \cdot H^+$ . Ці іони дрейфують до входу мас-спектрометра 5, де аналізуються. Всі камери системи зв'язані з насосом 6. Чутливість такої РПП/МС-системи становить близько 1 нл/л [99].

Проблема пошуків, ідентифікації та аналізу летких органічних сполук у повітрі приміщень є вкрай актуальною, оскільки вона пов'язана із зменшенням небезпечних впливів цих сполук на здоров'я та комфорт мешканців. Подальший прогрес можна пов'язати з ретельним контролем якості повітря приміщень, застосуванням нешкідливих для довкілля будівельних матеріалів, розробкою нових аналітичних методів оцінювання ЛОС та технологій вилучення найнебезпечніших сполук з повітря приміщень.

### Контрольні запитання та завдання

1. Чому треба вивчати якість повітря приміщень?
2. Які сполуки можна віднести до основних речовин, що забруднюють повітря приміщень?
3. Які сполуки називаються леткими?
4. Назвати основні джерела летких органічних сполук.
5. Які концентрації ЛОС спричиняють отруєння людського організму?
6. Як впливають ЛОС на людський організм?
7. Що таке «Синдром Хворого Будинку»?
8. Як запобігти дії ЛОС на здоров'я мешканців приміщень?
9. Порівняти активний та пасивний методи відбору зразків повітря приміщень.
10. Пояснити принципи дії газового хроматографа.
11. Пояснити принципи дії мас-спектрометра.
12. У чому складається перевага комбінації методів хроматографії та мас-спектрометрії?
13. Пояснити принцип дії полум'яно-іонізаційного детектора.
14. Як працює термокондуктометричний детектор?
15. У чому полягає метод оптико-акустичної спектроскопії?
16. Пояснити принцип мас-спектрометрії на основі реакцій переносу протона.

### СЕМІНАР

#### Шкідливість куріння

Історія виникнення звички палити. Причини, що сприяють курінню.

Вміст тютюнового диму. Вплив куріння та тютюнового диму на здоров'я людини. Міри протидії курінню у розвинених країнах. Законодавчі та директивні акти щодо запобігання курінню у США, Великобританії, Японії. Ситуація з курінням в Україні. Статистичні дані щодо куріння серед населення України. Заходи щодо запобігання курінню.



## 26. МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ҐРУНТУ

### 26.1. Склад ґрунту

*Ґрунт* – природне утворення, що складається з шарів (ґрунтових горизонтів) мінеральних компонентів змінної товщини, які формуються внаслідок перетворення поверхневих шарів літосфери під впливом біотичних, абіотичних та антропогенних факторів та відрізняються від первісних матеріалів морфологічними, фізичними, хімічними та мінералогічними характеристиками.

Ґрунт – чотирифазна система, що включає тверді, рідкі, газоподібні та живі компоненти.

До складу ґрунту входять такі основні компоненти:

*Неорганічні мінеральні частини*, які складаються з алюмінію, кремнію та інших мінералів, розміри яких коливаються від маленьких частинок глини (0,002 мм) до великих гранул піску, гальки та гравію. Кількість цих частинок та їхня структура визначає водоутримуюча здатність ґрунту, доступність до нього повітря та поживних речовин.

*Органічні залишки*. Рештки рослин та тварин переходять через декілька стадій розкладання у стабільну субстанцію – гумус.

*Вода* є необхідним компонентом для активності мікроорганізмів. Кількість води у ґрунті залежить від опадів, структури ґрунту та населеності мікроорганізмів. Вода міститься в порах ґрунту та поглинається поверхнею частинок сухого ґрунту. Різноманітні поживні речовини розчинюються в воді та стають доступними мікроорганізмам.

*Гази*, основними з яких є кисень та азот, а також двоокис вуглецю, заповнюють пори ґрунту, що не зайняті водою. У насиченому ґрунті невелика кількість газів може бути розчинена у воді.

*Біологічні системи* включають коріння рослин, дрібних тварин та мікроорганізми. Один грам ґрунту містить 2,5 млн бактерій, 500000 грибів, 50000 водоростей та 30000 найпростіших.

### 26.2. Основні забруднюючі речовини у ґрунті

Ґрунт характеризується складною для аналізу забруднюючих речовин матрицею, яка варіює від піску до глини. Склад забруднюючих речовин, що потрапляють у ґрунт, також різноманітний – залишки будівельних матеріалів, хімічні сполуки, токсичні відходи.

До органічних забруднюючих речовин ґрунту слід віднести вуглеводні нафтопродуктів, поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), поліхлоровані біфеніли (ПХБ), хлоровані ароматичні сполуки, миючі засоби та пестициди.

До неорганічних забруднюючих речовин відносяться нітрати, фосфати, важкі метали (кадмій, свинець, хром, мідь, цинк, ртуть, миш'як), неорганічні кислоти, радіонукліди. На відміну від органічних забруднюючих речовин та короткоживучих радіонуклідів, метали вважаються консервативними забруднювачами, які не розкладаються у ґрунті.

Основними джерелами забруднень ґрунту є сільськогосподарські стоки, кислотні опади, промислові відходи та радіоактивні опади, залишки нафтопродуктів, смоли, агрохімічні препарати.

Неорганічні забруднюючі речовини включають нітрати, фосфати, такі важкі метали як кадмій, хром, свинець, мідь, цинк, ртуть, арсен, а також радіонукліди. На відміну від органічних забруднюючих речовин та короткоживучих радіонуклідів, метали вважаються консервативними забруднюючими речовинами, які не розпадаються у ґрунті.

Забруднення ґрунту викликає потрапляння забруднюючих речовин через водні потоки у водне середовище – ґрунтові води та різноманітні водойми, так само й повітря через випаровування летких речовин.

Осадження стічних вод, які містять важкі метали, призводить до їх накопичення, через що ґрунт не в змозі підтримувати життя рослин.

Розкладання органічних речовин викликає вивільнення діоксиду сірки або інших сірчаних сполук, які беруть участь у формуванні кислотних дощів.

Забруднюючі речовини ґрунту можуть впливати на здоров'я людини через харчові ланцюги. Так, класичним прикладом є надходження з ґрунту в озеро Мічиган (США) пестициду ДДТ та його накопичення у водних організмах: від 2 частинок на трильйон у воді до 3-6 частинок на мільйон у м'язах риби та 99 частинок на мільйон у сріблястих чайок [100].

Серед забруднюючих речовин ґрунту зустрічаються токсичні речовини, які здатні призвести до мутагенезу (генетичних порушень), канцерогенезу та тератогенезу (дефектів при народженні) у людей та інших організмів.

### **26.3. Якість ґрунту**

*Якість ґрунту* – це здатність певного типу ґрунту функціонувати в межах природних або керованих людиною екосистем, забезпечувати продуктивність рослин та тварин, покращувати якість води та повітря, підтримувати здоров'я людини та умови його мешкання. Якість ґрунту – це сукупність усіх наявних позитивних та негативних характеристик та властивостей, що визначають його родючість.

Якість ґрунту визначається взаємодією його фізичних, хімічних та мікробіологічних властивостей.

Ґрунти високої якості забезпечують поживну придатність, аерацію, проникнення та затримання води, структурну стабільність та високу біологічну активність.

Деградація природних ресурсів за рахунок ерозії, засолювання та забруднення ґрунтових та поверхневих вод призводить до погіршення якості ґрунту. Хоча деградація ґрунту відбувається швидко, процеси оновлення ґрунтів вимагають багато часу. Як історичні приклади деградації ґрунтів можна навести перетворення Великих рівнин США на пустелю під дією сильних вітрів, що віяли два роки поспіль (1934-1935 рр.), знищення родючого шару ґрунту після освоєння цілини в 50-х роках ХХ ст. у Казах-

стані. Важко повірити, що в пустелі Гобі чотири тисячоліття тому вирощували хліб, а Лівійська пустеля була житницею могутнього Риму. Вирубання лісів та зумовлені цим ерозія та спустелювання призвели до загибелі стародавніх центрів землеробства у Сирії та Пакистані.

Якість ґрунту не можна виміряти безпосередньо, шляхом, наприклад, визначення урожаю або якості води. Для оцінювання якості ґрунту використовують показники (індикатори) якості ґрунту.

### **26.3.1. Показники якості ґрунту**

*Показники якості ґрунту* – це фізичні, хімічні та біологічні властивості, процеси та характеристики, які вимірюються з метою моніторингу змін у ґрунті.

Показники якості ґрунту можуть включати характеристики твердих ґрунтових речовин, ґрунтових розчинів, ґрунтового повітря, рослинності та інших компонентів ґрунтової біоти; можливе застосування економічного аналізу землекористування або екосистемного забезпечення. Можна класифікувати показники якості ґрунту як візуальні, фізичні, хімічні та біологічні. Показники якості ґрунту можуть бути якісними та кількісними.

Показники якості ґрунту – це фізичні, хімічні та біологічні властивості, процеси та характеристики, які вимірюються з метою моніторингу змін у ґрунті.

Розглянемо основні показники якості ґрунту, розроблені та запропоновані Дораном та Паркіним [101].

### **26.3.2. Фізичні показники**

Фізичні властивості ґрунту визначаються текстурою, структурою, об'ємною густиною, пористістю, аерацією, кольором, агрегаційною стабільністю, вологістю та температурою. Оскільки фізичні показники пов'язані з взаємним розташуванням ґрунтових частинок та пор, вони відбивають здатність або обмеженість коріння до зростання, появу сходів, інфільтрацію, рух води у ґрунтовому профілі.

*Текстура ґрунту* характеризує відносні пропорції піску, мулу та глини. Згідно з класифікацією, запропонованою Міжнародним товариством із вивчення ґрунтів, можна відокремити такі класи ґрунтів за розмірами частинок : глина – до 0,002 мм; мул – 0,002-0,02 мм; дрібний пісок – 0,02-0,2 мм; великий пісок – 0,2-2,0 мм; гравій – більше за 2,0 мм. Наявність в ґрунті піску впливає на аерацію ґрунту та низький вміст води. Глина утримує воду, але забезпечує погану аерацію ґрунту.

*Структура ґрунту.* Структура ґрунту визначається як розміри, форма та упаковка агрегатів та порожнин між ними.

Важливими функціями ґрунту, пов'язаними з структурою, є підтримання біологічної продуктивності, регулювання та спрямування потоків води, забезпечення кругообігу та накопичення поживних речовин. Гранулярна структура зазвичай асоціюється з поверхневими ґрунтами, багатими на органічні речовини. Така структура забезпечує високі рівні інфільтрації

та біологічної продуктивності. Структура поверхневих шарів ґрунту та їх пористість впливають на дренаж, аерацію та проникнення коріння у ґрунт.

Глинисті ґрунти з погано розвиненою структурою та зменшеною інфільтрацією викликають водні стоки, ерозію та утворення поверхневих кірок. До побічних ефектів в межах ґрунтової ділянки можна віднести втрати поживних речовин завдяки ерозії, погіршення проростання та схожості насіння. Поза ґрунтової ділянки слід зазначити погіршення якості води через збільшення її каламутності, седиментації та насичення поживними речовинами. Піщані ґрунти характеризуються підвищеною проникністю для води та погіршенням водного постачання для рослин та ґрунтових організмів.

*Густина твердої речовини* являє собою відношення маси твердої речовини  $M_{gr}$  ґрунту до її об'єму  $V_{gr}$ . Для більшості ґрунтів середня густина твердої речовини становить 2600–2700 кг/м<sup>3</sup>. На рівень цього параметру впливає відносний вміст таких компонентів як оксиди заліза (2900 кг/м<sup>3</sup>), кварц (2660 кг/м<sup>3</sup>), глинисті мінерали (2650 кг/м<sup>3</sup>), органічна речовина (1300 кг/м<sup>3</sup>), вода (1000 кг/м<sup>3</sup>) та повітря ( $1,2 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>).

*Об'ємна густина сухого ґрунту* визначається як відношення маси ґрунту до сумарного об'єму твердої речовини, пор та води у ґрунті. Оскільки близько 50 % ґрунту припадає на пори, об'ємна густина сухого ґрунту становить близько 1300–1350 кг/м<sup>3</sup>. Якщо об'ємна густина ґрунту досягає 1550–1600 кг/м<sup>3</sup>, ріст кореневої системи рослин обмежений; якщо 1800 кг/м<sup>3</sup> – процес росту кореневої системи інгібується.

Об'ємна густина є важливим показником якості ґрунту. Вона демонструє здатність ґрунту забезпечувати структурну підтримку, транспортування води та поживних речовин, аерацію ґрунту. У таблиці 26.1 наведено значення об'ємної густини, критичних з точки зору забезпечення оптимальних умов для зростання рослин.

26.1. Значення об'ємної густини, критичних з точки зору забезпечення оптимальних умов для зростання рослин [102]

Тип ґрунту	Оптимальна для зростання рослин густина (г/см <sup>3</sup> )	Значення густини, що обмежують зростання коріння (г/см <sup>3</sup> )
Піщаний	< 1,60	>1,80
Мулистий	< 1,40	>1,65
Глинистий	< 1,10	>1,47

Висока об'ємна густина ґрунту є показником низької пористості та високої компактності ґрунту, які обмежують зростання коріння, спричиняють погану аерацію та рух води через ґрунт. Усе це погіршує умови для врожайності, зростання рослин, зменшує здатність рослинного покриву протидіяти ерозії ґрунту. Зменшення інфільтрації призводить до збільшення стоків та, врешті-решт, до ерозії ґрунту.

*Пористість ґрунту* дорівнює відношенню сумарного об'єму всіх пор та проміжків між структурними агрегатами до загального об'єму ґру-



нту. Пори розмірами  $> 1000$  мкм (макропори) забезпечують швидкий дренаж води після дощу або іригації; в межах  $10\text{--}1000$  мкм (мезопори) – доступ певної кількості води для рослин або дренажу;  $< 10$  мкм (мікропори) утримують міцно воду, деяка кількість якої надається рослинам.

*Інфільтрація* – це процес проникнення води з ґрунтової поверхні до ґрунту. *Швидкість інфільтрації* – це швидкість, з якою ґрунт здатний поглинати опади або іригаційні потоки (вимірюється у мм/г).

*Агрегаційна стабільність*. Агрегати являють собою первинні ґрунтові частинки, які здатні зв'язуватися одна з одною міцніше, ніж з іншими частинками. Ґрунтові агрегати являють собою ґрунтові окремість, що утворилися з елементарних ґрунтових частинок внаслідок їх злипання або склеювання під впливом фізичних, хімічних або біологічних процесів. Агрегаційна стабільність демонструє здатність ґрунтових агрегатів протидіяти дезінтеграційним процесам, що виникають під час обробки ґрунту або вітрової чи водної ерозії. Стабільність вологих агрегатів свідчить, як добре протидіє ґрунт руйнівному впливу дощових краплин або водної ерозії. Розподіл за розмірами сухих агрегатів ґрунту дає можливість оцінювати протидію ґрунту зношенню та вітровій ерозії.

Зміни агрегаційної стабільності можуть виконувати функції ранніх показників деградації або оновлення ґрунту. Агрегаційна стабільність є також індикатором вмісту органічної речовини, біологічної активності або кругообігу поживних речовин в ґрунті. Так, частинки в малих (менших, ніж  $0,25$  мм) агрегатах зв'язані більш старими та більш стабільними формами органічної речовини [103]. Мікробіологічне розкладання свіжої органічної речовини в великих (більших, ніж  $2\text{--}5$  мм) агрегатах звільнює менш стабільні продукти, що зв'язують дрібні агрегати у великі. Ці великі агрегати більш чутливі до управлінських дій по відношенню до ґрунту і служать показниками якості ґрунту. Чим більша кількість великих агрегатів у ґрунті, тим краща якість ґрунту.

Агрегаційна стабільність забезпечує також більш високий простір, що утворюється ґрунтовими порами усередині агрегатів та між ними. В свою чергу, цей простір пов'язаний із здатністю ґрунту до аерації, транспортуванню води та поживних речовин, руху живих організмів. Великі за розмірами пори, притаманні великим агрегатам, характеризують більш високу швидкість інфільтрації та кращу аерацію, потрібні для рослин.

Таким чином, агрегаційна стабільність є ознакою здатності ґрунту протидіяти таким руйнівним процесам, як водна та вітрова ерозія, забезпечувати інфільтрацію та ріст рослин.

*Інфільтрація*. Процес просочування опадів та поверхневих вод в ґрунт по капілярних порах, щілинах та порожнинах від поверхні до рівня ґрунтових вод називається *інфільтрацією*. Відношення кількості опадів, що просочуються в ґрунт, до кількості атмосферних опадів називають *коефіцієнтом інфільтрації*. Величина цього коефіцієнту може змінюватися від  $1\text{--}3\%$  до  $25\text{--}30\%$ . Швидкість, з якою ґрунт може вбирати дощові та талі

води, називається *швидкістю інфільтрації*. Значення швидкості інфільтрації варіюють від кількох см до кількох метрів на добу.

Інфільтрація є показником якості ґрунту, оскільки вона характеризує здатність ґрунту забезпечувати рух води в ґрунт та через ґрунтовий профіль. Ґрунт здатний тимчасово зберігати воду та постачати її у кореневу систему рослин, створюючи оптимальні умови для зростання рослин та існування ґрунтових організмів.

Якщо вода постачається зі швидкістю, що перевищує інфільтраційну здатність ґрунту, вода переміщується вздовж поверхні по схилах у вигляді стоків. Коли ці стоки потрапляють на непокрите рослинним покривом ділянки, має місце ерозія ґрунту. Крім того, ці стоки вимивають з ґрунту поживні речовини, агрохімікати, що зменшує продуктивність ґрунту. Транспортування речовин у водойми спричиняє їх седиментацію та забруднення води і, отже, погіршення якості води.

Насичення ґрунту водою призводить до зменшення міцності ґрунту, руйнування його структури, збільшення відділення ґрунтових частинок, що викликає ерозію ґрунту. Крім того, збільшення води на поверхні ґрунту інтенсифікує процес випаровування та відповідне зменшення води, потрібної для рослин.

Показники ґрунту пов'язані між собою. Зокрема, текстура пов'язана з пористістю, інфільтрацією, доступним вмістом води; об'ємна густина – зі швидкістю інфільтрації та гідравлічною провідністю; агрегаційна стабільність – з резистивністю до ерозії та вмістом органічної речовини.

### **26.3.3. Хімічні показники**

Хімічні показники включають результати вимірювання рН, солоності, органічної речовини, концентрації фосфору, кругообігу поживних речовин, катіон-обмінної здатності, концентрації елементів, які можуть бути потенційними забруднюючими речовинами (важких металів, радіонуклідів тощо) або які потрібні для росту та розвитку рослин.

Рівень рН ґрунту є мірою кислотності або лужності ґрунту, яка визначається як від'ємний десятковий логарифм молярної концентрації розчинених водневих іонів. Десятковий масштаб означає, що зміна рН на одну одиницю відповідає зміні кислотності або лужності ґрунту у 10 разів.

Значення рівня рН ґрунту варіюють від 0 до 14. Рівень рН менший, ніж 7, указує на кислий ґрунт; рівний 7 – на нейтральний; більший, ніж 7 – на лужний. Оптимальною для розвитку рослин вважається область рН 5,5-7,5 (табл. 26.2).

## 26.2. Рівні рН для різних ґрунтових середовищ



Рівень рН визначає розчинність ґрунтових мінералів та їх відповідну доступність для рослин. рН ґрунту впливає на кількість, активність та типи ґрунтових мікроорганізмів, які забезпечують розкладання залишків рослин, гною, шламів та інших органічних речовин, сприяють перетворенню та розчинності поживних речовин і, таким чином, впливає на зростання рослин та споживання ними поживних речовин. Так, у дуже кислих ґрунтах ( $\text{pH} < 6$ ) рослинам доступні такі елементи як залізо, марганець, мідь, цинк, бор; у більш лужних ґрунтах ( $\text{pH} > 7,5$ ) рослини споживають фосфор, кальцій, магній, молібден.

*Засоленість ґрунту.* Вміст солей у ґрунті визначає його *засоленість*. На цей процес суттєво впливає накопичення солей, особливо на поверхні ґрунту завдяки капілярному транспортуванню води з водоносних шарів з подальшим випаровуванням її з поверхні. На засоленість ґрунту може впливати також антропогенна активність, пов'язана з використанням добрив, гною, компостування та недостатній рівень опадів. Збільшення засоленості ґрунту призводить до деградації ґрунту та рослинного покриву, зменшенню швидкості інфільтрації, погіршенню якості води, ерозії ґрунту.

*Електропровідність* суміші ґрунт-вода відповідає кількості солей у ґрунті (табл. 26.3). Усі ґрунти містять необхідні для розвитку рослин солі. Але надлишок солей затримує розвиток рослин, порушуючи ґрунтово-водний баланс.

### 26.3. Залежність відгуку мікрофлори від солоності ґрунту

Електропровідність (дСі/м, 25 °С)	Клас солоності	Відгук врожаю	Відгук мікрофлори
0-0,98	Несолоний	Майже незначний вплив	Є вплив на декілька організмів
0,98-1,71	Ледве солоний	Урожай дуже чутливих культур обмежений	Деякі мікробіологічні процеси змінюються (нітрифікація /денітрифікація)
1,71 -3,16	Злегка солоний	Урожай більшості культур обмежений	Є вплив на більшість мікробіологічних процесів (дихання /амоніфікація)
3,16-6,07	Помірно солоний	Лише толерантні культури дають урожай	Домінують толерантні до солі організми
>6,07	Дуже солоний	Лише дуже толерантні культури дають урожай	Деякі галофільні організми активні

Загалом, діапазон електропровідності від 0 до 0,8 дСі/м є придатним для врожаю.

*Катіонний обмін* – це явище, пов’язане з поглинанням з розчину одних та переходом у розчин інших катіонів, що знаходяться у складі колоїдних частинок речовини на її поверхні. Здатність ґрунту утримувати катіони називається *катіон-обмінною ємністю (КОЄ)*. Ґрунтові частинки складаються з силікатних та алюмосилікатних глин, які являють собою від’ємно заряджені колоїдні частинки. Від’ємним зарядом характеризується також органічна речовина. До цих частинок притягуються позитивно заряджені катіони – такі, як  $H^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Na^+$ , які знаходяться у ґрунтовому розчині. Отже, КОЄ є мірою кількості катіонів, які можуть бути поглинуті та утримані ґрунтом. Величину КОЄ

вимірюють у міліграмеквівалентах на 100 г ґрунту.

КОЄ залежить від вмісту органічної речовини у ґрунті та від типу ґрунту. В цілому, чим більше містить ґрунт органічної речовини та глини, тим більший КОЄ.

Типові значення КОЄ наведено в табл. 26.4.

#### 26.4. Типові значення катіон-обмінної ємності для різних типів ґрунту

Тип ґрунту	КОЄ (мг-екв/100 г ґрунту)
Пісок	2-4
Суглинок	7-16
Глина	4-60
Органічна речовина	50-300

Слід зазначити, що катіони з високою густиною заряду (тобто маленькі катіони) можуть заміщати більш великі катіони. Наприклад, іони  $H^+$  здатні зміщувати іони  $Ca^{2+}$ , які в свою чергу можуть зміщувати іони  $Mg^{2+}$ . Під час розкладання бактеріями органічної речовини в ґрунті утворюються протони, зростання яких призводить до виштовхування інших зв'язаних катіонів на поверхню ґрунтових частинок, завдяки чому ці великі катіони стають придатними до поглинання кореневою системою рослин. Явище катіонного обміну важливе з точки зору споживання рослинами тих іонів ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ), які беруть участь у цьому обміні.

*Нітрати* в ґрунті ( $NO_3^-$ ) є та форма азоту, що споживається рослинами. Кількість нітратів залежить від швидкості, з якою мікроорганізми розкладають органічну речовину в ґрунті. Ця швидкість залежить від температури, аерації, вологості, типу органічних залишків, рН ґрунту.

#### 26.3.4. Біологічні показники

Відомо [103], що 1 грам поверхневого ґрунту містить  $10^{8-9}$  бактерій,  $10^{5-8}$  актиномицетів,  $10^{5-6}$  грибів,  $10^{3-6}$  водоростей,  $10^{3-5}$  найпростіших,  $10^{1-2}$  нематод,  $10^{3-5}$  інших безхребетних.

До основних біологічних показників ґрунту слід віднести загальну біомасу ґрунту, мікробну біомасу, загальну чисельність бактерій та мікроскопичних грибів, продукування двоокису вуглецю або дихання ґрунту, ферментативну активність тощо. Біологічні показники включають результати вимірювань мікро- та макроорганізмів, їх активності або утворення побічних продуктів. Популяції черв'яків, нематод, комах та патогенних мікроорганізмів, швидкість респіраційних процесів, розкладання органічної речовини та залишків рослин у ґрунті – все це може бути використано для оцінювання якості ґрунту.

Так, до біологічних показників можна віднести наявність та кількість дощових черв'яків. Черв'яки – збірна група тварин, яка включає безхребетні організми з тонким видовженим тілом і м'якими покривами. Латинське слово для позначення черв'яків – «vermis» походить скоріше за

все від давньоіндо-європейського кореня «wert», що означає «повертати», «вертати» (лат. *verto*). Звичайний дощовий черв'як (*Lumbricus terrestris*) – великий червонуватий дощовий черв'як, широко поширений по всьому світу.

Популяція черв'яків змінюється від 10 до 10000 на 1 м<sup>2</sup>. Населеність 100 черв'яків на квадратний метр вважається оптимальною для сільськогосподарських угідь. В культивованих системах кількість черв'яків досягає 200, а під трав'яним покривом – 500 на 1 м<sup>2</sup>. Дощові черв'яки покращують якість ґрунту, зокрема аерацію, постачання поживних речовин у рослини, розкладання органічних речовин. Діапазони навколишніх параметрів для оптимального існування черв'яків становлять: температура: 10-29 °С; рН: 5,0-7,4.

Є докази того, що дощові черв'яки сприяють підвищенню продуктивності сільськогосподарських культур. Дощові черв'яки беруть участь у модифікації фізичної структури ґрунту шляхом створення нових агрегатів та пор, що покращує ґрунтову ріллу, аерацію, інфільтрацію та дренаж. Вони створюють зв'язуючі агенти, що відповідають за формування водостійких макроагрегатів. Внаслідок розпушування та перемішування ґрунту черв'яками покращується пористість ґрунту. Активну участь дощові черв'яки беруть у розкладанні залишків рослин, кругообігу та перерозподілі поживних речовин. Їх власні залишки є також джерелом поживних речовин. Всі ці властивості дощових черв'яків сприяють розвитку кореневої системи та її поширенню у глибину.

Отже, процес дихання слід розглядати як показник активності мікроорганізмів, вмісту органічної речовини та її розкладання. Цей процес дає також уявлення щодо здатності ґрунту підтримувати зростання рослин.

*Дихання ґрунту* – це респіраторні процеси в ґрунті, які пов'язані з продукуванням СО<sub>2</sub> завдяки біологічній активності мікроорганізмів, кореневої системи, ґрунтових організмів тощо. Дихання ґрунту залежить від вологості, температури, пори року, рівень кисню в ґрунті, через що важко кількісно оцінити цей процес. Колір ґрунту може бути використаний для якісної оцінки дихання – світлі кольори свідчать про недостачу органічних речовин, тоді як темний колір є ознакою здорового ґрунту. Дихання ґрунту є показник біологічної активності ґрунту та розкладання його органічної складової. Під час розкладання ґрунтової органічної речовини органічні сполуки (фосфор, азот, сірка) перетворюються у прості неорганічні форми, які споживаються рослинами. Цей процес відомий як мінералізація.

Для кількісного оцінювання респіраторних процесів в ґрунті використовують трубки Драгера, які містять хімічні реагенти, здатні змінювати колір під час взаємодії з СО<sub>2</sub>.

### **26.3.5. Фактори, що впливають на якість ґрунту**

До основних факторів, що впливають на якість ґрунту в сучасних умовах за даними IBSRAM (the International Board for Soil Research Management), слід віднести виснаження та недостачу поживних речовин, ерозію та деградацію ґрунту, неефективне використання води, недосконалі методи досліджень, кислотність ґрунту, відсутність органічних речовин, недостатнє використання добрив, високу компактність ґрунту, сезонні посухи, водні стреси та поганий дренаж.

*Деградація ґрунту* – це стійке погіршення корисних властивостей ґрунту як середовища мешкання біоти, а також зменшення його родючості внаслідок впливу природних чи антропогенних факторів. Деградація ґрунту може бути розділена на фізичну, хімічну та біологічну.

*Фізична деградація* – це погіршення фізичних та гідрофізичних властивостей ґрунту та порушення ґрунтового профілю. Фізична деградація пов'язана з ерозією ґрунту, яка викликається водою та вітром. Одним з основних чинників водної ерозії є вирубка лісів, а вітрової – надмірне випаання, нераціональне використання сільськогосподарських земель, надмірна експлуатація природної рослинності та знеліснення. Недостатня іригація та поганий дренаж спричиняють засоленість та заболоченість ґрунту. Ущільнення ґрунту пов'язане з застосуванням важкої сільськогосподарської техніки та відповідним зовнішнім навантаженням, що призводить до погіршення проростання коріння, гідравлічної провідності та аерації ґрунту.

*Хімічна деградація* – це погіршення хімічних властивостей ґрунту: виснаження або надлишок запасів поживних речовин, втрати гумусу, засоленість та осолонцювання, хімічне забруднення токсикантами спричинюють хімічну деградацію ґрунту.

*Біологічна деградація* – це скорочення чисельності видового різноманіття та оптимального співвідношення різних видів мікроорганізмів, забруднення ґрунту патогенними мікроорганізмами, погіршення санітарно-епідеміологічних показників.

### **26.4. Відбір проб ґрунтових зразків**

Моніторинг довкілля вимагає збирання результатів вимірювань параметрів навколишнього середовища. Однак, для отримання правильних результатів необхідно визначити мету, стратегію та методіку збирання зразків об'єктів довкілля, їх фізичні, хімічні та біологічні параметри, що визначають стан навколишнього середовища та його зміни у просторі та часі.

Якщо місцезнаходження джерела забруднення відоме, зразки збирають в зоні розташування джерела з врахуванням природних особливостей місцевості та напрямку вітру (рис. 26.1). Якщо розташування джерела забруднення невідоме, використовують метод «сітки», який вимагає більших витрат та ігнорує топографічні особливості регіону. Для запобігання витрат використовують метод «перерізу», який надає інформацію щодо границь забруднених ділянок та є дешевшим (рис. 26.2).

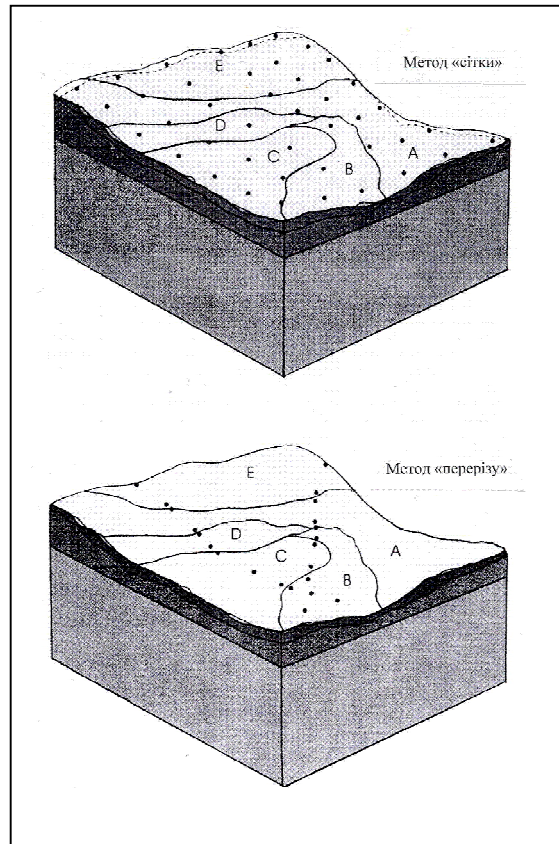


Рис. 26.1. Схема можливих варіантів збирання зразків ґрунту: а - метод «сітки»; б – метод «перерізу» (пояснення в тексті)[62]

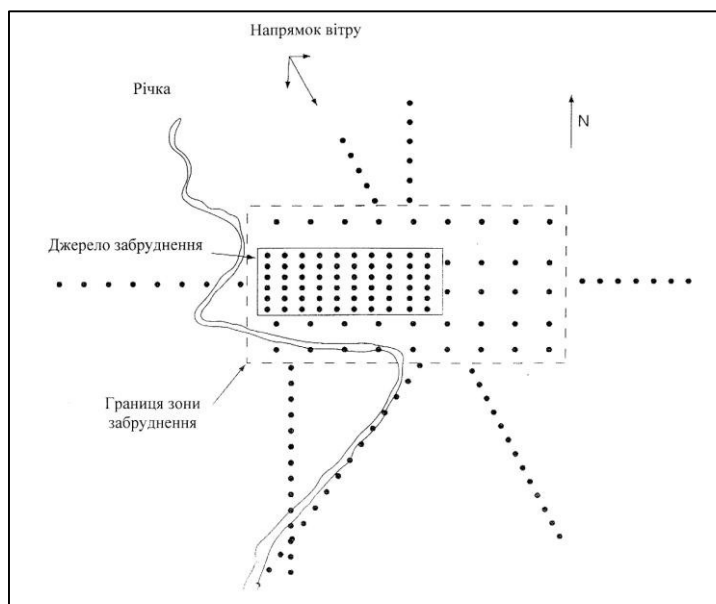


Рис. 26.2. Застосування методів «сітки» та «перерізу» для збирання ґрунтових зразків з зони забруднення [62]

Залежно від мети дослідження глибина відбору проб ґрунту варіює від 0-5 см до 41-60 см; для оцінювання хімічних та забруднюючих речовин розмір ділянки для відбору зразків ґрунту коливається від 1 до 5 га.

Для збирання зразків ґрунту обирають однорідні ділянки земної поверхні; маса зразків дорівнює 400-1000 г.



## 26.5. Нормативи та стандарти якості ґрунту

*Гранично допустима концентрація* забруднюючих речовин – максимальна допустима кількість забруднюючих речовин у ґрунтах, яка не зумовлює негативних екологічних наслідків для їхньої родючості, загального стану довкілля, якості сільськогосподарської продукції та стану здоров'я людини. У таблиці 26.5 наведено гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у ґрунтах відповідно ГОСТ 3034-84, 3210-85, 42-128-4433-87.

26.5. Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у ґрунтах (ГОСТ 3034-84, 3210-85, 42-128-4433-87)

Речовина	ГДК, мг/кг	Речовина	ГДК, мг/кг
Бензпірен	0,02	Бромофос, метилспірал	0,4
Свинець Pb	20,0	Сірководень H <sub>2</sub> S, поліхлорпілен	0,5
Хром шестивалентний Cr <sup>+6</sup>	0,05	Фтор F <sub>2</sub>	10,0
Ртуть	2,1	Хлорофос	0,5
Бензол C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , толуол C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	0,3	Карбофос	2,0
Нітрати	130,0	Хлорамін	2,0
Мідь Cu	3,0	Метафос	0,1
Нікель Ni	4,0	Гексахлоран	1,0
Цинк Zn	23,0	Бромфос, метилстирал	0,4
Манган Mn	1 500,0	Гетерофос	0,005
Ванадій V	150,0	Атразин	0,01
Кобальт Co	5,0	Сірка S	160,0
Кадмій Cd	1,0		

## 26.6. Вимірювання забруднення ґрунту

### 26.6.1. Оптична емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою

*Індуктивно-зв'язана плазма (ІЗП)* – це тип газового розряду, що збуджується змінним (1-100 МГц) радіочастотним полем за допомогою індукційної котушки.

Індуктивно-зв'язана плазма використовується в атомному емісійному аналізі або мас-спектрометрії.

*Оптична емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою, ОЕС-ІЗП (або атомна емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою, АЕС-ІЗП)* представляє собою аналітичну техніку, призначену для детектування металів у слідових кількостях.

Емісійна спектроскопія вивчає спектри випромінювання атомів, молекул та іонів, збудженими різноманітними джерелами електромагнітного випромінювання, з метою якісного та кількісного визначення складу речовини.

Метод ОЕС-ІЗП передбачає збудження атомів та іонів індуктивно-зв'язаною плазмою, що супроводжується випромінюванням з певними довжинами хвиль, набір яких притаманний елементу, що досліджується. Інтенсивність випромінювання пропорційна концентрації цього елемента[104].

Система ОЕС-ІЗП складається з джерела плазми, яке містить три концентричних кварцових трубки та котушки, зв'язаної з джерелом радіочастотного поля. Через котушку пропускають газ аргон, який під впливом потужного радіочастотного поля та розрядника утворює факел (рис. 26.3).

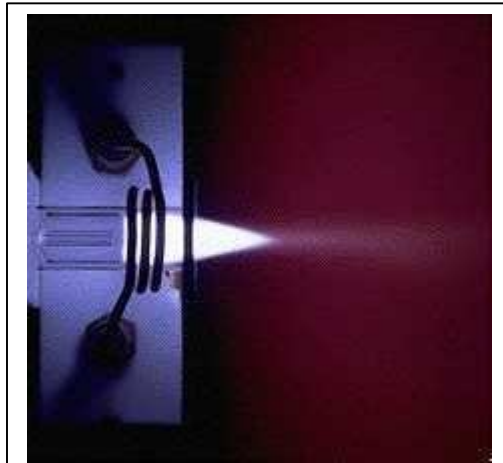


Рис. 26.3. Утворення факелу у котушці під впливом радіочастотного поля

Внаслідок зіткнень нейтральних атомів та заряджених частинок утворюється стабільна високотемпературна (7000 К) плазма.

В область плазми накачується зразок, який взаємодіє з електронами та іонами плазми, через що сам розкладається на іони. Процес руйнування молекул зразка в плазмі супроводжується випромінюванням на певних довжинах хвиль.

Вимірювання довжин хвиль та інтенсивності спектральних ліній за допомогою дифракційної решітки та фотоелектронного помножувача або лінійки діодних детекторів, поєднаних з системою реєстрації (рис. 26.4).

Вимірювання аналітичних довжин хвиль та інтенсивності спектральних ліній дає можливість проаналізувати зразок.

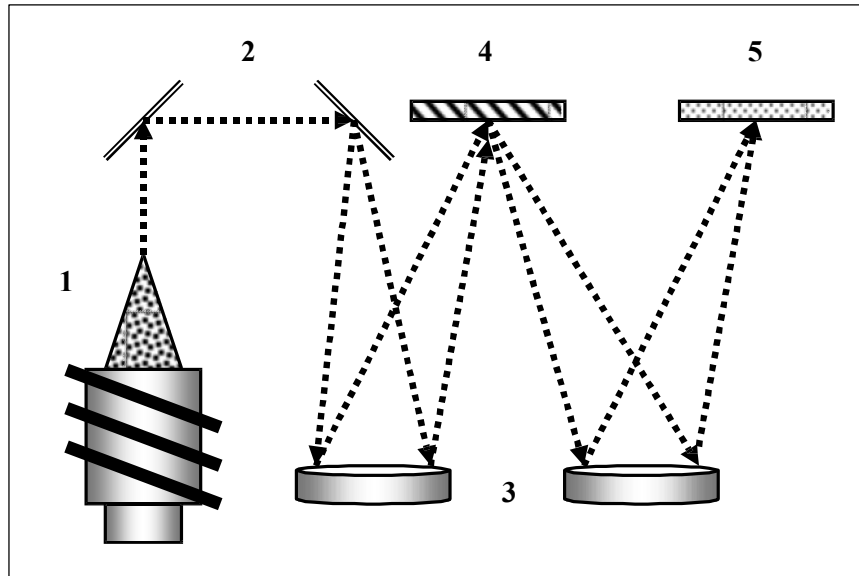


Рис. 26.4. Принцип оптичної емісійної спектроскопії з індуктивно зв'язаною плазмою (ОЕС-ІЗП): 1 – джерело плазми; 2, 3 – дзеркала; 4 – дифракційна решітка; 5 – детектор

Метод ОЕС-ІЗП використовують для аналізу забруднень ґрунту (елементарний склад забруднюючих речовин ґрунту містить алюміній, барій, берилій, бор, кадмій, кальцій, хром, кобальт, мідь, залізо, магній, марганець, молибден, срібло, кремній, стронцій, олово, ванадій, цинк), визначення елементарних складових добрив (Ca, Fe, K, Mg, Na, P, та S). Границі детектування методу ОЕС-ІЗП становлять 0,2-100 ppb.

### 26.6.2. Мас-спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІСП-МС)

Цей метод ґрунтується на використанні індуктивно-зв'язаної плазми як джерела іонів та мас-спектрометра для їх розділення та детектування [105].

На відміну від методу ОЕС-ІЗП вимірювання довжин хвиль та інтенсивності спектральних ліній здійснюється за допомогою мас-спектрометра (рис. 26.5). Зразок, що аналізується, розміщують у центральному каналі у вигляді аерозолі, який одержується шляхом розпилення рідини. Коли аерозолі потрапляють у центральний канал, вони випаровуються та розпадаються на атоми. Завдяки високій температурі суттєва частина атомів іонізується та надходить на вхід мас-спектрометра. Тут іони розділяються відповідно до відношення їх маси до заряду і детектор отримує сигнал, пропорційний концентрації частинок з таким відношенням.

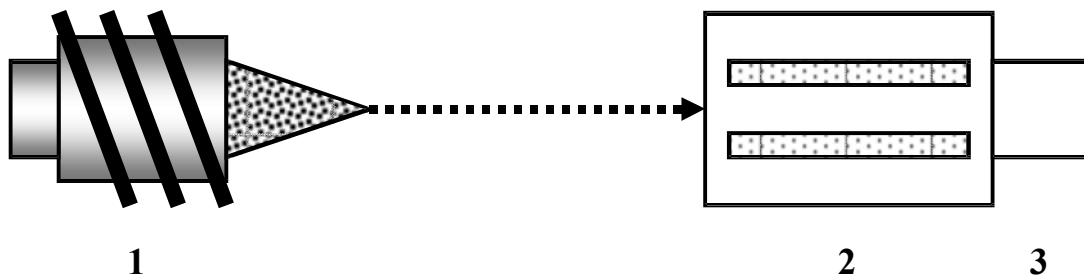


Рис.26.5. Принцип мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ІСП-МС): 1 – джерело плазми; 2 – мас-спектрометр; 3 –детектор

Мас-спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою є одним з типів мас-спектрометрії, який характеризується високою чутливістю та здатністю визначати метали та деякі неметали в концентраціях, що не перевищують  $10^{-10}$  %, тобто одну частинку на  $10^{12}$  (трильйон).

Метод ІСП-МС дає можливість ідентифікувати та кількісно оцінювати одночасно понад 60 елементів періодичної системи за дві хвилини з точністю 0,1 мкг/л.

Метод ІСП-МС використовують для аналізу забруднюючих речовин ґрунту, зокрема алюмінію, сурми, миш'яку, барію, берилію, кадмію, хрому, кобальту, міді, свинцю, марганцю, молібдену, нікелю, срібла, талію, урану, ванадію, цинку.

Серед інших методів аналізу забруднюючих речовин ґрунту можна відмітити *високоєфективну рідинну хроматографію* (феноли, ксиленоли, крезолі, нафтоли), *газову хроматографію з полум'яним іонізаційним детектором* (поліароматичні вуглеводні, поліхлоровані біфеніли, леткі органічні сполуки, пестициди), *комбінацію газової хроматографії з мас-спектрометрією* ГХ-МС (радіонукліди, леткі органічні сполуки, важкі метали).

## 26.7. Ерозія ґрунтів

### 26.7.1. Типи ерозії ґрунтів

*Ерозія ґрунтів* – це руйнування ґрунтів та підстилаючої породи за рахунок природних та антропогенних процесів, які призводять до переміщення продуктів руйнування з одного місця в інше (від латинського *erosio* – роз'їдати, вигризати).

Ерозія, яка супроводжується руйнуванням поверхні землі, формуванням долин річок, схилів, межиріччя, називається *природною (геологічною)*. На цей тип ерозії впливають такі фактори як вітер, вода, температурні коливання, біологічні процеси.

*Вітрова ерозія* викликає переміщення найдрібніших частинок ґрунту, що містять найважливіші для родючості компоненти – гумус, хімічні речовини. Крім того, цей процес супроводжується оголенням коріння одних та засипанням інших рослин.

*Водна ерозія* викликається талими, дощовими та зливовими водами на пересіченій місцевості; цей процес супроводжується переносом твердих частинок, розчиненням породи водою, зміною рельєфу земної поверхні. Найбільш небезпечною формою водної ерозії є селі та зсуви.

Температурні коливання викликають утворення розколин в скельних породах та відшарування. Швидка зміна дня і ночі впливає тільки на поверхневий шар скелі, тоді як перехід від літа до зими – на значно глибші шари. При низьких температурах відбувається руйнування породи внаслідок розширення води в тріщинах. Через замерзання і танення частинки, що відокремилися, рухаються вниз по схилу.

Біологічні процеси також обумовлюють руйнування гірських порід завдяки живим організмам, таким як лишайники та мохи. Однак, частіше живі організми лише прискорюють дію інших факторів. Тварини, рухаючись по ґрунту, викликають подрібнення частинок, що полегшує знесення їх вітром або водою.

Розвиток ерозії пов'язаний також із рельєфом місцевості, стійкістю ґрунту до змиву та розмиву, рівнем покриття схилів лісовою або трав'янистою рослинністю.

*Прискорена (антропогенна) ерозія* викликається одночасним впливом вирубки лісів, надінтенсивним тваринництвом та неправильним використанням ґрунтів під сільськогосподарські потреби. Оранка, сінокосіння та збирання врожаю, робота сільськогосподарських машин, меліорація земель, знищення лісів, надмірне розорювання території, безконтрольний випас худоби сприяють прискореній ерозії. Шар ґрунту, що руйнується при нормальній ерозії протягом сторіч при антропогенній знищується за дуже короткі проміжки часу (швидкість антропогенної ерозії може бути в 100 разів більша, ніж швидкість природної).

Ерозія ґрунтів проявляється у вигляді змиву верхнього ґрунтового покриву або розмиву його вглиб. Виходячи з цього розрізняють *площинну (поверхневу) ерозію*, яка супроводжується поступовим видаленням з поверхні компонентів ґрунту, та *лінійну ерозію*, при якій відбувається розмив ґрунту у вертикальному напрямку. Найбільш небезпечною є площинна ерозія. Вона завдає великої шкоди сільському господарству, оскільки під дією стікаючих дощових та талих вод по схилу змивається та переноситься верхня, найбільш родюча частина ґрунту. Лінійна ерозія проявляється в утворенні ярів та балок.

В результаті ерозії на значних площах руйнуються цінні сільськогосподарські угіддя; різко зменшуються гумусові ресурси, вміст азоту, фосфору і калію в ґрунті, що впливає на його родючість; замулюються ріки, канали та водні джерела, зростає розчленування території ярами, погіршується її гідрологічний режим.

### **26.7.2. Вітрова ерозія**

Вітрова ерозія оцінюється завдяки *індексу вітрової ерозії E*, який залежить від текстури та структури ґрунту, вологості, покриву, нерівності поверхні, енергії вітру. Піщані ґрунти мають більші (682-352 т/га·рік) значення цього індексу, ніж глинисті (0-123 т/га·рік) ґрунти. Вологість та наявність кірки зменшують вітрову ерозію.

### **26.7.3. Наслідки ерозійних процесів**

Площа еродованих земель внаслідок неправильного ведення землеробства та будівельних робіт у світі досягла 700 млрд га.

Основними причинами ерозії є руйнування гумусового шару внаслідок розорювання цілинних земель; вирубування лісів; перевипасання й витоптування трав'янистого покриву; особливо небезпечне знищення рослинного покриву й посилення ерозійних процесів у гористих місцевостях, на територіях, де є схили, яри, дощі й талі води зносять великі маси ґрунту; кар'єрний спосіб видобутку корисних копалин; будівництво споруд, транспортних магістралей, комунікацій тощо.

### **26.7.4. Моніторинг земель України**

*Моніторинг земель* – це система спостереження за станом земель з метою своєчасного виявлення змін, їх оцінки, відвернення та ліквідації наслідків негативних процесів [107]. У системі моніторингу земель проводиться збирання, оброблення, передавання, збереження та аналіз інформації про стан земель, прогнозування їх змін та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень щодо запобігання негативним змінам стану земель та дотримання вимог екологічної безпеки.

Основними завданнями моніторингу земель є прогноз еколого-економічних наслідків деградації земельних ділянок з метою запобігання або усунення дії негативних процесів.

Земельний фонд України становить 60,4 млн. га; сільськогосподарські угіддя – 69,3%, в тому числі рілля – 54,4%, перелоги – 0,4%, багаторічні насадження – 1,6%, сіножаті – 3,8%, пасовища – 9,1%, лісові та інші насадження – 17,2%, заболочені землі – 1,6%, землі, вкриті водою – 4,0%, 159 тис. га займають радіоактивно забруднені сільськогосподарські угіддя, 164,4 тис. га – порушені землі.

З усіх типів ґрунтів найродючішими є чорноземи (еталон родючості), вони займають до 60 % усіх сільськогосподарських угідь України та розташовані в межах лісостепу та степу. Вміст гумусу в цих ґрунтах становить 4–9 %, їх товщина сягає 1–1,5 м.

В Україні еродовано 12,9 млн га сільськогосподарських угідь (30,8 %), у т. ч. 10,6 млн га ріллі (31,6 %), а площі еродованої ріллі зростають приблизно на 70 тис.га.

За підрахунками, в Україні щороку втрачається від ерозії ґрунтів до 10-15 млн. т гумусу, 0,3-0,9 млн. т азоту, 0,7-0,9 млн. т фосфору, 6-12 млн. т калію, що сприяє збідненню ґрунтів та їх деградації. Втрати продукції землеробства від ерозії перевищують 9-12 млн. т зернових одиниць [108].

Комплексний моніторинг ґрунтів є необхідною умовою збереження родючості ґрунтів.

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Що називають ґрунтом?
2. Назвати основні компоненти ґрунту.
3. Дати визначення якості ґрунту.
4. Охарактеризувати показники якості ґрунту.
5. Назвати фізичні показники якості ґрунту.
6. Які показники якості ґрунту відносяться до хімічних?
7. Назвати біологічні показники якості ґрунту.
8. Які фактори впливають на якість ґрунту?
9. Що таке ерозія ґрунтів?
10. У чому полягає принцип оптичної емісійної спектроскопії з індуктивно зв'язаною плазмою?
11. У чому полягає принцип мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою?
12. Які існують типи ерозії ґрунтів?
13. Що таке вітрова ерозія, водна ерозія?
14. Чим пояснюється прискорена ерозія ґрунтів?
15. Проаналізувати наслідки ерозійних процесів.
16. Охарактеризувати рівень ерозійних процесів в Україні.

### *СЕМІНАР*

#### **Моніторинг якості ґрунту**

Відбивання ґрунту та фактори, що впливають на нього. Теоретичні моделі відбивання оптичного випромінювання від ґрунту. Вплив нерівності ґрунтової поверхні на відбивання ґрунту. Критерій Релея. Вплив хімічного складу ґрунту на його відбивання. Вплив фізичного складу ґрунту на його відбивання. Дистанційне зондування ґрунту: багатоспектральний сканер, лазерний вимірювач профілю ґрунту, лазерний картограф, раманівський та флуоресцентний лідари. Вимірювання та інтерпретація параметрів ґрунту: густина, солоність, рН. Оцінювання нітратів в ґрунті: методика, інтерпретація. Вимірювання процесів дихання ґрунту. Біологічні індикатори якості ґрунту. Фізичні індикатори якості ґрунту.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

### ІНДЕКС ЯКОСТІ ҐРУНТУ

Індекс якості ґрунту (*Soil Quality Index SoQI*) визначається за формулою [106]:

$$SoQI = 100 - \frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732}. \quad (1)$$

*F1* (розмах)

Фактор *F1*, який характеризує відношення кількості забруднюючих речовин, що не відповідають стандартам (локальним, регіональним чи державним)  $N_{HBC}$ , до загальної кількості  $N_3$  забруднюючих речовин у ґрунті, визначається за виразом:

$$F1 = \frac{N_{HBC}}{N_3}. \quad (2)$$

*F2* (частота)

Фактор *F2* представляє відношення кількості тестів  $T_{HBC}$ , результати яких не відповідають стандартам, до загальної кількості проведених тестів  $T_C$ :

$$F2 = \frac{T_{HBC}}{T_3}. \quad (3)$$

*F3* (амплітуда)

Якщо концентрація забруднювача  $C_{HBC}$  більша або менша, ніж стандартні значення  $C_C$ , рівень відхилення цього забруднювача від стандартного значення здійснюється за виразом:

$$E_i = \frac{(C_{HBC})_i}{C_{Ci}} - 1. \quad (4)$$

Після цього підраховується середня сума концентрацій як відношення суми всіх відхилень забруднювачів від стандартних значень до загальної кількості тестів, що не відповідають стандартам:

$$\langle C \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{T_{HBC}}. \quad (5)$$

Звідси можна визначити параметр *F3*, що характеризує кількість (амплітуду) тестів, що не відповідають стандартним значенням:

$$F3 = \frac{\langle C \rangle}{0,01 \langle C \rangle^{\varepsilon} - 0,01}. \quad (6)$$

Оцінювання рівня забруднення ділянки ґрунту, що досліджується, проводять за шкалою:



Рівні забруднення	Значення індексу якості ґрунту <i>SoQI</i>
Дуже низький	90-100
Низький	70-90
Помірний	50-70
Високий	30-50
Дуже високий	0-30

### Приклад

Результати аналізу забруднення ґрунту нафтовими вуглеводнями (НВВ) в Канаді (регіон Saskatchewan) наведено у таблиці. Тут нафтові вуглеводні НВВ складаються принаймні з чотирьох фракцій: F1 – C6-C10; F2 – C10-C16; F3 – C16-C34; F4 > 34.

Аналіз зразків ґрунту, забрудненого нафтовими вуглеводнями (НВВ)

[http://www.ccme.ca/assets/pdf/soqi\\_tech\\_report\\_e\\_1.1.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/soqi_tech_report_e_1.1.pdf)

Параметр	Західна стінка, мг/кг	Дно, мг/кг	Північна стінка, мг/кг	Підденна стінка, мг/кг	Стандартні значення
Глибина, м	2,4	5,3	2,4	3,0	–
Бензол	0,8	1,1	0,5	<b>40</b>	5,0
Етилбензол	27	0,8	4,7	<b>82</b>	50
Толуол	<b>100</b>	2,0	0,8	14	30
Ксилени	<b>180</b>	4,5	7,8	<b>220</b>	50
НВВ F1	820	96	140	<b>2840</b>	1000
НВВ F2	130	8,9	21	180	3000
НВВ F3	<5	<5	<5	<5	5000
НВВ F4	<5	<5	<5	<5	10000
Свинець	10	8	8	16	1000

Визначаємо фактор *F1*:

$$F1 = \frac{5}{9} \cdot 100 = 55,6.$$

Тут 5 – кількість забруднюючих речовин, що не відповідають стандартам (у таблиці це бензол, етилбензол, толуол, ксилени, НВВ F1); 9 – загальна кількість забруднюючих речовин у ґрунті, що досліджується.

Визначаємо фактор *F2*:

$$F2 = \frac{6}{36} \cdot 100 = 16,7.$$

Тут 6 – кількість тестів, результати яких не відповідають стандартам (результати цих тестів наведено у таблиці жирним шрифтом); 36 – загальна сума всіх тестів (9 забруднювачів×4 ділянки ґрунту).

Визначаємо фактор  $F3$ :

$$E_1 = \frac{(C_{HBC})_1}{C_{C1}} - 1 = \frac{40}{5} - 1 = 7;$$

$$E_2 = \frac{(C_{HBC})_2}{C_{C2}} - 1 = \frac{82}{50} - 1 = 0,64;$$

$$E_3 = \frac{(C_{HBC})_3}{C_{C3}} - 1 = \frac{220}{50} - 1 = 3,4;$$

$$E_4 = \frac{(C_{HBC})_4}{C_{C4}} - 1 = \frac{2840}{1000} - 1 = 1,84;$$

$$E_5 = \frac{(C_{HBC})_5}{C_{C5}} - 1 = \frac{100}{30} - 1 = 2,3;$$

$$E_6 = \frac{(C_{HBC})_6}{C_{C6}} - 1 = \frac{180}{50} - 1 = 2,6.$$

Звідки:

$$F3 = \frac{\langle C \rangle}{0,01 \langle C \rangle_{\xi=0,01}} = \frac{2,96}{(2,96 \ 0,01 \ 0,01)} = 74,8.$$

Отже, визначаємо за виразом ( \*) значення індексу якості ґрунту:

$$SoQI = 100 \frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732} = 100 - \frac{\sqrt{55,6^2 + 16,7^2 + 74,8^2}}{1,732} =$$

$$100 - 56 = 45.$$

Висновки:

1. Таке забруднення ґрунту відноситься до високого рівня;
2. Необхідна ремедіація ґрунту з точки зору вилучення бензолу, етилбензолу, толуолу, ксилолу та фракції НВВ  $F1$  (C6-C10).



## **ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ**

### **Визначення ерозійного індексу ґрунту. Універсальне рівняння втрат ґрунту.**

Швидкість краплин дощу досягає 9 м/с; під час падіння вони передають свою кінетичну енергію частинкам ґрунту, руйнуючи ґрунтові агрегати та пересуваючи частинки на відстань до 1 м. Ці частинки можуть транспортуватися на більші відстані водними потоками. Через те, що відстань транспортування залежить від розмірів частинок, відбувається просторове перенесення маси частинок, що супроводжується появою струмків, ярів та загальною зміною рельєфу ґрунту.

#### **Ерозійний індекс опадів**

Добуток кінетичної енергії дощових краплин та інтенсивності дощу за 30-хвилинний проміжок часу називається *ерозійним індексом опадів*:

$$R = 0,01E_k I_{30} = 0,01 \cdot 21 \text{ Дж./м}^2 \cdot \text{мм} \cdot 1 \text{ мм/хв} \cdot 30 \text{ хв} = 6,3 \text{ Дж/м}^2.$$

Цей індекс вимірюється в одиницях МДж·мм/га·год·рік, і отже варіює від 0-1700 до 8500 МДж·мм/га·год·рік.

В Україні типові значення інтенсивності дощу варіюють від 1 мм/хв для дрібного дощу до 9-12 мм/хв для зливи.

#### **Універсальне рівняння втрат ґрунту**

Універсальне рівняння втрат ґрунту (Revised Universal Soil Loss Equation RUSLE) має вигляд:

$$A = 2,24 R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P, \quad (1)$$

де  $R$  – ерозійний індекс опадів;  $K$  – фактор ерозійності ґрунту;  $LS$  – топографічний фактор;  $C$  – фактор покриву;  $P$  – фактор контролю за ерозією. Тут  $A$  вимірюється у т/га.

Добуток кінетичної енергії дощових краплин та інтенсивності дощу за 30-хвилинний проміжок часу називається *ерозійним індексом опадів*. Цей показник умовно враховує кінетичну енергію дощів за певний період максимальної інтенсивності їх випадання:

$$R = 0,01E_k I_{30} \quad (2)$$

Цей індекс вимірюється в одиницях МДж·мм/га·год·рік. Величина ерозійного індексу опадів варіює від 0-1700 до 8500 МДж·мм/га·год·рік.

Розглянемо універсальне рівняння, що описує втрати ґрунту за рахунок водної ерозії та фактори, що впливають на цю ерозію.

#### **Ерозійний фактор ґрунту $K$**

Далі визначають ерозійний фактор ґрунту  $K$ , який характеризує здатність частинок ґрунту бути виштовхнутими з маси ґрунту. Він залежить від текстури ґрунту, проникності ґрунту та його здатності поглинати воду.

Величина ерозійного фактору ґрунту $K$			
Текстура	Вміст органічної речовини		
	<0,5 %	2 %	4 %
Пісок	0,05	0,03	0,02
Суглинок	0,38	0,34	0,29
Мулуватий суглинок	0,48	0,42	0,38
Мул	0,60	0,52	0,43
Глина	0,13-0,29	0,13-0,29	0,13-0,29

Одиниця вимірювання ерозійного фактору ґрунту  $K$  – т·га·г/га·МДж·мм.

Числові значення, які може приймати індекс  $K$ , варіюють від 1 (ґрунт легко піддається еродованості) до 0,01 (дуже стійкий до ерозії ґрунт).

### Топографічний фактор $LS$

Цей фактор безрозмірний. Він характеризує вплив довжини ґрунтової ділянки та крутизни її нахилу, яка впливає на швидкість руху води.

Топографічний фактор $LS$				
Нахил, %	Довжина ґрунтової ділянки, м			
	7,6	22,9	46,7	91,4
1	0,09	0,12	0,15	0,18
5	0,27	0,46	0,66	0,93
12	0,90	1,6	2,2	3,1
30	4,0	6,9	9,7	14,0

Фактор градієнту нахилу  $S$  являє відношення втрат ґрунту, який оцінюється, на ділянці довжиною 22,1 м, порівняно з такою ж ділянкою, що має нахил 9 %.

Нахил може вимірюватися у градусах або відсотках:

$\theta = \arctg(S/100)$ ;  $S = 100 \operatorname{tg} \theta$ . Наприклад:  $\theta = 450$ ;  $S = 100$  %.

### Фактор покриття та менеджменту $C$

Покриви різної природи зберігають ґрунт. Варіює цей фактор від 0,001 для добре захищеного ґрунту до 1 для голого ґрунту. Цей фактор регулюється людиною.

Вегетаційні умови	Фактор покриття та менеджменту $C$
Бавовна, 80 % покрив	0,60
Кукурудза, мульчування, 40 % покрив	0,21
Кукурудза, мульчування, 90 % покрив	0,05
Неторканий ліс, 90-100 % підстилка	0,001-0,0001
Пасовище, 95 % трав'яний покрив	0,003

### Фактор, що враховує контроль ерозії $P$

Якщо цей фактор дорівнює 1, контроль за ерозією відсутній.

Нахил, %	Максимальна довжина контуру, м	Фактор $P$
1-2	122	0,60
3-5	91,4	0,50
6-8	61,0	0,50
9-12	36,6	0,60
13-16	24,4	0,70
21-25	15,2	0,90

Отже, універсальне рівняння втрат ґрунту (Universal Soil Loss Equation) має вигляд:

$$A = 2,24 R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P,$$

де  $A$  вимірюється у т/га.

Запобігти водну ерозію можна за допомогою спеціальних заходів щодо захисту ґрунту та контролю за протіканням ерозії. Наприклад, вважається доцільним не залишати голою ріллю, а покривати ґрунт залишками врожаю.

### Приклад:

Підрахувати щорічні втрати ґрунту завдяки водній ерозії за допомогою RUSLE за такими даними:

$$R = 1275 \text{ Мдж}\cdot\text{мм/га}\cdot\text{год}\cdot\text{рік}$$

$$K = 0,24 \text{ т}\cdot\text{га}\cdot\text{г/га}\cdot\text{МДж}\cdot\text{мм}$$

$$LS = 2,89$$

$$C = 1,0$$

$$P = 1,0$$

$$A = ?$$

### Розв'язання

$$\begin{aligned} A &= 2,24 R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P = \\ &= 1275 \text{ МДж}\cdot\text{мм/га}\cdot\text{год}\cdot\text{рік} \cdot 0,24 \text{ т}\cdot\text{га}\cdot\text{год/га}\cdot\text{МДж}\cdot\text{мм} \cdot 2,89 \cdot 1 \cdot 1 = 884 \text{ т/га}\cdot\text{рік}. \end{aligned}$$



## 27. МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ВОДИ

### 27.1. Властивості води

Вода – найпростіша стійка хімічна сполука водню та кисню, за нормальних умов – безбарвна рідина без запаху. Вода є найбагатшим компонентом біосфери та водночас – найважливішим, оскільки являє собою основне середовище для будь-яких метаболічних процесів. З точки зору екології вода використовується для вилучання та розчинення більшості природних і антропогенних відходів.

#### 27.1.1. Механічні властивості води

Значення густини води наведено в табл. 27.1.

Таблиця 27.1 – Густина води залежно від температури

Густина, кг/м <sup>3</sup>	Температура, °С
999,8	0
1000,0	4
999,7	10
998,2	20
995,6	30
992,2	40
983,2	60
971,8	80

Вода є єдиною сполукою, яка під час охолодження розширюється; отже густина льоду менша, ніж густина води. Через це лід знаходиться на поверхні водойм, що дає можливість зберегти життєдіяльність водних організмів в умовах охолодження

#### 27.1.2. Гідродинамічні властивості води

Вода є чудовим розчинником, здатним розчинювати велику кількість сполук. З точки зору охорони навколишнього середовища ця властивість води сприяє кращому постачанню поживних речовин у живі організми та виведенню відходів.

Вода відзначається високим поверхневим натягом ( $72,75 \cdot 10^{-3}$  Н/м при 20 °С). Завдяки цьому відбувається капілярні явища у порах ґрунту та у стеблинах рослин, що обумовлює транспортування поживних речовин з ґрунту в рослину.

Вода характеризується *когезією* – злипанням частин одного й того самого твердого тіла або рідини при їхньому контакті та *адгезією* – здатністю злипатися з поверхнями інших тіл.

У рідкій фазі молекули води утворюють невеликі групи об'єднаних частинок. Саме ці утворення зумовлюють рухливість та текучість води.

### 27.1.3. Теплофізичні властивості

Вода характеризується унікальними теплофізичними властивостями, а саме: температурою замерзання води (273,16 К або 0 °С), температурою кипіння (373,16 К або 100 °С); високою теплотою випаровування ( $2,26 \cdot 10^6$  Дж/кг); високою теплоємністю (4186 Дж/кг·К) та коефіцієнтом теплопровідності (0,599 Вт/м·К при 20 °С); безперервним рухом частинок води та турбулентним їх перемішуванням.

### 27.1.4. Електричні властивості

Важливою характеристикою води є її висока діелектрична проникність. Ця ознака свідчить про те, що електричні сили між розчиненими у воді речовинами слабкі. Крім того, з точки зору електричних властивостей вода як неполярна молекула являє собою диполь – сукупність двох рівних, але протилежних за знаком зарядів, що знаходяться на певній відстані та характеризується дипольним моментом. Дія зовнішнього електричного поля пропорційна моменту диполя; звідси виникає здатність неполярних молекул води поглинати довгохвильове випромінювання земної поверхні і брати участь у парниковому ефекті.

Діелектрична проникність води є майже сталою величиною (близько 80), тоді як діелектрична проникність ґрунту дуже чутлива до об'ємної вологості ґрунту. Цю властивість використовують для визначення вологості ґрунту.

### 27.1.5. Оптичні властивості

Вода є прозорим тілом для оптичного випромінювання видимого діапазону. Коефіцієнт поглинання дистильованої води характеризується мінімумом в області 400–500 нм; коефіцієнт розсіювання демонструє спад від короткохвильової до довгохвильової області спектра.

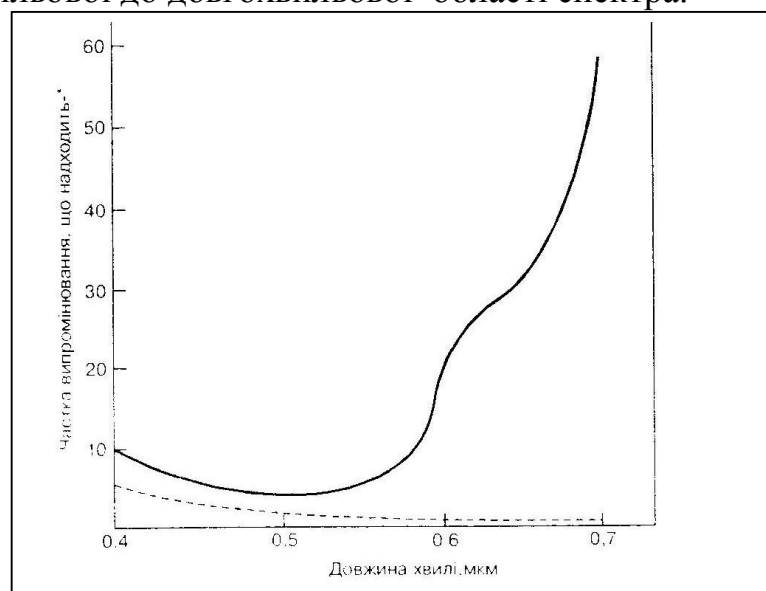


Рис. 27.1. Спектри поглинання (суцільна лінія) та розсіювання (переривчаста лінія) води

Саме тому оптичне випромінювання проникає на значні глибини, що зумовлює нагрівання води у шарі товщиною до декількох метрів. На оптичні характеристики води можуть впливати розчинені у ній солі та органічні речовини ( $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ), бактеріо-, фіто- і зоопланктон, замулена речовина. Оптичні характеристики води пов'язані з її каламутністю, яка в свою чергу залежить від розсіювання та поглинання оптичного випромінювання на частинках глини, бруду, кремнію, іржі, а також на водоростях та бактеріях. Вплив присутніх у воді розчинених речовин, забруднень та мікроорганізмів на спектральні параметри води може бути використаний для дистанційного зондування водойм.

## 27.2. Водні ресурси

Понад 70 % земної поверхні вкрито водою. Оцінки свідчать про те, що гідросфера містить близько 1,36 млрд км<sup>3</sup> води, серед яких 97,2 % займає океан, 2,15 % - лід, 0,65 % – вода земної суші та атмосфери. Якщо розтопити весь лід – рівень води підійметься на 70 м. Вода є необхідним компонентом живих організмів (50-97 % ваги тварин та рослин, 70 % - тіла людини). Циркуляція охоплює усі *водні ресурси* – придатні для використання води Землі (річкові, озерні, морські, підземні, вологість ґрунту, водяні пари атмосфери та ін.).

Забезпеченість країни водними ресурсами, наявність суднохідних рік, виходу до морів тощо значною мірою зумовлюють темпи її соціального та економічного розвитку.

З цієї точки зору Україна розташована у досить сприятливих умовах: її омивають Чорне та Азовське моря, на її території зареєстровано 71 тис. річок, що мають загальну довжину 243 тис. км. Більшість з них належить до басейнів Чорного та Азовського морів. В Україні є 3 тис. озер загальною площею водного дзеркала 2 тис. км<sup>2</sup>, 23 тис. ставків та водосховищ, особливо багато їх у районі середнього та нижнього Дніпра. Однак їх наявність не означає, що водні ресурси невичерпні.

### 27.2.1. Ґрунтові води

До ґрунтових відносяться води, що просмоктуються через ґрунтові пори з земної поверхні. Ґрунтові або мінеральні утворення, які насичуються водою, являють собою водні резервуари або водоносний горизонт. Зазвичай, вода відкачується з цих горизонтів за допомогою колодязів. На швидкість, з якою вода рухається через ґрунтові пори, впливають розміри пор, в'язкість води та інші фактори. Можна казати, що швидкість руху ґрунтової води варіює від 1 м/день до 1 м/рік.

Ґрунтові води також можуть бути забрудненими, але ремедіація цих вод довготривала та складна. Більшість патогенних організмів вилучаються з цих вод ґрунтовими частинками завдяки їх фільтруючій дії. Саме тому не так багато зусиль треба витратити, щоб довести якість ґрунтових вод до стандартів якості питної води. Колодязна вода, незважаючи на її обмежену



кількість, характеризується однорідною якістю та прозорістю, але вимагає процедури зм'якшення води.

### **27.2.2. Поверхневі води**

До поверхневих слід віднести води річок та озер. Основним недоліком поверхневих вод є можливість їх забруднення промисловими та муніципальними викидами та стоками, ґрунтовій ерозії. Надмірне постачання поживних речовин викликає спалахи розмноження водоростей, що призводить до евтрофікації водойм. Надмірна каламутність та численні забруднення викликають небажані смак, запах та колір води.

### **27.2.3. Стічні води**

*Стічні води* – побутові, промислові, забруднені відходами промисловості води, які відводяться з території населених пунктів та промислових об'єктів через каналізацію. Водні ресурси спроможні забруднюватися через каналізаційні або індустріальні викиди. Муніципальні стічні води являють собою складну суміш води (понад 99%) з органічними та неорганічними забруднювачами, суспендованими або розчиненими у воді. Основними компонентами стічних вод є мікроорганізми, тверді речовини, неорганічні компоненти, синтетичні хімічні препарати, органічні речовини.

Склад стічних вод варіює, але основними компонентами є: вода (95 %), патогени (бактерії, віруси, паразитичні черв'яки), непатогенні бактерії (> 100,000/ml), органічні частинки (фекалії, волосся, харчові залишки, папір, рослинні тканини, гумус), розчинені органічні речовини (сеча, цукри, білки, медикаменти), неорганічні речовини (пісок, метал, кераміка), розчинені неорганічні речовини (аміак, сіль, сульфід водню), живі організми (найпростіші, водорості, дрібні риби), макроскопічні тверді предмети, гази, емульсії, токсини (пестициди, отрути).

## **27.3. Забруднення води**

### **27.3.1. Класифікація забруднюючих речовин**

За даними ЕРА (Environmental Protection Agency), лише у США знайдено близько 700 різних хімічних сполук у водопровідній воді, серед яких 129 вважаються вкрай небезпечними. Вживання води, забрудненої патогенними бактеріями, вірусами або паразитами, може викликати такі захворювання як холера, черевний тиф, шистосоматоз, дизентерія та інші шлунково-кишкові захворювання.

На сьогоднішній день 1,2 млрд мешканців земної кулі приречені пити забруднену воду, через що щорічно захворювають 250 млн осіб та гинуть від хвороб, викликаних забрудненою водою, близько 5-10 млн осіб, переважно діти [109].

До основних забруднюючих речовин води можна віднести хімічні, біологічні, механічні, радіоактивні та теплові.

До *хімічних* забруднюючих речовин слід віднести органічні субстанції, такі як детергенти (миючі засоби), побічні продукти дезинфекції (на-

приклад, хлороформ), харчові відходи, пестициди, нафтові вуглеводні, у тому числі паливо (бензин, дизельне паливо, керосин для реактивних двигунів, мазут, мастила), леткі органічні сполуки, хлоровані розчинники, рідини неводної фази (*Non-Aqueous Phase Liquids* або *NAPL*), густина яких перевищує густина води та які не змішуються і не розчинюються у воді.

До складу хімічних забруднюючих речовин входять неорганічні субстанції: оксиди азоту та сірки, індустриальні відходи, добрива, що містять нітрати та фосфати, важкі метали, седименти.

Побічні продукти дезинфекції ППД, які утворюються внаслідок додавання дезинфікуючих засобів у воду, є потенційно токсичними або канцерогенними. Слід відрізнити такі ППД як тригалогенометани, хлорат, хлорит, бромат та ін.

*Біологічні* забруднення включають патогенні мікроорганізми: бактерії, віруси, найпростіші, водорості. Серед основних біологічних забруднювачів можна виділити *Burkholderia pseudomallei*, *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia*, *Salmonella*, *Novovirus* та інші віруси, гельмінти.

*Механічні* забруднення містять викиди нерозчинних твердих мінеральних речовин, що виникають при розробці шахт та кар'єрів, ерозії ґрунту, інтенсивному сільському господарстві, зливах, снігопадах. Причиною механічного забруднення водойм можуть бути також пластикові вироби. Неорганічні та органічні частинки адсорбують хімічні сполуки, збільшують каламутність води та сповільнюють швидкість фотосинтезу.

*Радіоактивні* забруднення включають природні радіоактивні матеріали, відходи, що виникають внаслідок видобування, збагачення копалин, обробки та експлуатації ядерного палива.

*Теплові* забруднення викликаються розсіюванням у довкілля вихідної енергії у вигляді підігрітої води та гарячих газів внаслідок експлуатації теплових і атомних електростанцій. Збільшення температури води призводить до зміни кисневого режиму, збільшення випаровування з поверхні, змін умов існування гідрофауни, гідрофлори та бентосу водойми, викликає «цвітіння» води, призводить до акумуляції стійких забруднюючих речовин. Крім того, з підвищенням температури води пов'язане зменшення вмісту розчинених в ній кисню, азоту, вуглекислого газу. Усі ці зміни гідрологічних, гідрохімічних та гідробіологічних показників можуть викликати несподівані наслідки для водних організмів та спричинити загальну зміну екологічного стану водного об'єкта.

Окремим видом забруднень слід вважати хімічні сполуки, що можуть бути використані терористами: нервово-паралітичні отруйні речовини (VX, зарин, зоман), ціаніди, радіонукліди тощо.

### **27.3.2. Евтрофікація**

Процес підвищення рівня первинної продукції водойм внаслідок збільшення у них концентрацій біогенних речовин (азоту, фосфору) називається *евтрофікацією*. Під первинною продукцією слід розуміти в першу чергу продукцію зелених рослин. Можна виділити такі основні етапи ев-

рофікації. Спочатку у водоймі накопичуються значні кількості мінеральних солей, які приносяться водами річок, струмків та внаслідок природної ерозії. Збагачення вод поживними елементами сприяє інтенсивному росту водоростей; виникають потужні спалахи фітопланктону. У той же час можлива послідовна зміна популяцій водоростей з переваженням синьо-зелених та зелених водоростей. Збільшення біомаси фітопланктону викликає погіршення прозорості води; фотосинтез протікає лише у приповерхневому шарі, оскільки тільки у ньому водорості забезпечуються сонячною енергією. Далі відбувається відмирання значної маси водоростей, що супроводжується значним зменшенням кисню у нижніх шарах водойми. Після повного зникнення кисню починається процес анаеробного (без участі повітря) бродіння.

Розростання водоростей змінює смак, запах, колір води, призводить до непривабливого вигляду водойм, збільшує рН води, викликає дерматит та кон'юнктивіт у плавців.

Запобігти процесу евтрофікації можна завдяки застосуванню сучасних методів очистки стічних вод від фосфатів, заборони або обмеженню використання фосфатів як компонентів побутових детергентів та миючих засобів, контролю за забрудненням місцевості від гною та агрохімікатів, транспортуванню стічних вод у швидкі потоки або море, очистки дна водойми від седиментів, віддаленню надлишкової маси водоростей з водойми, забезпеченню аерації водних резервуарів та озер.

### **27.3.3. Транспортування та поширення забруднюючих речовин**

Транспортування та поширення забруднюючих речовин у навколишньому середовищі характеризуються такими основними процесами як:

*адвекція* – переміщення речовини під час руху рідини завдяки градієнту потенціалу рідини. Як приклад можна навести переміщення молекул забруднюючих речовин, розчинених у воді, за рахунок інфільтрації через ґрунт або стоків вздовж поверхні ґрунту;

*дисперсія* – поширення речовини від центру маси забруднювача завдяки дифузії або градієнту концентрацій;

*міжфазне перенесення маси* – перенесення забруднюючих речовин завдяки сорбції, транспортуванню речовини з однієї фази у другу через поверхню розділу фаз або випаровуванню;

*реакції перетворення* – зміна фізико-хімічної природи хімічної сполуки (наприклад, біоперетворення або гідроліз).

Усі ці процеси або їх комбінації визначають активність забруднюючих речовин у навколишньому середовищі, їх потенціал та стійкість, тобто здатність бути небезпечними впродовж тривалого проміжку часу.

#### **27.3.4. Важкі метали**

Важкі метали є природними компонентами земної кори. Вони не здатні до деградації або руйнування, але демонструють тенденцію до накопичення в організмі. У невеликих кількостях важкі метали поступають у наш організм через продукти харчування, питну воду та повітря. Наявність у слідових кількостях таких важких металів як мідь, селен, цинк вкрай суттєва для забезпечення обміну речовин людського організму. Втім, висока концентрація важких металів в організмі може призвести до отруєння.

Так, наприклад, Cr (III) є важливим мікроелементом, який майже не розчиняється у воді. Але його окиснена форма Cr(VI) характеризується розчинністю в воді та мутагенними та канцерогенними властивостями. Найбільш небезпечними важкими металами є кадмій, свинець, ртуть.

Ртуть не присутня в живих організмах, але її сполуки, такі як монометилртуть та диметилртуть є вкрай токсичними та можуть викликати нейротоксичні порушення.

Як приклад можна навести хворобу Мінамата – неврологічний синдром, який викликаний важким отруєнням сполуками ртуті та проявляється в онімінні рук та ніг, загальній слабкості м'язів, звуженні поля зору та пошкодженні слуху та мовлення. У крайніх випадках можливі божевілля, параліч, кома та смерть через кілька тижнів після появи симптомів.

Хвороба Мінамата була вперше виявлена у 1956 році та отримала таку назву завдяки місту Мінамата у префектурі Кумамото, Японія, де мали місце викиди промислових стічних вод в затоку Мінамата хімічним заводом (Chisso Corporation) упродовж 1932-1968 років. Токсичні ртутні сполуки накопичувалися у морських організмах (молюсках та рибі), після чого попадали до організму місцевих мешканців та викликали отруєння.

Якщо стандартна доза токсичних ртутних сполук становить 0,4 ppm, то для людини масою 50 кг достатньо споживати близько 0,5 кг риби упродовж одного року, щоб стати пацієнтом хвороби Мінамата.

### **27.4. Якість води**

#### **27.4.1. Питна вода**

Сукупність фізичних, хімічних та біологічних характеристик води, які розглядаються порівняно із існуючими стандартами, називається *якістю води*.

Вода як універсальний розчинник може розчиняти різноманітні органічні та неорганічні компоненти, присутні у навколишньому середовищі. Ці компоненти можуть бути у рідкому, газоподібному стані або у вигляді завислих частинок.

Водний цикл бере участь у змішуванні всіх цих компонентів завдяки процесам випаровування, затвердіння (формування льоду), опадів.

Під час випаровування вода залишає всі розчинені речовини, але може поєднуватися з леткими сполуками. Як газ, водяна пара може легко проникати у ґрунт. Водночас лід не демонструє здатності рухатися у навколишньому середовищі.

Фізичний, хімічний та біологічний склад води визначає її якість. Наприклад, свіжа поверхнева вода повинна мати кальцій у межах 1-250 мг/л, тоді як концентрація ртуті понад 1 нг/л вже небезпечна. Хоча у воді міститься забагато хімічних сполук та живих організмів, лише близько 300 з них є об'єктами моніторингу поверхневих вод.

Отже, чиста вода – це прозора, прохолодна, приємна на смак рідина, без сторонніх присмаків та запахів, з таким хімічним складом, при якому тривале та постійне вживання не викликає негативного впливу на здоров'я людини.

*Питна вода*, призначена для споживання людиною, – вода, склад якої за органолептичними, фізико-хімічними, мікробіологічними, паразитологічними та радіаційними показниками відповідає вимогам державних стандартів та санітарного законодавства (з водопроводу – водопровідна, фасована, з бюветів, пунктів розливу, шахтних колодязів та каптажів джерел), призначена для забезпечення фізіологічних, санітарно-гігієнічних, побутових та господарських потреб населення, а також для виробництва продукції, що потребує використання питної води.

Питна вода – це вода високої якості, придатна для споживання без ризику миттєвих або довготривалих наслідків для здоров'я людини. У багатьох розвинених країнах вода, що постачається до житлових будинків, для комерційних та промислових потреб, є питною.

Втім, у багатьох країнах світу люди п'ють воду, забруднену патогенами та розчиненими забруднювачами.

#### **27.4.2. Нормативи та стандарти якості питної води**

Вода характеризується розмаїттям фізичних, хімічних і біологічних субстанцій. З моменту конденсації у вигляді дощу вода розчиняє хімічні сполуки, що оточують її в атмосфері, проходить через ґрунт, взаємодіє з живими організмами. Саме через це вода має підлягати обробці з метою доведення її якості до рівнів, при яких вона може споживатися людиною.

Державні стандарти на питну воду визначають перелік мікробіологічних, паразитологічних, органолептичних, фізико-хімічних, санітарно-токсикологічних та радіологічних показників якості питної води, що підлягають обов'язковому контролю, їх гранично допустимі величини, додержання яких є безпечним для життя і здоров'я людини.

Так, у Сполучених штатах моніторинг якості води почався з прийняття законодавчих актів (Clean Water Act, 1948 та Safe Drinking Water Act, 1974, з поправками 1989 та 1996 рр.), відповідно яким були розроблені Первинні та Вторинні стандарти якості питної води [110-112].

Первинні стандарти включають стандарти на неорганічні та органічні сполуки, побічні продукти дезінфікуючих засобів, дезінфікуючі засоби, радіонукліди та мікроорганізми. Сюди слід також віднести стандарти на леткі та синтетичні органічні сполуки.

Стандарти Європейського Союзу (1998) [113,114] включають хімічні параметри, показники якості та мікробіологічні параметри.

Стандарти на питну воду Міжнародної Організації Здоров'я (1993) [114,115] роблять акцент на катіонному та аніонному складі питної води, мікробіологічних та інших параметрах.

В Україні у 2010 р. затверджено Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) [116]. Згідно із стандартами України гігієнічну оцінку безпечності та якості питної води проводять за показниками епідемічної безпеки (мікробіологічні, паразитологічні), санітарно-хімічними (органолептичні, фізико-хімічні, санітарно-токсикологічні) та радіаційними показниками.

*Мікробіологічні показники* – показники епідемічної безпеки питної води, перевищення яких може призвести до виникнення інфекційних хвороб у людини.

*Паразитологічні показники* – показники епідемічної безпеки питної води, перевищення яких може призвести до виникнення паразитарних інвазій у людини.

*Органолептичні показники* – (запах, смак та присмак, забарвленість, каламутність) – фізичні властивості питної води, що сприймаються органами чуття.

*Фізико-хімічні показники* – фізичні чи хімічні показники, що нормуються за загальносанітарною чи органолептичною ознакою шкідливості.

*Санітарно-токсикологічні показники* – хімічні показники, що нормуються за санітарно-токсикологічною ознакою шкідливості.

*Радіаційні показники* – показники, що характеризують властивість води, зумовлену наявністю радіонуклідів.

Порівняльний аналіз існуючих стандартів якості питної води вищезгаданих організацій наведено у табл. 27.2.

#### 27.2. Порівняльний аналіз існуючих стандартів якості питної води

<b>Неорганічні компоненти (мг/л)</b>				
	WHO	EU	EPA	МОЗ України
Алюміній	0,2	0,2		0,2
Амоній	-	0,50		0,5
Сурма	0,005	0,005	0,006	0,005
Миш'як	0,01	0,01	0,01	0,01
Барій	0,3	-	2,0	
Берилій	-	-	0,004	0,0002
Бор	0,3	1,00		0,5
Бромати	-	0,01	0,01	
Кадмій	0,003	0,005	0,005	0,001
Хром	0,05	0,05	0,1	

Мідь	2,0	2,0	1,3	1,0
Залізо	-	0,2		0,2
Свинець	0,01	0,01	0,015	0,010
Марганець	0,5	0,05		0,05
Ртуть	0,001	0,001	0,002	0,0005
Молібден	0,07	-		
Нікель	0,02	0,02		
Азот(загальний)	50	-		
Селен	0,01	0,01	0,05	
Срібло	-	-		-
Натрій	200	200		200
Олово	-	-		
Уран	1,4	-		
Цинк	3	-		1,0
Хлор	250	250		1,2
Ціанід	0,07	0,05	0,2	0,05
Фториди	1,5	1,5		0,7-1,5
Сульфати (SO <sub>4</sub> )	500	250		
Нітрати (NO <sub>3</sub> )	Див. азот	50	10	50
Нітрити (NO <sub>2</sub> )	Див. азот	0,50	1	0,5
<b>Органічні компоненти (мг/л)</b>				
	WHO	EU	EPA	МОЗ України
Інсектициди, гербициди			Від < 0,001 до 0,7	
Розчинники (хлоровані, нехлоровані)			Від > 0,001 до 0,07	
Різні органічні сполуки			Від 0,00003 мкг/л до 0,1	
<b>Радіонукліди</b>				
	WHO	EU	EPA	МОЗ України
Радій 226-228			5 пКі/л	1 Бк/м <sup>3</sup>
Сумарна активність альфа-частинок			15 пКі/л	0,1 Бк/м <sup>3</sup>
Сумарна активність бета-частинок			4 мрем/рік	1,0 Бк/м <sup>3</sup>
Сумарна активність природної суміші ізотопів урану 234+238			0,030	1 Бк/м <sup>3</sup>

Питома активність Rn 222				100 Бк/м <sup>3</sup>
Питома активність Cs 137				2 Бк/м <sup>3</sup>
Питома активність Sr 90				2 Бк/м <sup>3</sup>
<b>Мікроорганізми (мл)</b>				
	WHO	EU	EPA	МОЗ України
<i>Escherichia coli</i>	-	0-250	-	-
Ентерококи	-	0-250	-	-
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	-	0-250	-	-
<i>Clostridium perfringens</i>	-	0-100	-	-
Загальні коліформи	-	0-100	Не більше, ніж 5% +ТТ	-
Загальне мікробне число при 22 °С	-	100	-	-
Загальне мікробне число при 37 °С	-	20	-	-

Вторинні стандарти визначають критерії, які враховують вплив запаху, смаку, корозії, кольору води на комфорт людини (але не на здоров'я).

### 27.3. Вторинні стандарти питної води [112]

Забруднююча речовина	Рівень, мг/л	Ознаки та вплив
Алюміній	0,05-0,2	Знебарвлення води
Хлорид	250	Смак, корозія труб
Колір	15 кольорових одиниць	Неестетичний вигляд
Мідь	1	Смак, забарвлення порцеляни
Корозійна активність	Відсутня	Корозія труб
Фториди	2,0	Флуороз
Піноутворювачі	0,5	Неестетичний вигляд
Залізо	0,3	Смак, забарвлення білизни
Марганець	0,05	Смак, забарвлення білизни
Запах	Бали	Неестетичні враження



рН	6,5-8,5	Корозія
Срібло	0,1	Зміна кольору шкіри
Сульфати	250	Смак, послаблююча дія
Загальна кількість розчинених твердих речовин	500	Смак, корозія
Цинк	5	Смак

## *СЕМІНАР*

### **Моніторинг якості води**

Живий організм та потреби у воді, нестача води у світі. Україна та її забезпеченість питною водою. Види та характеристики бутильованої води. Мінеральна вода (природна та підготовлена), газована вода. Техніка очищення води. Екранування. Седиментація. Коагуляція. Флокуляція. Фільтрація. Система очищення води в Україні та Києві. Міжнародні та українські стандарти якості питної води. Якість води для потреб сільського господарства. Контроль якості ґрунтової води. Щорічні та щоденні потреби у воді. Джерела водних ресурсів: ґрунтові та поверхневі води. Методи дезінфекції питної води та їх порівняльний аналіз: хлорування, озонування, ультрафіолетове опромінювання води. Транспортування, розподіл та зберігання води. Інформація на етикетках водних пляшок («паспорт» пляшки). Якість води та здоров'я людини. Унікальні властивості хрещенської води.

#### **27.4.3. Нормативи та стандарти якості питної води**

Ці стандарти передбачають критерії щодо захисту водойм, таких як озера, річки, струмки у специфічних географічних регіонах та екорегіонах.

Наприклад, концентрація азоту, фосфору, хлорофілу, каламутність впливають на процеси евтрофікації та спалахи росту водоростей.

Дозволені концентрації поживних речовин у екорегіонах коливаються у межах: 10-80 мкг/л для фосфору; 0,1-2 мг/л для азоту; 1-4 мкг/л для хлорофілу; 1-18 з точки зору каламутності в одиницях FTU.

Токсичні субстанції та високі рівні популяцій деяких мікроорганізмів у воді, що використовується для іригації, у плавальних басейнах, промислових спорудах, можуть складати небезпеку для здоров'я людини.

#### **27.4.4. Якість води для сільського господарства**

Стандартів для води, що використовується для потреб сільського господарства, не існує. Враховуються критерії, що забезпечують захист урожаю та ґрунту. Розчинені тверді речовини, які називають узагальненим терміном «солі», слід враховувати у першу чергу.

#### **27.4.5. Відбір проб зразків води**

*Підземні води.* Основною метою відбирання зразків підземних вод є отримання зразків, які відповідають умовам того ґрунтового шару, де зна-

ходяться ці води. На властивості цих зразків впливає ряд факторів, які треба враховувати під час реалізації процесу збирання зразків.

Зазвичай, моніторинг підземних вод здійснюється за допомогою мережі колодязів або свердловин, розташування може впливати на результати моніторингу. Наприклад, колодязі, що розташовані занадто далеко один від одного, можуть не надати інформацію щодо можливої локалізації забруднення. Крім того, слід враховувати характер однорідності ґрунту, наявність гідравлічних градієнтів та розташування ґрунтових вод. Для збирання зразків підземних вод можливо застосування ковшів, шприців, насосів.

*Поверхневі води.* Слід відзначати два способи збирання та аналізу зразків води: аналіз води *in situ* (тобто на місці) у реальному часі та *ex situ*, коли зразок вилучається з водойми та транспортується у вимірювальну лабораторію для подальшого аналізу.

Перший спосіб базується на застосуванні портативних приладів; процес вимірювань швидкий, але не завжди точний порівняно зі стандартними лабораторними методами. Крім того, польові вимірювання не дають можливості автоматизувати процес аналізу води.

Другий спосіб передбачає застосування банок чи пляшок для збирання зразків води на певних глибинах. Так, прилад Ван Дорна для збирання зразків води представляє собою циліндр, обладнаний клапанами, що відкриваються на певній глибині за допомогою шнура.

## **27.5. Моніторинг *in situ* якості поверхневих вод**

Серед основних параметрів якості поверхневих природних вод, які визначаються *in situ* варто зазначити рН, солоність, концентрацію розчиненого кисню, окисно-відновний потенціал, каламутність, температуру, потік течії. Вимірювання деяких параметрів якості (рівня рН та електропровідності для визначення солоності води) було розглянуто у роботі [18]. Розглянемо вимірювання решти параметрів.

### **27.5.1. Концентрація розчиненого кисню**

Природні води, які знаходяться у рівновазі з атмосферою, містять розчинений кисень (РК) у діапазоні концентрацій від 14,5 до 5 мг О<sub>2</sub> на літр залежно від температури, солоності та широти місцевості. Розчинений кисень потрапляє у воду з атмосфери завдяки процесам дифузії, аерації та як продукт фотосинтетичної активності рослинного покриву.

Аналіз розчиненого кисню дуже важливий, оскільки надає інформацію щодо біологічних та біохімічних процесах, що відбуваються у водоймах. Крім того, концентрація РК є серйозним параметром у рибництві.

Вимірювання розчиненого кисню здійснюється завдяки застосуванню електрометричної техніки, яка базується на гальванічних або вольтамперних мембранних сенсорах. Типовий пристрій (*електрод Кларка*) наведено на рис. 23.2. Він складається з платинового катода у формі диску, на якому підтримується потенціал  $-0,6$  В по відношенню до кільцеподібного

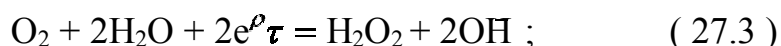
срібного аноду та тонкої (близько 20 мкм товщиною) мембрани, виконаної з поліетилену або тefлону. Електроди занурені у буферний розчин електроліту  $KCl$ , причому проміжок між електродами та мембраною, заповнений цим розчином, має товщину близько 10 мкм.

Коли пристрій занурюють у воду, якість якої аналізується, молекулярний кисень дифундує через мембрану та плівку електроліту та під впливом прикладеної напруги бере участь у таких електрохімічних реакціях:

а) на катоді



б) на аноді



Завдяки  $KCl$  електроліту складається замкнутий електричний ланцюг, по якому протікає електричний струм, якщо подати на електроди напругу. Цей результуючий струм прямо пропорційний концентрації молекулярного кисню у розчині.

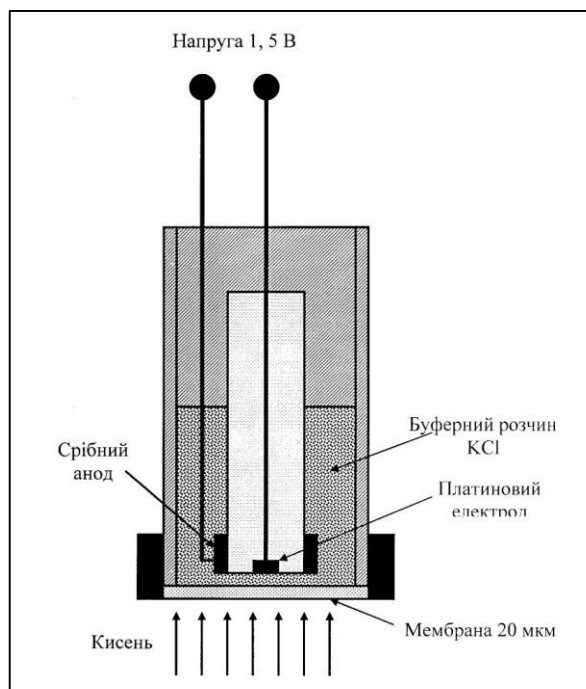


Рис. 27.3. Електрод Кларка

### 27.5.2. Каламутність води

Оптичні властивості води визначаються показниками ослаблення  $\epsilon$ , поглинання  $\alpha$  та розсіювання  $\beta$ . В ультрафіолетовій та видимій ділянках спектра (250–800 нм) коефіцієнти ослаблення та поглинання мають мінімум в області 400–500 нм; коефіцієнт розсіювання демонструє спад від короткохвильової до довгохвильової області спектра. На оптичні характерис-

тики води можуть впливати розчинені у ній солі та органічні речовини ( $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ), бактеріо-, фіто- і зоопланктон, змулена (гідрозоль) речовина. Оптичні характеристики води пов'язані з її каламутністю.

*Каламутність* – це відносна прозорість води, яка в свою чергу залежить від розсіювання та поглинання оптичного випромінювання на частинках глини, бруду, кремнію, іржі, а також на водоростях та бактеріях. Високий рівень каламутності викликається ерозією ґрунту, викидами стічних вод, спалахами росту водоростей, активністю риб, зливами, людською активністю, яка призводить до порушення земної поверхні (під час будівництва).

*Вплив каламутності на довкілля.* Каламутні води містять віруси або бактерії, що викликають гастроентерологічні захворювання у людини, оскільки мікроорганізми адсорбуються суспендованими частинками; вони інгібують розвиток водної фауни та флори. Сонячне випромінювання не проходить до глибинних шарів водойми, через що фотосинтетична активність водних рослин обмежується. Кількість рослин, які використовуються водними мешканцями у процесі харчування, зменшується. Поширюється кількість синьо-зелених та інших рухливих водоростей, які споживають кисень, а це пригнічує життєві умови для риб.

Оскільки суспендовані частинки поглинають сонячне випромінювання, вода нагрівається; теплі води містять менше кисню, ніж холодні. Крім того, суспендовані частинки утруднюють процеси дихання риб, заважають розвитку ікри. Колір каламутних вод змінюється від майже білого до темно-коричневого або зеленого.

*Оцінювання каламутності.* За стандартну одиницю каламутності води приймають *нефелометричну одиницю каламутності* (NTU, Nephelometric Turbidity Units у США та FNU, Formazin Nephelometric Unit за міжнародними стандартами), яку отримують на основі використання певної концентрації суспензії полімера формазину. Раніше каламутність води, яка містить 1 мг очищеного кремнію в одному літрі, оцінювали як 1 NTU.

Типові значення каламутності: питна вода – 0,02 – 0,5 NTU; джерельна вода – 0,05 – 10 NTU; стічні води – 70 – 2000 NTU.

Так, вода з завислими частинками глини, яка візуально каламутна, оцінюється 10 одиницями; каламутність поверхневих вод може змінюватися від 10 до 1000 одиниць; в особливо каламутних річках рівень каламутності досягає 10000 одиниць.

*Нефелометр* (або *турбідиметр*) – це прилад для оцінювання каламутності (від грецького слова *nephos* – хмара). Принцип дії нефелометра полягає у вимірюванні розсіяного під кутом  $90^\circ$  світла для малих рівнів каламутності та пропускання світла для зразків із великими рівнями каламутності (рис. 27.4). Оскільки важкі частинки осідають швидко, а залишаються завислі частинки, нефелометрія дає унікальну можливість оцінити загальну кількість суспендованих твердих частинок.

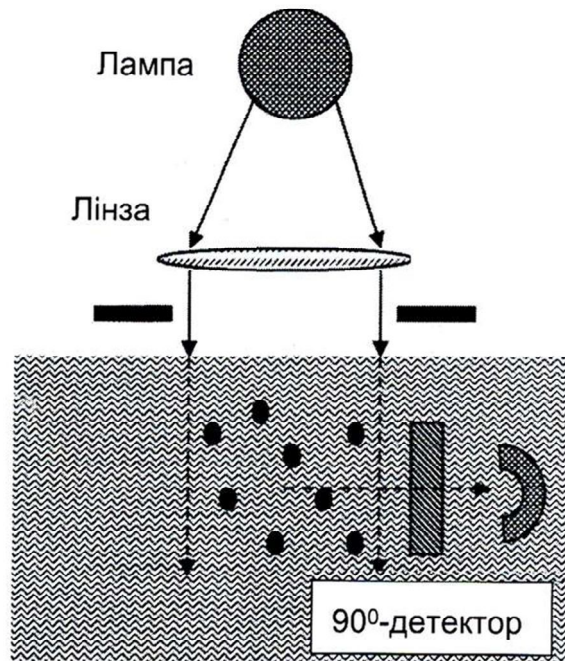


Рис. 27.4. Принцип дії нефелометра

Як джерело світла у турбідиметрі використовують світловий діод, який випромінює у інфрачервоному діапазоні (860 нм). Чутливість до дрібних частинок менша, ніж у видимій області спектра, але в інфрачервоному діапазоні не заважає забарвленню води.

Діапазон вимірювань сучасних турбідиметрів становить від 0,00 до 50,00 FTU та від 50 до 1000 FTU.

*Диск Секкі* – прилад, який являє собою диск діаметром 23 см з чорно-білими секторами (рис. 27.5). Цей диск опускають на глибину в каламутну воду, доки не зникне різниця між білими та чорними секторами.

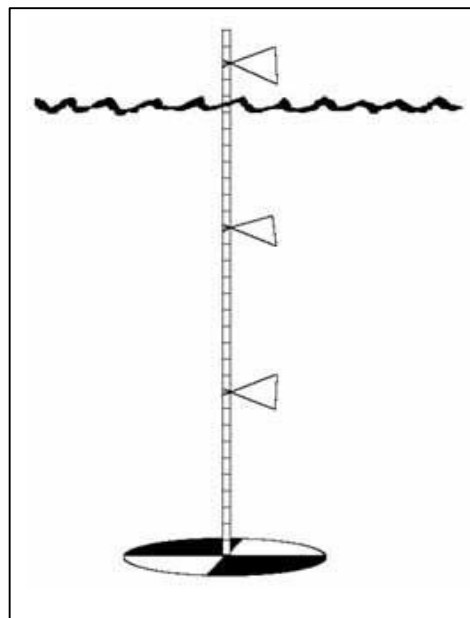


Рис. 27.5. Принцип вимірювання каламутності води за допомогою диска Секкі

### 27.5.3. Окисно-відновний потенціал

Окисно-відновні реакції у природі – це процес віддавання електронів окиснюваною речовиною та приєднання цих електронів відновлюваною речовиною. При цьому електричні потенціали обох речовин змінюються; речовина, що віддає електрони, набуває позитивний заряд, тоді як та, що приєднує електрони, отримує негативний заряд. Різниця електричних зарядів потенціалів між цими двома речовинами отримала назву *окисно-відновного потенціалу (ОВП)*.

Потенціали окисно-відновних реакцій визначаються за припущенням, що електрони, які беруть участь у процесах  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g})$ , мають потенціал, рівний нулю. Значення всіх інших окисно-відновних потенціалів оцінюються порівняно з цим рівнем (Табл. 27.4).

#### 27.4. Стандартні окисно-відновні потенціали

Показник	Води категорії звичайної питної якості	
	ОВ реакція	$E^\circ$ , В
Хлор ( $\text{Cl}^-$ )	$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	+1.36
Кальцій ( $\text{Ca}^{2+}$ )	$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{s})$	-2.868
Магній ( $\text{Mg}^{2+}$ )	$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mg}(\text{s})$	-2.372
Натрій ( $\text{Na}^+$ )	$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Na}(\text{s})$	-2.71
Калій ( $\text{K}^+$ )	$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{K}(\text{s})$	-2.931
Алюміній ( $\text{Al}^{3+}$ )	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Al}(\text{s})$	-1.66
Залізо ( $\text{Fe}^{3+}$ )	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	+0.77
Марганець ( $\text{Mn}^{2+}$ )	$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mn}(\text{s})$	-1.185
Мідь ( $\text{Cu}^{2+}$ )	$\text{Cu}^{2+} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}^+$	+0.159
Свинець ( $\text{Pb}^{2+}$ )	$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{s})$	-0.13
Цинк ( $\text{Zn}^{2+}$ )	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}(\text{Hg})$	-0.7628
<b>Водень</b>	<b><math>2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g})</math></b>	<b>0.0000</b>

Вода є складна суміш, що складається з атомів водню, кисню та інших хімічних елементів, що присутні у воді як домішки. Відбування у воді різноманітних окисно-відновних реакцій пояснює, чому значення окисно-відновного потенціалу води варіює в межах від -400 до +700 мВ. Значення ОВП характеризують хімічний склад води.

### 27.5.4. Принципи дії електрохімічних методів

В електрохімічних методах використовують здатність окислювально-відновних реакцій протікати не тільки при безпосередньому контакті, але

й при їх просторовому розділенні. Розглянемо відновник  $Red_1$  та окислювач  $Ox_2$ , які знаходяться в різних судинах. Якщо у розчини ввести металеві електроди і замкнути ланцюг зовнішнім провідником, а розчини з'єднати сольовим містком (рис. 27.5), то відновник буде віддавати електрони першому електроду  $E_1$  і окислюватися ( $Red_1 \rightarrow Ox_1$ ).

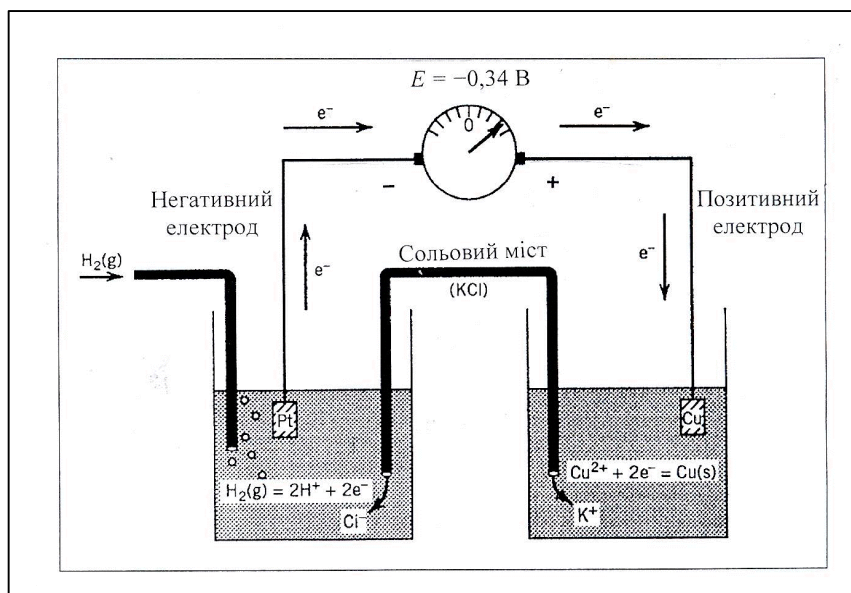


Рис. 27.5. Електрохімічна комірка з стандартним водневим (окислювач) та мідним (відновлювач) електродами

Електрони на зовнішньому ланцюгу перейдуть до другого електрода  $E_2$ , який передасть їх окислювачу. Останній відновиться ( $Red_2 \rightarrow Ox_2$ ). Таким чином, відбувається реакція:



Процес супроводжується переносом електронів по зовнішньому ланцюгу та іонів – по внутрішньому.

Слід зазначити, що електрохімічна комірка, яка зображена на рис. 27.5, характеризується недоліками: вона громіздка та небезпечна (оскільки використовує вибухово-небезпечний водень). Тому на практиці застосовують комбінації благородних металів та солей хлоридів замість водневого електрода.

У сучасних системах вимірювання ОВП один з електродів має реагувати на зміну концентрації речовини, що визначається. Цей електрод називаються *індикаторним* або *робочим*. Щоб він не реагував з компонентами речовини, його виготовляють з благородних металів ( $Au$ ,  $Pt$ ,  $Hg$ ) або інертних матеріалів (наприклад, з графіту).

Так, золото має високий потенціал відновлення ( $\sim +1600$  мВ), а платина має теж високий потенціал відновлення ( $\sim +1200$  мВ), високу електропровідність, твердість та характеризується високою інертністю до іонів хлору, які можуть утворювати стабільні комплекси з золотом та сріблом.

Другий електрод називають *електродом порівняння*; він служить як точка відліку для параметра, що вимірюється індикаторним електродом. Зазвичай використовують хлоридсрібні ( $AgCl$ ) або каломельні ( $Hg_2Cl_2$ ) електроди. Зовнішній вигляд електрода порівняння наведено на рис.27.6.

Процес вимірювання ОВП полягає в тому, що в розчин, який аналізують, занурюють індикаторний електрод і вимірюють його потенціал відносно електрода порівняння.

Рівноважний потенціал зв'язаний з концентрацією рівнянням Нернста:

$$E_p = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{C(Ox)}{C(Red)} \quad (27.6)$$

Тут  $E$  – стандартний електродний потенціал (В);  $R$  – молярна газова стала ( $8,31441 \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{моль}^{-1}$ );  $T$  – абсолютна температура;  $F$  – стала Фарадея ( $96487 \text{ Кл}\cdot\text{моль}^{-1}$ ),  $n$  – кількість електронів, які беруть участь в реакції;  $C(Ox)$  і  $C(Red)$  – концентрації окислювача і відновника відповідно.

Принцип дії ОВП-метра пояснюється на рис. 27.7.

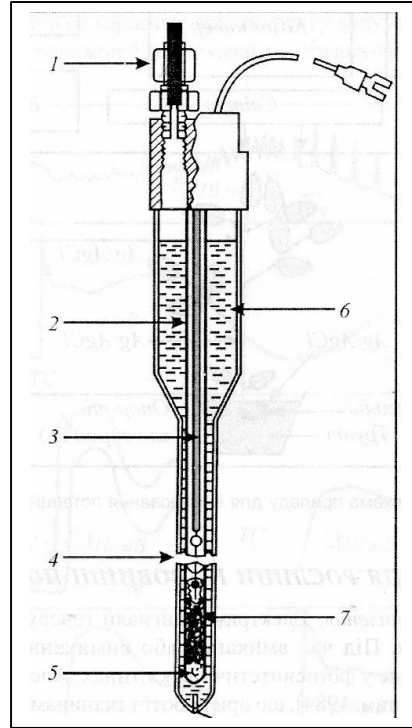


Рис. 27.6. Зовнішній вигляд електрода порівняння: 1 – втулка; 2 – скляна трубка; 3 – електрод; 4 – стопор; 5 – бавовняний стопор; 6 – розчин електроліту; 7 – колонка хлориду срібла



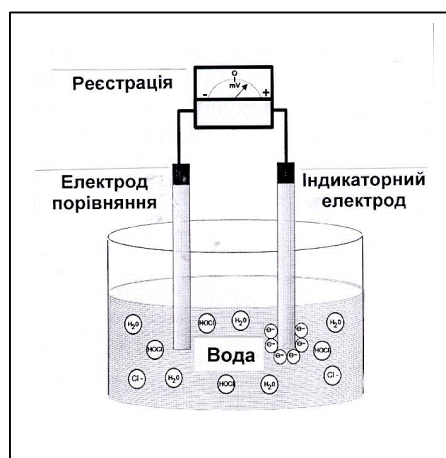


Рис. 27.7. Принцип дії ОВП-метра

Портативний прилад (виробництво Horida Ltd.) для польових досліджень якості природних вод наведено на рис.27.8 [62]. Він передбачає вимірювання температури, розчиненого кисню, рівня рН, каламутності та електропровідності води.

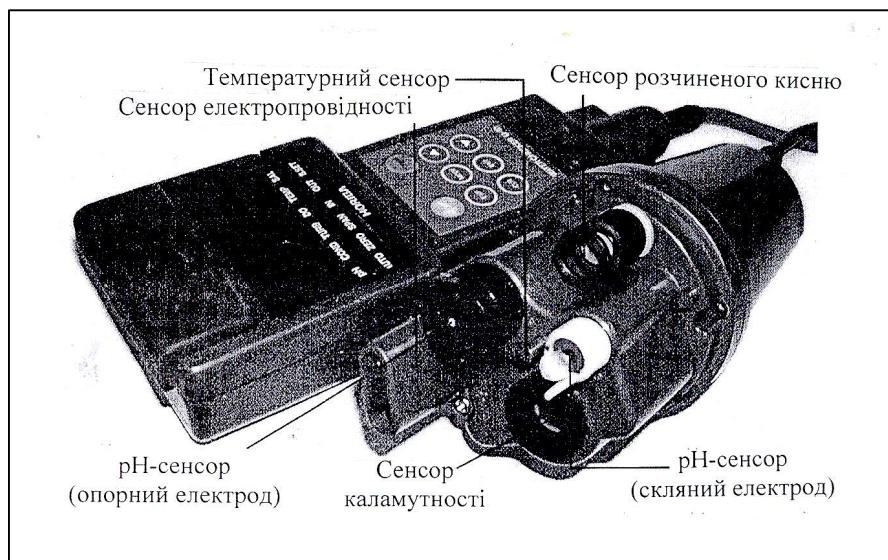


Рис. 27.8. Портативний прилад для польових досліджень якості природних вод [62]

### 27.6. Вимірювання забруднення води

Для ідентифікації та оцінювання забруднюючих речовин в питній воді застосовують також методи газової хроматографії ГХ, іон-обмінної хроматографії ІОХ, мас-спектрометрії МС, комбінації газової хроматографії та мас-спектрометрії ГХ/МС.

Розглянемо один з перспективних методів для контролю забруднення компонентів навколишнього середовища.

### 27.6.1. Метод мас-спектрометрії з мембранним введенням (МСМВ)

Цей метод передбачає введення речовини, що аналізується, у вакуумну камеру через напівпроникну мембрану [117]. Зазвичай, використовують тонку гідрофобну мембрану, виготовлену, наприклад, з полідиметилсилоксану, яку розташовують між зразком та джерелом іонів мас-спектрометра. Метод МСМВ ґрунтується на розділенні органічних компонентів зразка та води або повітря цією мембраною. Органічні компоненти зразка дифундують через мембрану та випаровуються у простір джерела іонів (рис. 27.9). Оскільки потік води або повітря, що проходить через мембрану, менший, ніж потік органічної речовини, яка аналізується, відбувається накопичення органічних компонентів.

Метод МСМВ застосовується для ідентифікації та кількісного визначення летких органічних сполук, побічних продуктів дезинфекції, поліароматичних вуглеводнів, поліхлорованих біфенілів, діоксинів тощо. Більш детальний перелік токсикантів, присутніх у воді, повітрі та ґрунті, які аналізуються за допомогою методу МСМВ, наведено в роботі [117].

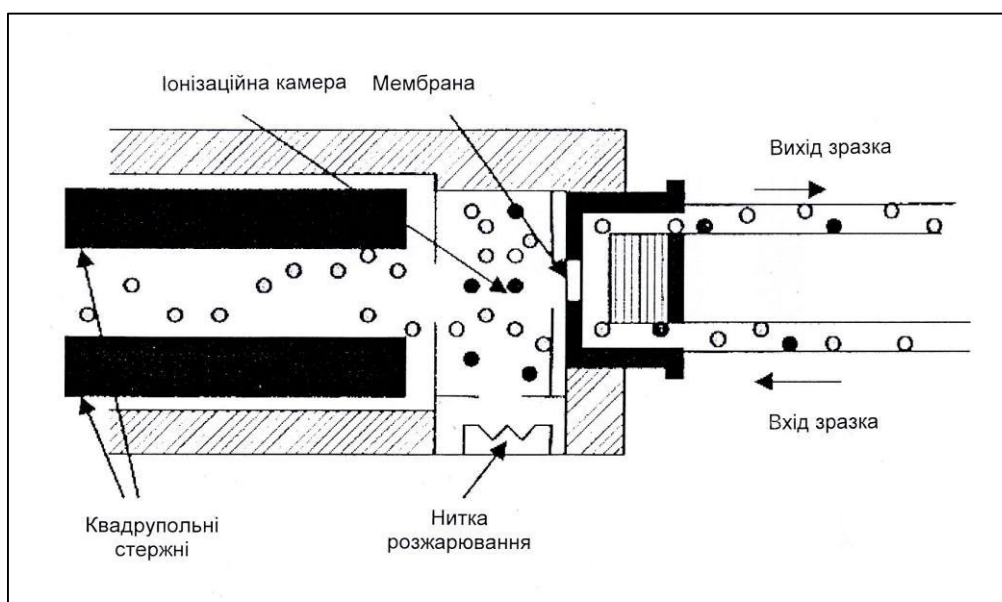


Рис. 27.9. Метод мас-спектрометрії з мембранним введенням (МСМВ): розділення органічних компонентів зразка (○○○) від повітря або води (●●●) [117]

### 27.6.2. Модифікація методу МСМВ

Модифікація базується на застосуванні пористої трубчатої мембрани, у внутрішній простір якої подають аналіт, а зовнішній знаходиться під дією вакууму, що утворюється в мас-спектрометрі (рис.27.10).

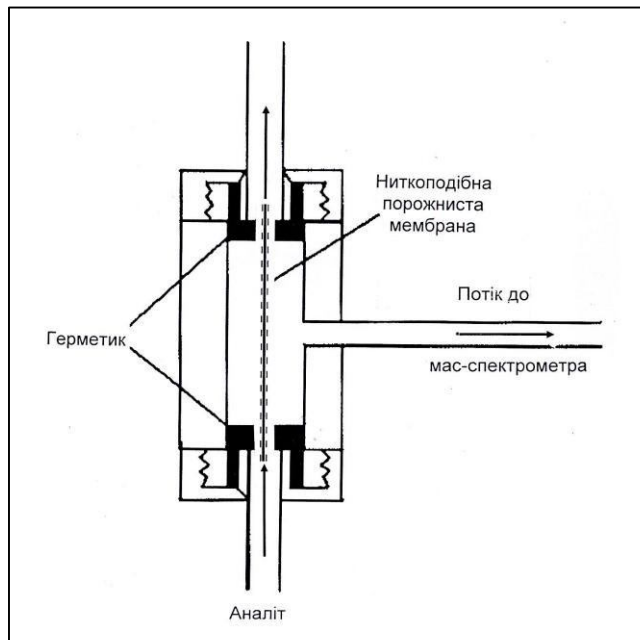


Рис. 27.10 - Модифікація методу МСМВ, що передбачає застосування пористої трубчатої мембрани [117]

Чутливість методу МСМВ знаходиться в межах нг/л для води та нг/м<sup>3</sup> для повітря. Крім того, перевагами методу є його простота, швидкість, невелика вартість, можливість здійснювати довготривалий моніторинг процесів, що відбуваються у навколишньому середовищі.

### 27.7. Вимірювання потоку течії

Поперечний переріз річки складається з ряду сегментів (рис. 27.11) – ділянок поперек течії (сегменти нумеруються від 1 до n).

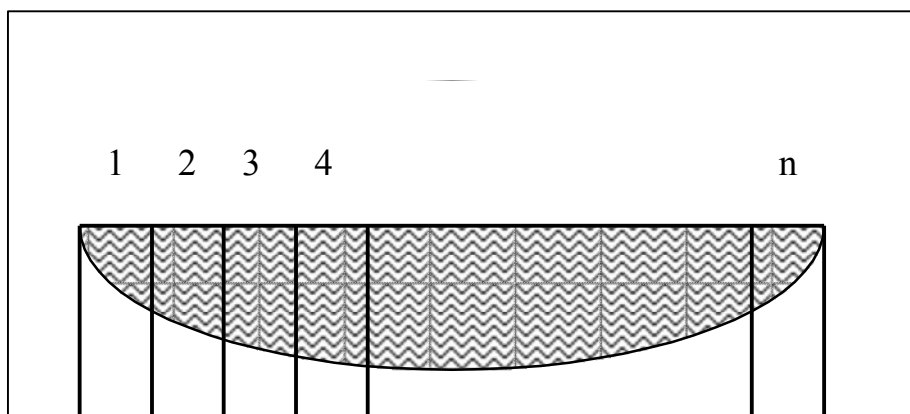


Рис. 27.11. Поперечний переріз річки

Кількість води, що проходить через перший сегмент менша, ніж кількість води, яка проходить, наприклад, через четвертий сегмент. Але нас цікавить загальна кількість води, що протікає через всі сегменти (  $1 + 2 + 3 + 4 + \dots + n$  ). Отже для цього слід сумувати всі кількості води, що проходять через всі сегменти, тобто використати формулу:

$$Q = \sum (\omega_1 D_1 \bar{v}_1 + \omega_2 D_2 \bar{v}_2 + \dots + \omega_n D_n \bar{v}_n) \quad (27.7)$$

Ми вимірюємо потік течії як кількість води, що переноситься течією через поперечний переріз русла за одиницю часу. Кількість води  $Q$ , що проходить через сегмент, дорівнює добутку площі перерізу сегменту  $wD$ , де  $w$  – ширина сегменту,  $D$  – глибина. Отже  $Q = wDv$ , де  $v$  – швидкість течії, або  $Q = Sv = SL/t$ , де  $S$  – площа перерізу сегменту,  $SL$  – об'єм води,  $t$  – час. Таким чином, ми вимірюємо площу сегменту (хоча це робиться приблизно, оскільки ми апроксимуємо його як прямокутник), швидкість руху течії (за допомогою приладу), сумуємо результати по всіх сегментах та оцінюємо  $Q$ .

### 27.7. Автоматизовані системи контролю якості води

В Україні оперативний контроль якості природних вод забезпечує *автоматизована система контролю якості води АСЯНС-ВГ* (автоматизовані спостереження якості навколишнього середовища – водний горизонт), створена вченими Гідрохімічного інституту Держкомгідромету. Ця система складається з автоматичних станцій контролю якості води, гідрохімічних лабораторій, аналізаторів та центру обробки інформації [6,8].

*Автоматична станція контролю поверхневих вод (АСКПВ)* складається з насосно-гідравлічної, вимірювальної та електронно-перетворюючої частин, апаратури передачі даних та центральної станції.

Наявні автоматизовані системи контролю якості води забезпечують одержання інформації щодо фізико-хімічних показників: концентрації розчинного у воді кисню (від 0 до 0,025 кг/м<sup>3</sup>), електропровідності (10<sup>-4</sup>–10<sup>-2</sup> Ом/см), рН (4-10), температури (0-40 °С), рівня води (0-12 м), концентрації завислих речовин (0-2 кг/м<sup>3</sup>), іонів міді (0-0,001 кг/м<sup>3</sup>) та сульфідів.

*Автоматична станція контролю якості води (АСКЯВ)* дає можливість визначати такі показники: глибину  $h$ , температуру (°С), каламутність, рН, O<sub>2</sub>, Cl, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, пропускання УФ випромінювання, Na<sup>+</sup> K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Fe<sub>заг</sub>, Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Hg<sup>+</sup> РЬ<sup>2+</sup>, SiO тощо.

Крім того, оперативний контроль якості води здійснюється за допомогою *стаціонарних та пересувних гідрохімічних лабораторій*.

### Контрольні запитання та завдання

1. Назвати фізичні властивості води.
2. Як змінюється густина води з температурою?
3. Що таке когезія та адгезія?
4. Які теплофізичні властивості води важливі з точки зору клімату?
5. Яку роль відіграє дипольний момент молекули води?
6. В якій спектральній області вода прозора?
7. Що таке якість води?
8. Дати визначення питної води.

9. Назвати основні показники якості води.
10. Як оцінити концентрацію розчиненого кисню?
11. Що таке каламутність води та як її оцінюють?
12. Що таке окисно-відновний потенціал?
13. В чому полягає принцип вимірювання окисно-відновного потенціалу?
14. Як оцінюють швидкість потоку течії?
15. Пояснити метод мас-спектрометрії з мембранним введенням.

### **ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ** **ВИЗНАЧЕННЯ ІНДЕКСУ ЯКОСТІ ВОДИ**

У спробі розрізнити та порівняти річки та озера з різних регіонів Національний Фонд Санітарії (National Sanitation Foundation, NSF) США розробив та запропонував Індекс Якості Води (Water Quality Index, WQI). Визначення цього індексу являє собою одну з поширених процедур оцінювання якості природних вод. Пропонуємо читачу знайти та розглянути систему підрахунків індексу якості води на сайті:

[www.water-research.net/watrqualindex/waterqualityindex.htm](http://www.water-research.net/watrqualindex/waterqualityindex.htm)

Для кількісного оцінювання якості водойм пропонують визначати такі параметри:

1. Розчинений кисень
2. Фекальні речовини
3. Рівень рН
4. Біохімічна потреба у кисні (БПК)
5. Температура
6. Загальні фосфати
7. Нітрати
8. Каламутність
9. Тверді речовини

<b><u>Критерій оцінювання</u></b> <b><u>якості води</u></b>	
<b>90-100</b>	<b>Відмінна</b>
<b>70-90</b>	<b>Добра</b>
<b>50-70</b>	<b>Середня</b>
<b>25-50</b>	<b>Погана</b>
<b>0-25</b>	<b>Дуже погана</b>

Кожний з цих параметрів характеризується ваговим фактором, який свідчить про його значущість під час оцінювання якості води.

Так, наприклад, розчинений кисень характеризується ваговим фактором 0,17, тобто він є більш суттєвим при оцінюванні якості води, ніж інші фактори.

За допомогою графіків залежності індексу якості води від значення кожного параметра (яке знаходиться експериментально) можна визначити індекс якості Q води для цього параметра.

Water Quality Factors and Weights	
Factor	Weight
Dissolved oxygen	0.17
Fecal coliform	0.16
pH	0.11
Biochemical oxygen demand	0.11
<a href="#"><u>Temperature change</u></a>	0.10
Total phosphate	0.10
Nitrates	0.10
Turbidity	0.08
Total solids	0.07

Потім заповнюється таблиця зі всіма даними:

Обчислення Індексу якості води

фактор	Величина	Ваговий фактор	Індекс якості
Розчинений кисень Dissolved oxygen	80	0.17	87
Фекальні колі-форми Fecal coliform	10	0.16	72
pH	7	0.11	88
Біохімічна потреба в кисні Biochemical oxygen demand	10	0.11	34
Зміна температури <a href="#">Temperature change</a> Go to This Site to Get Index value	10	0.10	45
Загальні фосфати Total phosphate	2	0.10	27
Нітрати Nitrates	20	0.10	37
Каламутність Turbidity	40	0.08	45
Загальні тверді речовини Total solids	50	0.07	87

В результаті обчислень індекс якості води дорівнює  $WQI = 30$ .

### Контрольне завдання

Використовуючи сайт:

[www.water-research.net/watrqualindex/waterqualityindex.htm](http://www.water-research.net/watrqualindex/waterqualityindex.htm)

визначити індекс якості води для свого варіанту.

Варіант \ Тест	1	2	3	4	5	6
1. Розчинений кисень	20	40	60	80	100	120
Фекальні бактерії	2	10	20	100	200	50
3. Рівень pH	4	5	6	7	8	10
4. Біохімічна потреба у кисні	5	10	15	20	25	30
5. Температура	-10	-5	0	+5	+10	+20
6. Загальні фосфати	1	2	3	4	5	6
7. Нітрати	10	20	30	40	50	60
8. Каламутність	10	20	30	40	50	60
9. Тверді речовини	50	100	150	200	250	300
<b>Загальний індекс якості води</b>						



Вода!

Ти не маєш ні смаку, ні кольору, ні запаху, тебе не опишеш, тобою насолоджуються, не знаючи тебе. Ти не просто необхідна для життя: ти і є життя. З тобою в нас розливається таке блаженство, яке не пояснити почуттями. Ти повертаєш нам усі сили, на які ми вже й не сподівалися. Твоя милість відкриває в нас пересохлі джерела серця.

Ти — найбільше в світі і найменш тривке багатство, ти, така чиста в надрах землі. Можна вмерти біля джерела, якщо в ньому є домішка магнію. Можна вмерти за два кроки від солоного озера. Можна вмерти і від двох літрів роси, якщо в неї попали якісь солі. Ти не приймаєш домішок, ти не терпиш, коли тебе псують, ти – божество, яке так легко наполохати...

Але ти даєш нам безмежно просте щастя.

Антуан де Сент-Екзюпері, „Планета людей”, 1957.



## 28. МОНІТОРИНГ РОСЛИН ТА РОСЛИННИХ ПОКРИВІВ

### 28.1. Спектроскопічний моніторинг рослинних об'єктів

*Рослинний покрив* – це комплексне поняття, яке включає ґрунт у сукупності з рослинним ансамблем та приповерхневим шаром атмосфери. Контроль за станом такого покриву вимагає розробки нових сучасних методів моніторингу, які б давали точну та вичерпну інформацію щодо всіх етапів розвитку рослин та впливу на них різноманітних природних і антропогенних факторів.

Перспективними, з точки зору реалізації таких завдань, є методи оптичної та лазерної спектроскопії, які ґрунтуються на взаємодії оптичного випромінювання з речовиною. Реєстрацію залежності змін, яких набуває це випромінювання, від довжини світлової хвилі покладено в основу оптичної спектроскопії. Розглянемо основні принципи та можливі практичні застосування спектроскопічних засобів для лабораторного та польового моніторингу як окремих рослин, так і рослинних покривів у цілому. Сучасні методи спектроскопічного моніторингу рослинних покривів засновані на реєстрації та аналізі відбитого від рослинного покриву випромінювання або випромінювання флуоресценції хлорофілу.

### 28.2. Спектроскопія відбивання

#### 28.2.1. Спектр відбивання зеленого листка

Спектр відбивання, тобто залежність відбивання  $r$  зеленого листка від довжини світлової хвилі, показано на рис. 28.1.



Рис. 28.1. Спектр відбивання зеленого листка



Він має три основні ділянки: 500-750 нм, де поглинають рослинні пігменти, такі як хлорофіли *a* і *b*, а також каротиноїди, ксантофіли та антоціаніни; 0,75-1,35 мкм, яка характеризується високим рівнем відбивання за рахунок внутрішніх структур (зокрема, целюлози) листка; 1,35-2,50 мкм – область, в якій має місце інтенсивне поглинання води з максимумами при 1,45 та 1,95 мкм. Таким чином, спектр відбивання окремого листка відзначається максимумом відбивання при 550 нм у видимій області спектра, широкою смугою 0,75-1,35 мкм та максимумами відбивання при 1,65 та 2,20 мкм у ближній інфрачервоній області спектра.

### 28.2.2. Методи спектроскопії відбивання

Усі методи спектроскопії відбивання рослин можна поділити на лабораторні, методи ближнього поля (коли вимірювання проводять на невеликій відстані від рослинного об'єкта) та дистанційні [61, 118, 119].

*Лабораторні методи* передбачають вивчення спектрів відбивання листка за допомогою спектрофотометрів, обладнаних інтегруючою сферою та пластиною  $BaSO_4$ , яка використовується як стандарт.

*Методи ближнього поля* базуються на вимірюванні спектру відбивання рослинного покриву у польових умовах. Типовий прилад для вимірювання відбивальних характеристик рослинного покриву у режимі ближнього поля наведено на рис. 28.2. Діапазон вимірювань приладу, який містить 864 канали, становить 400-2500 нм.

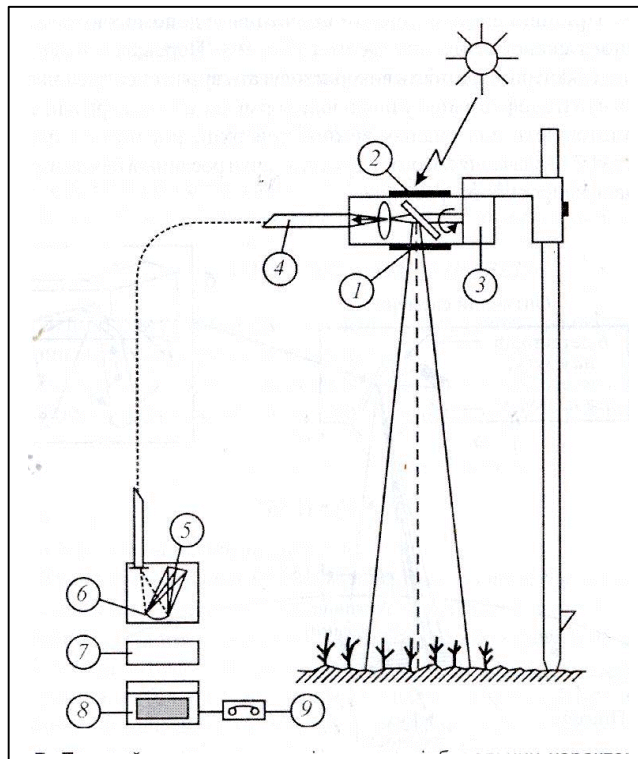


Рис.28.2. Типовий прилад для вимірювання відбивальних характеристик рослинного покриву у режимі ближнього поля: 1 – вікно; 2 – екран; 3 – двигун; 4 – фільтр; 5 – CCD –детектор; 6 – дифракційна решітка; 7 – система обробки інформації; 8 – комп'ютер; 9 – система реєстрації

### 28.2.3. Відбивальні вегетаційні індекси

Для встановлення функціональних зв'язків між вегетаційними характеристиками рослин, які знаходяться у стресових умовах, і відбивальними параметрами цих рослин, доцільно застосовувати так звані *спектральні вегетаційні індекси*, які являють собою суму, різницю або відношення спектральних параметрів, визначених на певних аналітичних довжинах хвиль. Розглянемо відбивальні вегетаційні індекси, які використовують під час спектроскопічного моніторингу рослин на рівні поодинокого листка.

*Відносний вегетаційний індекс RVI* – відношення відбивання рослинного покриву у ближній інфрачервоній області спектра (*NIR*) до відбивання цього покриву у червоній області спектра (*RED*):

$$RVI = NIR/RED. \quad (28.1)$$

Тут *NIR* відповідає області 750-1359 нм і *RED* – 600-700 нм.

*Нормалізований різницевий індекс NDVI* визначається так:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED). \quad (28.2)$$

Перевагою цього індексу є близька до лінійної залежність його величини від кількості рослинної продукції.

*Перпендикулярний вегетаційний індекс PVI*, який було запропоновано для запобігання впливу ґрунтового фону, дорівнює:

$$PVI = (aNIR - RED + b)/(1 + a^2)^{1/2}, \quad (28.3)$$

де *a* і *b* – константи.

Існують й інші спектральні індекси.

### 28.2.4. Вплив різних факторів на відбивання листка

На відбивальні характеристики поодинокого листка впливають такі фактори як рівень пігментації (наприклад, високим концентраціям хлорофілу відповідають низькі значення коефіцієнта відбивання), положення листка на певному ярусі рослини (старші за віком листки демонструють більше відбивання), бік листка (верхня частина листка містить більше хлорофілу, ніж нижня). Крім того, на відбивання листка впливають різноманітні стресові ситуації, пов'язані з дегідратацією (недостачею води), екстремальними температурами, дефіцитом поживних речовин, надлишком озону.

## 28.3. Флуоресцентна спектроскопія

### 28.3.1. Флуоресцентні властивості окремого листка

Спектр флуоресценції зеленого листка характеризується максимумами при 440-450 нм (синя область), 685-690 нм (червона область) (рис. 29.3). Спектри флуоресценції деяких рослин характеризуються також пле-

чем при 520-530 нм (зелена область).

Згідно із сучасним уявленням, за флуоресценцію у червоній області спектра відповідає хлорофіл *a*. Із флуоресценцією у синій області спектра пов'язані такі хімічні сполуки як хлорогенова кислота, кавова кислота, кумаріни (ескулін і скополетін), стильбени (*t*-стильбен, рапонтіцин). Флуорофорами у зеленій області спектра можуть бути алкалоїд берберін і кверцетін. Внесок у флуоресценцію у синій та зеленій областях спектра з боку рибофлавіну, НАДФ і філогідрохінону можна вважати незначним.

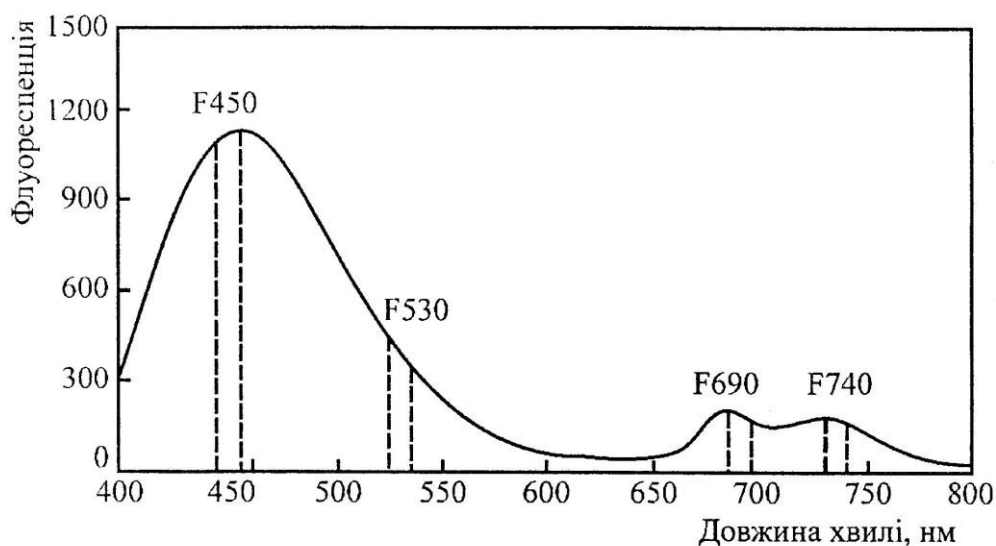


Рис. 28.3. Спектр випромінювання флуоресценції хлорофілу інтактного листка

### 28.3.2. Методи флуоресцентної спектроскопії

*Спектрофлуориметрія* інтактного листка дає можливість аналізувати залежність форми та інтенсивності спектрів випромінювання при збудженні флуоресценції хлорофілу та реєстрації інтенсивності випромінювання флуоресценції на довжинах хвиль 690 нм та 740 нм. Недоліком цього методу є довготривалість процесу запису спектра, під час якого в листку можуть відбуватися певні зміни, викликані індукцією флуоресценції хлорофілу.

*Реєстрація індукції флуоресценції хлорофілу* дає можливість спостерігати часову кінетику інтенсивності флуоресценції, попередньо адаптованого до темноти зеленого листка. Суть у тому, що при освітленні зеленого листка, який знаходився 15-20 хв. у темряві, флуоресценція хлорофілу у ньому набуває індукційну кінетику (відому як *ефект Каутського* [120]). Причому, у цій часовій поведінці флуоресценції хлорофілу можна виділити два інтервали: швидкий ріст флуоресценції до максимального значення  $f_{max}$  протягом 100-500 мс та повільне спадання флуоресценції до стаціонар-

ного рівня  $f_s$  протягом 3-5 хв. Індукцію флуоресценції можна пояснити порушенням зв'язку між фотосистемами I і II у темряві і переходом фотосинтетичного апарата із стану I у стан II при освітленні. Типову індукційну криву наведено на рис. 28.4, а схему двохвильового флуориметра – на рис. 28.5. Метод безпосередньої реєстрації індукції флуоресценції зеленого зрачка не позбавлений певних недоліків – залежності сигналу, що реєструється, від інтенсивності випромінювання збудження, впливу оточуючого освітлення.

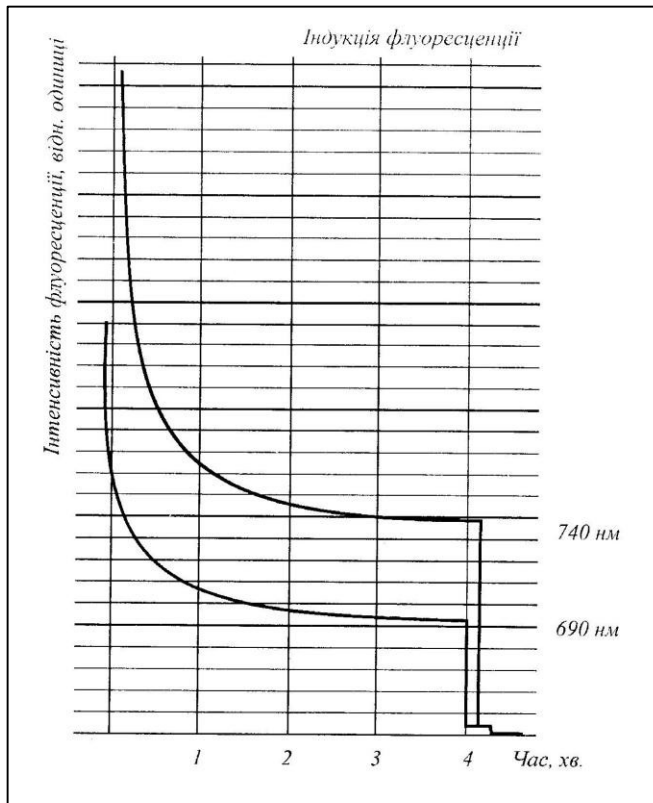


Рис. 28.4. Типова індукційна крива

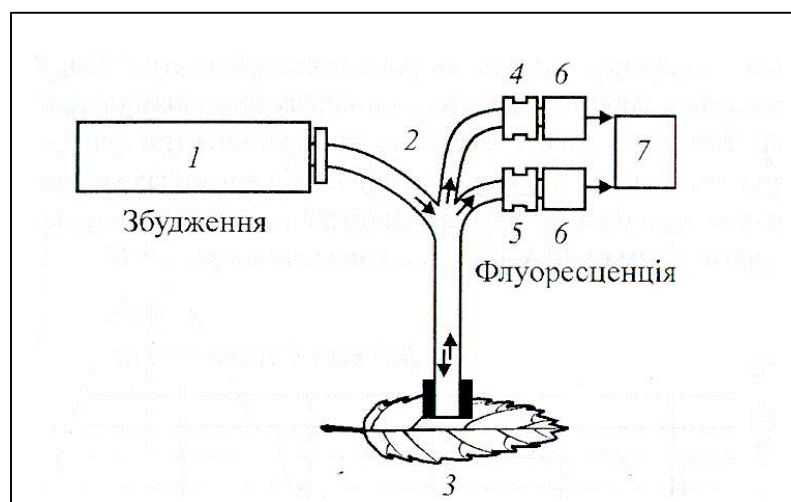


Рис. 28.5. Схема двохвильового флуориметра: 1 – Ht:Ne-лазер; 2 – світловід; 3 – листок; 4 – фільтр 690 нм; 5 – фільтр 740 нм; 6 – фотодіоди; 7 – система реєстрації

Оптичний багатоканальний аналіз (ОМА) базується на одночасній реєстрації флуоресценції в синій, зеленій та червоній ділянках спектра за допомогою поліхроматора з дифракційною решіткою та лінійки діодних детекторів (кількість їх може досягати 512). Збудження флуоресценції хлорофілу здійснюється випромінюванням ультрафіолетового лазера. Фактично така система не записує спектри флуоресценції, а реєструє інтенсивність флуоресценції на всіх довжинах хвиль одночасно. Таким чином, індукцією флуоресценції хлорофілу у даному методі можна знехтувати. Схема ОМА-системи наведена на рис.28.6.

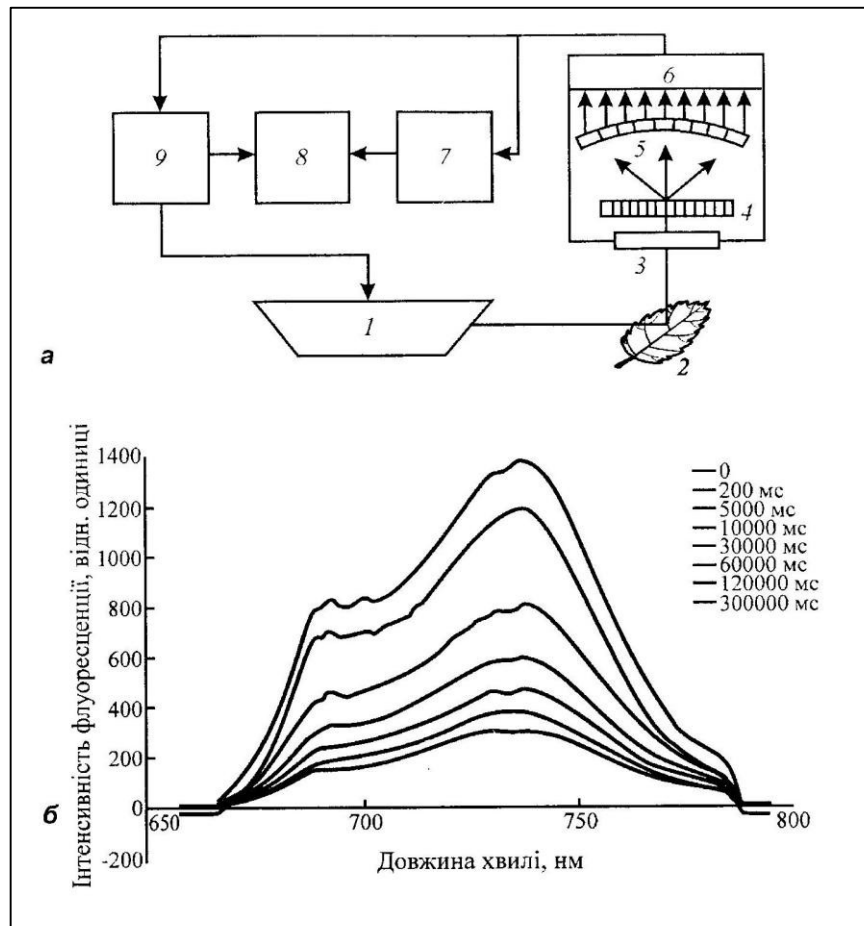


Рис.28.6. Оптичний багатоканальний аналізатор: *а* – схема аналізатора: 1 – лазер ультрафіолетового діапазону; 2 – листок; 3 – вікно; 4 – дифракційна решітка; 5 – лінійка діодів; 6 – оптична багатоканальна система; 7 – підсилювач; 8 – система реєстрації; 9 – тригер; *б* – одночасно зареєстровані спектри випромінювання флуоресценції хлорофілу зеленого листка

Імпульсна модуляційна флуориметрія або «РАМ-флуориметрія» (від англ. *Pulse Amplitude Modulation* [121]) передбачає оцінку рівня основної флуоресценції  $F_o$ , максимальної флуоресценції  $F_m$ , а також значень фотохімічного  $qQ$  та нефотохімічного  $qE$  коефіцієнтів гасіння. Перехід електронів вздовж електронно-транспортного ланцюга супроводжується зменшенням (гасінням) флуоресценції хлорофілу. Це зменшення відбувається внаслідок окислення акцептора, який являє собою комплекс феофітину і

хінонів. Якщо акцептор окислюється завдяки перенесенню електронів до НАДФ і, врешті-решт, до  $\text{CO}_2$ , флуоресценція зменшується. Такий процес називається «*фотохімічним гасінням*» і характеризується коефіцієнтом фотохімічного гасіння  $qP$ . Водночас існують інші механізми гасіння нехімічної природи або «*нефотохімічного гасіння*», які характеризуються коефіцієнтом нефотохімічного гасіння  $qN$ . Основними з процесів гасіння є залежне від енергії гасіння, пов'язане з індукованим протонним градієнтом крізь тилакоїдну мембрану, та гасіння, пов'язане з фотоінгібуванням, що викликається надлишковим опромінюванням. Отже, флуоресценція є комплексним процесом по відношенню до фотохімічних та теплових процесів: вихід флуоресценції тим більший, чим менші розтрати енергії на фотохімічні реакції або теплоту.

Прилад, який реалізує метод імпульсної модуляційної флуориметрії, обладнаний світловим діодом, довжина хвилі випромінювання якого становить 655 нм, а вимірювальні імпульси генеруються з частотою від 600 Гц до 20 кГц та інтенсивністю  $0,1 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  ФАР. Крім того, флуориметр обладнаний галогенною лампою з фільтром, яку використовують для створення діючого (до  $5000 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) та насичуючого (до  $15000 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) випромінювання. Принцип дії амплітудно-модульованої флуориметрії полягає у збудженні флуоресценції серією світлових імпульсів. Інтенсивності цих імпульсів недостатньо, щоб викликати фотосинтез, але достатньо для стимулювання сигналу флуоресценції, що відповідає початковому рівню  $F_0$ . Момент включення такого «вимірювального» імпульсу позначений літерою  $A$  для адаптованого до темряви зразка та  $A'$  – для адаптованого до світла зразка (рис. 28.9).

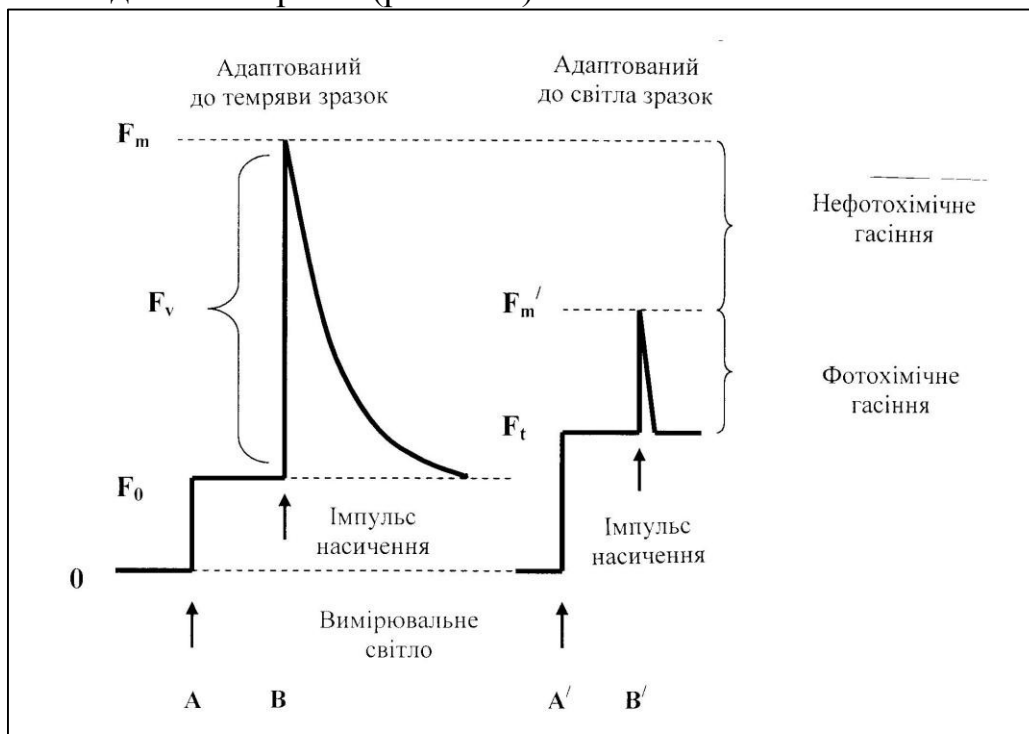


Рис. 28.7. Принцип амплітудно-модульованої флуориметрії:  $A$  та  $A'$  – моменти включення «вимірювального» імпульсу для адаптованих до темряви та до світла зразків відповідно,  $B$  та  $B'$  – моменти освітлення зразків імпульсом насичення

Далі зразок освітлюють інтенсивним світловим імпульсом, який викликає «насичення» реакційних центрів та їх запирання. Закриті реакційні центри відновлюються та беруть участь у фотохімічних реакціях. У цьому разі інтенсивність флуоресценції збільшується до максимального рівня  $F_m$  для адаптованих у темряві зразків та до  $F_m'$  для зразків, що опромінюються діючим світлом (точки  $B$  і  $B'$ , рис. 28.9).

Імпульси насичення, які повторюються через кожні 10 с, повністю ослаблюють первинний акцептор  $Q_A$  ФСII. Таким чином, ланцюг перенесення електронів між двома фотосистемами швидко переривається. Більш того, внаслідок дії насичуючого імпульсу фотохімічне гасіння флуоресценції сходиться нанівець, тоді як нефотохімічне гасіння продовжується.

### 28.3.3. Флуоресцентні індекси

Функції цих індексів можуть виконувати деякі флуоресцентні параметри, які використовуються для кількісної оцінки тих змін, що набуває рослина внаслідок стресових умов.

Під час використання методу спектрофлуориметрії таким індексом може бути відношення  $F(690)/F(740)$ , де  $F(690)$  та  $F(740)$  – інтенсивність флуоресценції на довжинах хвиль 690 нм і 740 нм відповідно (рис. 28.8).

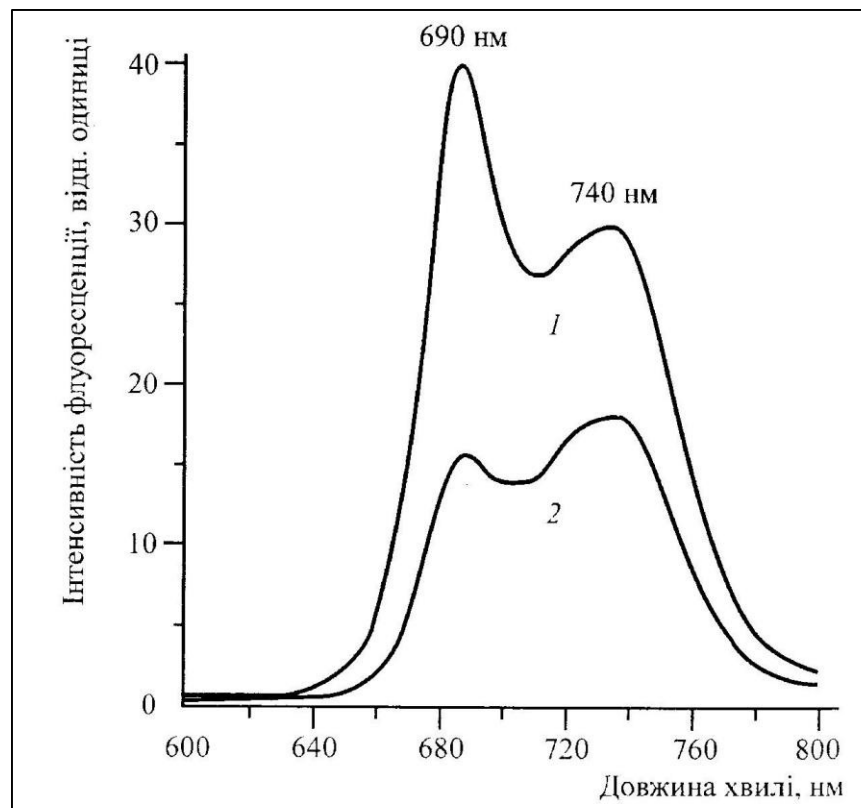


Рис. 28.8. Спектри випромінювання флуоресценції хлорофілу з максимумами при 690 нм та 740 нм; 1,2 – верхня та нижня сторони листка відповідно

При реєстрації індукції флуоресценції використовують індекс життєздатності  $Rfd = f_d / f_s$ , який вимірюють на двох довжинах хвиль:  $Rfd(690)$  і  $Rfd(740)$  та індекс адаптації до стресів  $A_p = 1 - [Rfd(740)+1]/[Rfd(690)+1]$ , де  $f_d = f_m - f_s$  – зменшення флуоресценції,  $f_m$  – максимальна флуоресценція,  $f_s$  – стаціонарна флуоресценція (див. рис. 28.4).

Фотосинтетичну активність адаптованих до темряви зразків оцінюють при реалізації РАМ-флуориметрії за допомогою оптимального квантового виходу  $Y_{onm} = F_v / F_m = (F_m - F_0) / F_m$ , де  $F_v / F_m$  – відношення змінної флуоресценції  $F_v = F_m - F_0$  до максимальної флуоресценції  $F_m$ , що відповідає закритим реакційним центрам ФСII;  $F_0$  – початкова флуоресценція, яка відповідає відкритим реакційним центрам фотосистеми II (ФСII). Крім того, є можливість визначення коефіцієнтів фотохімічного  $qP = (F_{m'} - F) / (F_{m'} - F_0)$  і нефотохімічного  $qN = (F_m - F_{m'}) / (F_m - F_0)$  та  $NPQ = (F_m - F_{m'}) / F_{m'}$  гасіння, адаптованих до темряви зразків, де  $F_{m'}$  – максимальна інтенсивність флуоресценції освітленого зразка,  $F$  – інтенсивність флуоресценції у певний момент часу.

Корисну інформацію можна також отримати і без темної адаптації зразка. Якщо освітлювати зразок світлом високої інтенсивності, реакційний центр ФСII бере участь у поглинанні світла, захопленні енергії та перенесенні електронів – усі ці процеси тривають певний час, протягом якого реакційний центр є «закритим». Чим більше реакційних центрів закрито, тим менша ефективність фотосинтезу.

Для кількісної оцінки ефективності фотосинтезу використовують такий параметр як ефективний квантовий вихід фотосинтезу  $Y_{ef} = (F_{m'} - F) / F_{m'} = \Delta F / F_{m'}$  та відносну швидкість електронного транспорту  $ETR = \Delta F / F_{m'} \cdot \Phi AP$ , де  $\Phi AP$  – швидкість потоку фотонів фотосинтетично активного випромінювання, яка вимірюється у  $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Важливими параметрами, що характеризують процес фотосинтезу, є фотосинтетична ефективність, що визначається як лінійна ділянка залежності відносної швидкості електронного транспорту  $ETR = (\Delta F / F_{m'}) \cdot \Phi AP$  від інтенсивності діючого світла  $I$  (тут інформативним є нахил  $\phi_{\text{макс}}$  залежності  $ETR = f(I)$ ), а також фотосинтетична здатність, що відповідає максимальному значенню відносної швидкості електронного транспорту  $ETR_{\text{max}}$ , або насиченню кривої  $ETR = f(I)$  (рис. 28.9).



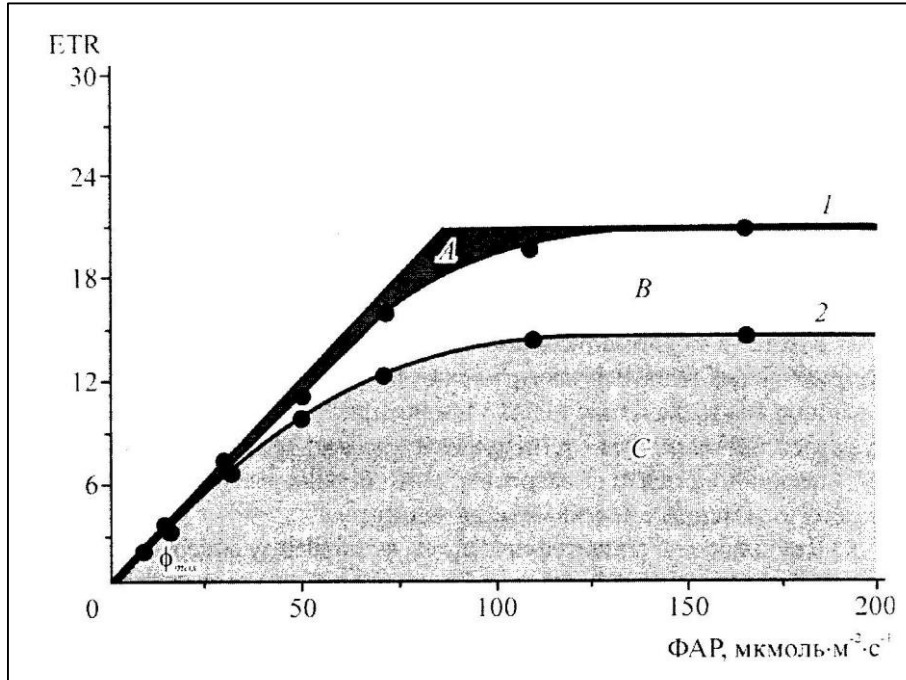


Рис. 28.9. Типова світлова крива: 1,2 – різні рівні насичення світлових кривих, що відповідають різним значенням фотосинтетичної здатності зразка; *A* – область між лінійною ділянкою кривої  $ETR = f(I)$ , екстрапольованою перетину з рівнем насичення та самою кривою, яка відповідає кількості поглинутого світла; *B* – площа між двома кривими  $ETR = f(I)$ , зареєстрованими при оптимальних та надлишкових інтенсивностях світла; *C* – площа, що відповідає зменшеній внаслідок фотоінгібування поглинутій світловій енергії

#### 28.3.4. Вплив різних факторів на флуоресцентні властивості окремого листка

На форму спектра випромінювання флуоресценції листка впливають: вміст хлорофілу, фаза розвитку листка, бік та сегмент листка, його вік, ярус рослини, на якому листок знаходиться, механічні пошкодження, дегідратація, екстремальні температури, дефіцит азоту, сольовий дисбаланс, забруднення.

### 28.4. Дистанційне вимірювання відбивання рослинних покривів

#### 28.4.1. Спектральні ділянки *MSS* та *TM*

Розглянемо як приклад практичної реалізації дистанційного зондування біосфери застосування супутника *Landsat* (*Land Satellite*).

Як спектральні відбивальні індекси при використанні супутника *Landsat* було обрано два типи спектральних ділянок, які досліджувалися багатоспектральним сканером *MSS* (*Multispectral Scanner*) та тематичним картографом *TM* (*Thematic Mapper*). Таким чином, для спектральних індексів використовували 4 спектральні ділянки *MSS* і 7 ділянок *TM* (рис. 28.10).

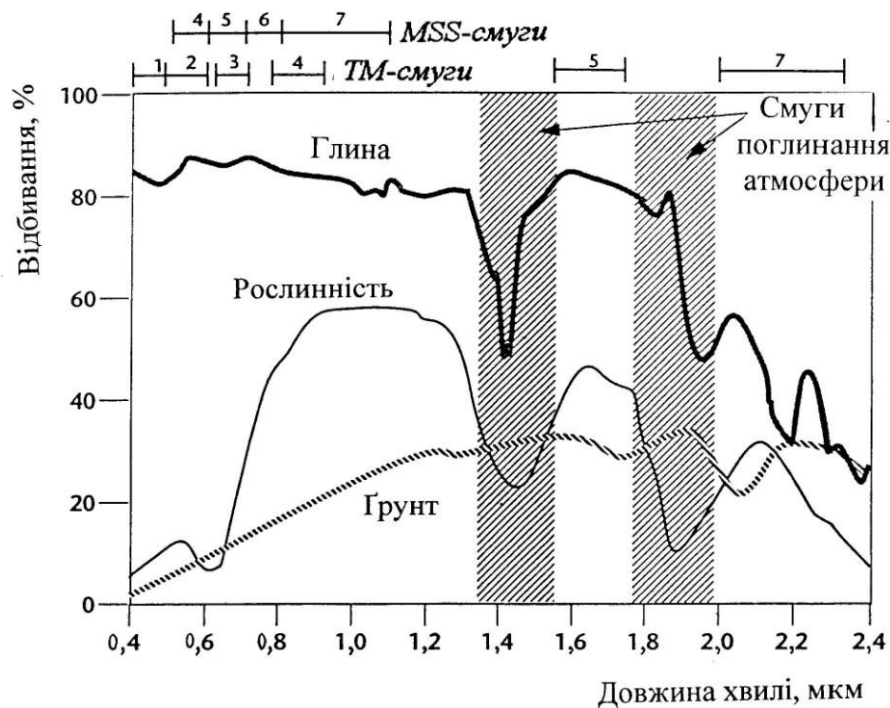


Рис. 28.10. Спектри відбивання глини, ґрунту та рослинного покриття

*Ділянка MSS4:* 500–600 нм, зелена область. Пов'язана з поглинанням хлорофілу та відповідає за відбивання здорових рослин. Крім того, її доцільно використовувати для картографування водойм.

*Ділянка MSS5:* 600–700 нм, червона область. Цю смугу, де відбувається поглинання хлорофілу в здорових зелених рослинах, варто використовувати для розпізнавання рослин, визначення границь і контурів ґрунтових поверхонь і геологічних утворень.

*Ділянка MSS6:* 700–800 нм, відбивальна інфрачервона область. Використовується для оцінки вегетаційної біомаси, ідентифікації урожаю та окреслення границь розподілу рослинних, ґрунтових і водних площ.

*Ділянка MSS7:* 800–1100 нм, відбивальна інфрачервона область. Застосовується для огляду рослинних покриттів і оцінки проникності туманів.

*Ділянка TM1:* 450–520 нм, блакитна область. Використовується для картографування прибережних площ, розпізнавання границь розподілу між ґрунтом та рослинністю, детектування культурних посівів.

*Ділянка TM2:* 520–600 нм, зелена область. Відповідає відбиванню здорових рослин, може використовуватися також для ідентифікації культурних посівів.

*Ділянка TM3:* 630–690 нм, червона область. Застосовується для визначення ґрунтових та геологічних границь, а також площ культурних посівів.

*Ділянка ТМ4:* 760–900 нм, відбивальна інфрачервона область. Використовується для визначення вегетаційної біомаси, ідентифікації урожаю та окреслення границь розподілу ґрунтових, рослинних і водних масивів.

*Ділянка ТМ5:* 1,55–1,74 мкм, середня інфрачервона область. Корисна для вивчення впливу посух на урожай та аналізу стану рослинних покривів. Крім того, може бути використана для розпізнавання хмар, снігу, льоду.

*Ділянка ТМ6:* 10,40–12,50 мкм, теплова інфрачервона область. Використовується для оцінки впливу стресів на рослинні покриви та урожай, зокрема теплових факторів та інсектицидів. Може бути застосована для визначення місцевої геотермальної активності.

*Ділянка ТМ7:* 2,08–2,35 мкм, середня інфрачервона область. Ця смуга важлива для розпізнавання геологічних утворень та визначення ґрунтових границь, а також для кількісної оцінки вологості у ґрунті та рослинах.

Для оцінювання рослинних покривів та ґрунту використовують вегетаційні індекси, в основу яких покладено спектральні ділянки з серії *MSS* і *TM*.

#### 28.4.2. Відбивальні властивості рослинного покриву

Рослинний покрив можна подати як багатошарову систему (рис. 28.11). Кожний листок відбиває приблизно 50 % та пропускає приблизно 50 % оптичного випромінювання. Далі взаємодія випромінювання, яке пройшло через перший шар, з другим шаром також призводить до ділення оптичного випромінювання на дві частини; процес продовжується з кожним шаром. Отже, ефективне відбивання оптичного випромінювання від рослинного покриву принципово відрізняється від ситуації, яка має місце при одному листку.

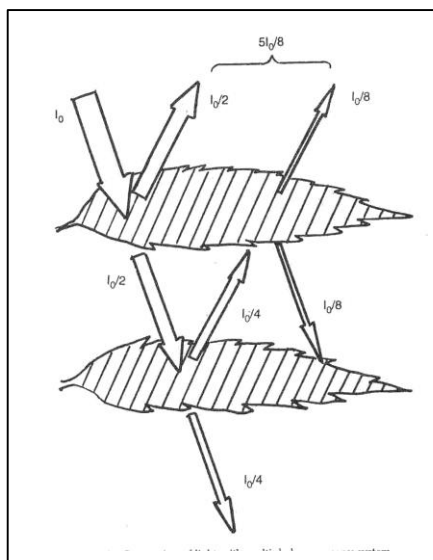


Рис. 28.11. Рослинний покрив як багатошарова система

### 28.4.3. Спектральні вегетаційні індекси, що використовують під час дистанційного зондування

Для оцінювання відбивання рослинних покривів та ґрунту під час дистанційного зондування використовують вегетаційні індекси, в основу яких покладені спектральні ділянки з серії *MSS* і *TM*, а саме:

*Вегетаційний індекс VI*

$$VI = \frac{MSS7 - MSS5}{MSS7 + MSS5}. \quad (28.4)$$

*Відносний вегетаційний індекс RVI*

$$RVI = \frac{TM4}{TM3}. \quad (28.5)$$

*Нормалізований диференційний індекс NDVI*

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3}. \quad (28.6)$$

*Трансформований вегетаційний індекс TVI*

$$TVI = \sqrt{VI + 0,5}. \quad (28.7)$$

*Інфрачервоний індекс ІЧІ*

$$ІЧІ = \frac{TM4 - TM5}{TM4 + TM5}. \quad (28.8)$$

*Індекс вологості ґрунту MSI*

$$MSI = \frac{TM5}{TM4}. \quad (28.9)$$

*Інфрачервоний індекс вологості MIRI*

$$MIRI = \frac{TM5}{TM7}. \quad (28.10)$$

Цей індекс позбавлений можливого отримання від'ємних значень.

*Перпендикулярний вегетаційний індекс PVI*

$$PVI = \sqrt{(MSS5_s - MSS5_v)^2 + (MSS7_s - MSS7_v)^2}, \quad (28.11)$$

де індекси *S* і *V* відповідають ґрунту і рослинності.

### *Індекс яскравості ґрунту SB*

$$SB = 0,43MSS4 + 0,63MSS5 + 0,59MSS6 + 0,26MSS7. \quad (28.12)$$

Цей індекс враховує можливий пригнічуючий вплив ґрунту на відбивання рослин.

Загалом, методи дистанційного зондування за допомогою супутників надають можливість простежити за розвитком рослин на усіх стадіях; проводити ідентифікацію рослинних утворень; визначати вплив на рослини шкідників; оцінювати урожай та прогнозувати його в майбутньому; реалізувати інвентаризацію ґрунтів та картографувати динаміку їх змін внаслідок ерозії та вологості; спостерігати за процесами евтрофікації водойм; окреслювати границі рослинних, ґрунтових та водних площ.

#### **28.4.4. Вплив різних факторів на відбивання рослинного покриття**

Відбивальні властивості рослинного покриття залежать від геометрії покриття (площі та орієнтації листя, кількості листяних шарів), типу рослин, які утворюють покриття. Крім того, значно впливають метеорологічні та кліматичні умови, висота стояння Сонця, наявність хмар,пилу, аерозолів та забруднень в атмосфері, тип та спектральні властивості ґрунту, агрохімічна обробка полів. Внаслідок цього спектр відбивання рослинного покриття характеризується більш контрастною смугою відбивання в межах 750-1350 нм порівняно з спектром відбивання поодинокого листка.

#### **28.4.5. Вплив різних факторів на флуоресценцію рослинного покриття**

Ця гетерогенність пов'язана з різним віком листя і, відповідно, з неоднаковою швидкістю фотосинтезу, концентрацією пігментів, залежністю фізіологічного стану рослин від умов природного освітлення, внесення агрохімічних препаратів, водних і температурних стресів, часу доби та пори року. Експериментальні дані свідчать про те, що спектр випромінювання флуоресценції характеризується зменшенням на 25 % максимуму у синій області спектра та майже повним пригніченням червоних максимумів при переході від окремого листка до рослинного покриття, якщо довжина хвилі збудження дорівнює 337 нм. У разі збудження на довжині хвилі 632 нм спостерігається інтенсивне зростання флуоресценції у червоній області спектра. Це можна пояснити тим, що ультрафіолетове випромінювання не проходить крізь епідерміс та не досягає мезофільних клітин.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

### ПЕРПЕНДИКУЛЯРНИЙ ВЕГЕТАЦІЙНИЙ ІНДЕКС *PVI*

Цей вегетаційний індекс визначається за формулою:

$$PVI = \sqrt{(MSS5_S - MSS5_V)^2 + (MSS7_S - MSS7_V)^2} = \sqrt{(RED_S - RED_V)^2 + (NIR_S - NIR_V)^2}, \quad (1)$$

де індекси *S* і *V* відповідають ґрунту і рослинності.

#### Приклад

Визначити перпендикулярний вегетаційний індекс для зеленого рослинного покриву, в основу якого покладено спектральні ділянки *MSS5<sub>V</sub>* та *MSS7<sub>V</sub>*, використовуючи залежність спектра відбивання ґрунту від вологості (рис.1) та рослинного покриву від забарвлення (рис. 2).

#### Розв'язання

Проводимо вертикальні лінії на рис. 1 та рис. 2, що відповідають довжинам

$$\text{хвиль } MSS5 = \frac{600 + 700}{2} = 650 \text{ нм та } MSS7 = \frac{800 + 1100}{2} = 950 \text{ нм.}$$

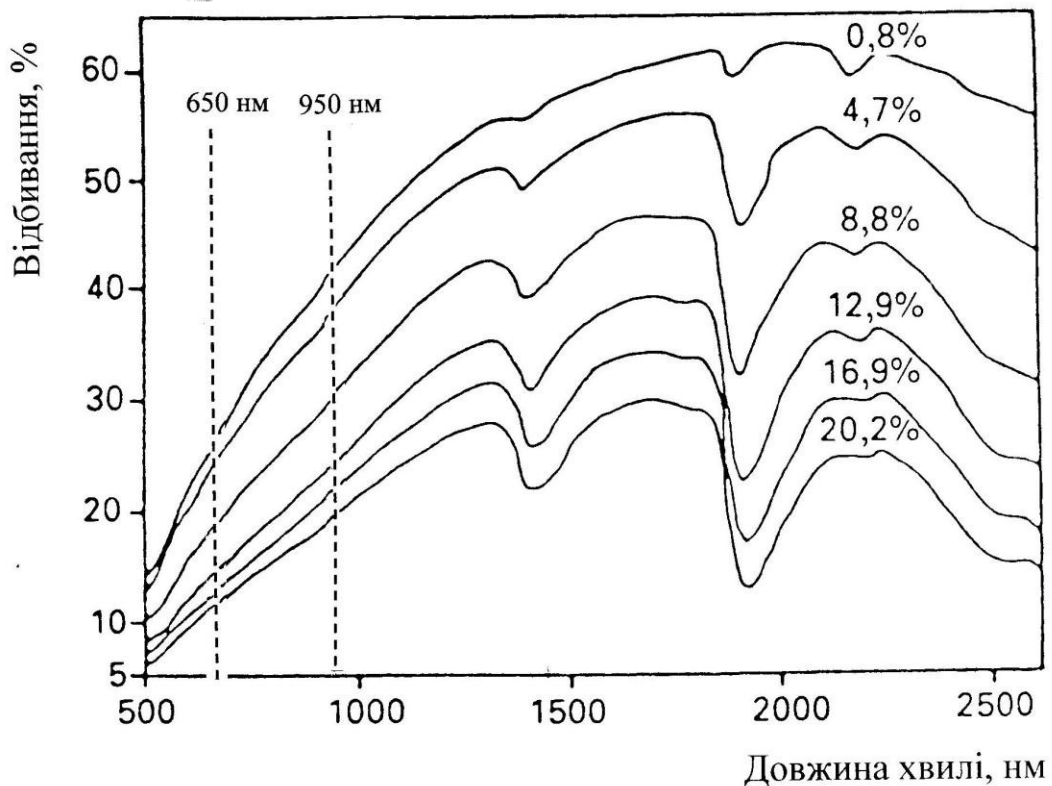


Рис. 1. Залежність спектра відбивання ґрунту від рівня вологості

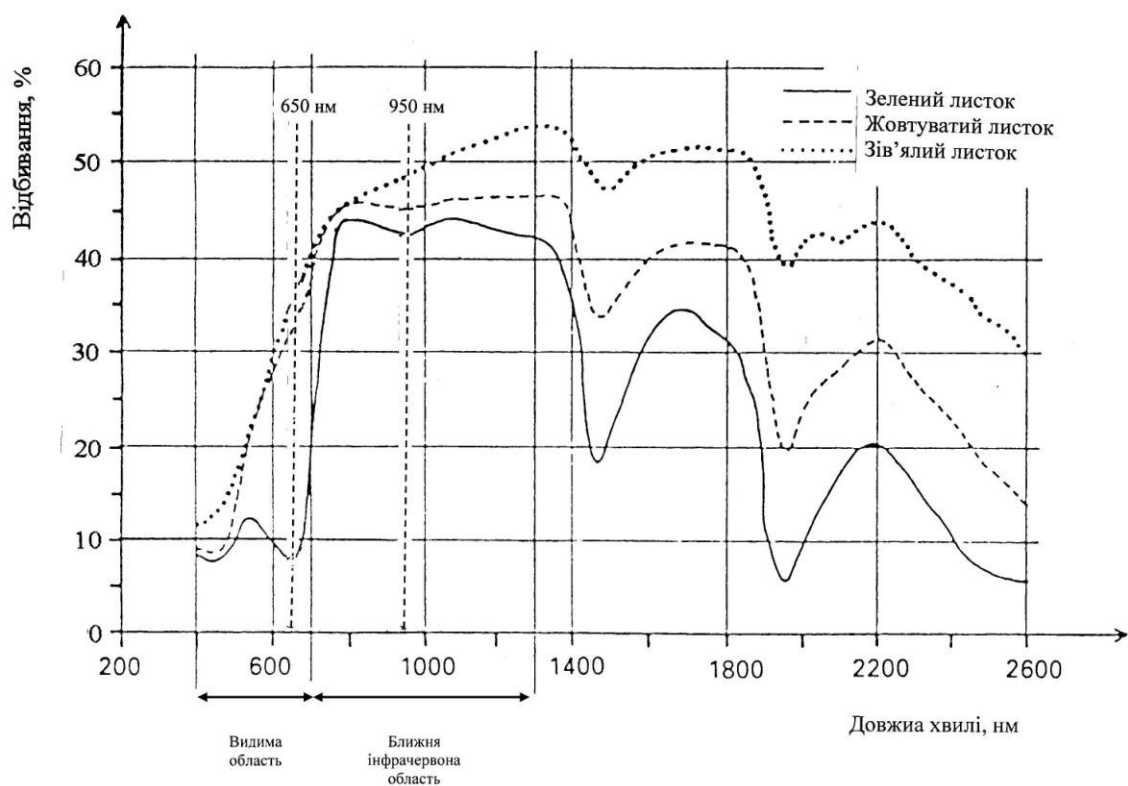


Рис. 2. Залежність спектрів відбивання рослинного покриття від водного дефіциту

2. Заносимо числові дані, отримані на основі рис. 1 та рис. 2, у табл. 1.

1. Значення  $MSS5_S$ ,  $MSS5_V$ ,  $MSS7_S$ ,  $MSS7_V$  та рівня забарвлення покриття

№ п/п	Рівень вологості ґрунту, %	$MSS5_S$ ( $RED_S$ )	$MSS7_S$ ( $NIR_S$ )	Рівень забарвлення покриття	$MSS5_V$ ( $RED_V$ )	$MSS7_V$ ( $NIR_V$ )
1	0,8	25	43	Зелений	8	44
2	4,7	22	39	Жовтуватий	34	46
3	8,8	15	29	Зів'ялий	37	50
4	12,9	11	25	-	-	-
5	16,9	10	24	-	-	-
6	20,2	7	16	-	-	-

3. Будуємо графік залежності (рис. 1)  $MSS5_S$  від  $MSS7_S$  для ґрунту (лінія AB).

4. Далі наносимо на цей графік числові значення індексу  $PVI$ , що відповідають певному рядку табл. 3, обчислені за формулою (1). Наприклад, вибираємо дані для вологості ґрунту 0,8 %:  $MSS5_S = RED_S$  (650 нм) = 12,5;  $MSS7_S = NIR_S$  (950 нм) = 25; для зеленого рослинного покриття  $MSS5_V = RED_V$  (650 нм) = 8;  $MSS7_V = NIR_V$  (950 нм) = 43.

Тоді, використовуючи формулу (1), отримуємо:

$$\begin{aligned}
 PVI &= [(RED_S - RED_V)^2 + (NIR_S - NIR_V)^2]^{1/2} = \\
 &= [(12,5 - 8)^2 + (25 - 43)^2]^{1/2} = (4,5^2 + 18^2)^{1/2} = 344,25^{1/2} \\
 &= 18,5.
 \end{aligned}$$

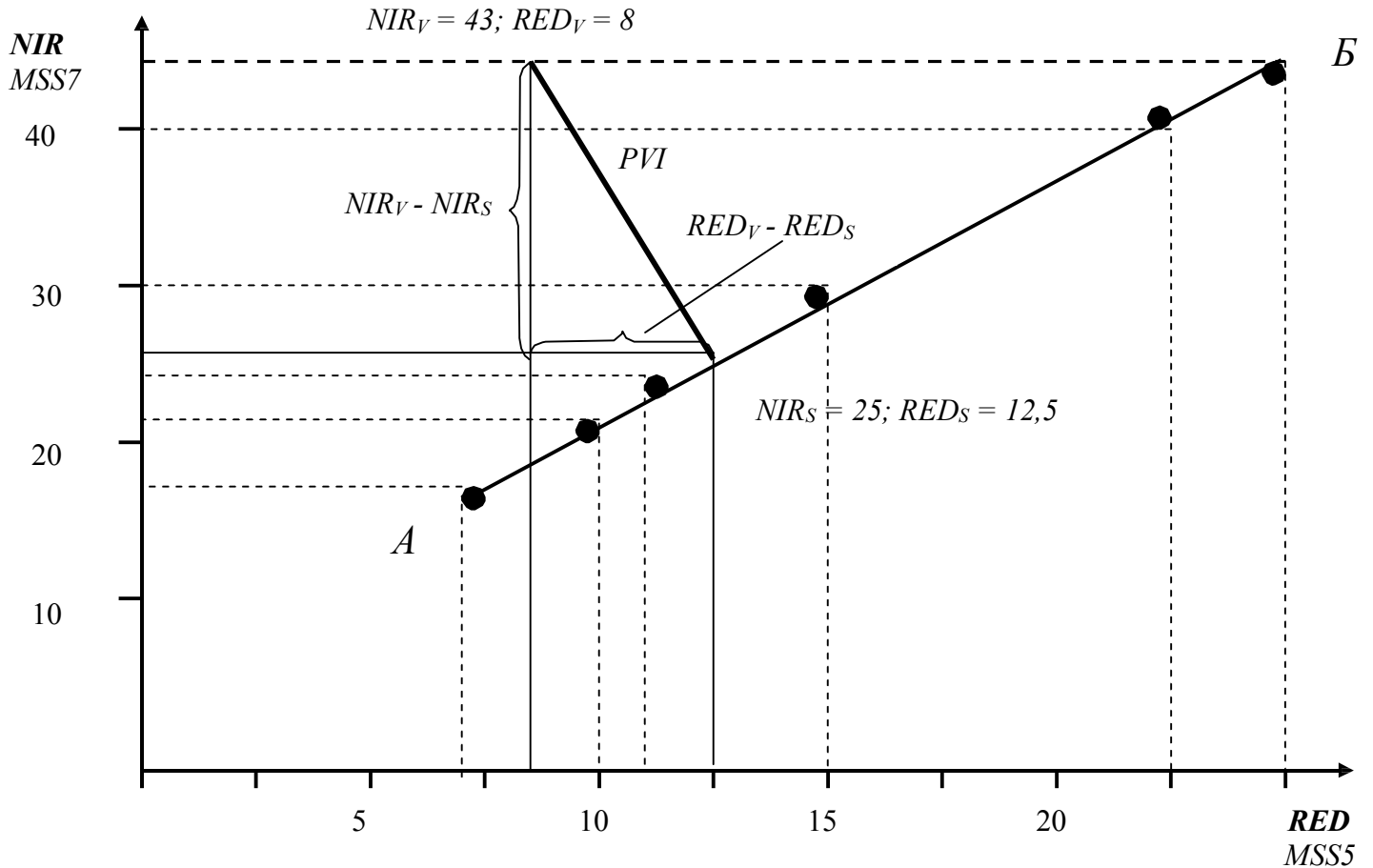


Рис. 3. Графік залежності  $NIR$  ( $MSS5$ ) від  $RED$  ( $MSS7$ ) для ґрунту та принцип побудови перпендикулярного індексу

Таким чином, перпендикулярний вегетаційний індекс  $PVI$  дає можливість уникнути впливу ґрунтового фону.

#### Контрольне завдання

Визначити перпендикулярний вегетаційний індекс для жовтуватого рослинного покриву, що росте на ґрунті, рівень вологості якого дорівнює 8,8 %.





## V. ОСОБЛИВІ ВИДИ ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

*Забруднення навколишнього середовища* – це процес зміни складу і властивостей компонентів біосфери (повітря, води, ґрунту) внаслідок діяльності людини, який призводить до швидкого або довготривалого порушення екологічного балансу та погіршення якості життя.

*Забруднююча речовина* – речовина хімічного або біологічного походження, що присутня або надходить у навколишнє середовище та може прямо або опосередковано здійснювати негативний вплив на здоров'я людини та стан навколишнього природного середовища.

На сьогоднішній день нас оточують близько 20000 забруднюючих речовин, небезпечних для здоров'я людини та навколишнього середовища. Серед них близько 3000 природних та антропогенних речовин є токсичними; кількість цих речовин викликає загрозу.

Хімічні забруднюючі речовини розглянуто у цьому навчальному посібнику в попередніх розділах. У даному розділі ми звернемо увагу на фізичні забруднення, які оточують нас у повсякденному житті або характеризуються вкрай небезпечною дією.

### 29. ФІЗИЧНІ ЗАБРУДНЕННЯ

#### 29.1. Вібраційні забруднення

*Вібрації* (від лат. *vibratio* – коливання) – механічні коливання матеріальних систем, що відбуваються з великою (більш, ніж 1 коливання за секунду) частотою та невеликою амплітудою. Транспортні засоби, промислові агрегати, будівельні механізми та машини є джерелами вимушених механічних коливань, що утворюються у ґрунті. Основна частина коливальної енергії переноситься поверхневими хвилями, які поширюються у поверхневому шарі ґрунту (10–15 м).

Вібрацію оцінюють за рівнями *коливальних (вібраційних) швидкостей* в октавних смугах частот (у децибелах):

$$L_v = 20 \lg(v/v_0), \quad (29.1)$$

де  $v$  – значення коливальної швидкості;  $v_0$  – опорна коливальна швидкість.

Людський організм – складна система, що має велику кількість рухливих елементів. Кожний такий елемент характеризується певними ступенями свободи та власною частотою коливань. У цілому, організм людини чутливий до різних зовнішніх вібраційних параметрів, таких як інтенсивність, частота, тривалість вібрацій протягом контакту тіла з джерелом вібрацій. Наприклад, грудна клітина разом з черевною частиною характеризується резонансною частотою 3–6 Гц; очне яблуко відповідає на резонансні

частоти в області 60–90 Гц; щелепна система – в області 300–400 Гц, хоча може реагувати на більш високі частоти в діапазоні 600–900 Гц.

Людський організм здатний сприймати дію ритмічних коливань, які утворюються різноманітними механізмами та інструментами, з якими організм перебуває у контакті. Вплив вібрацій на організм людини різноманітний: порушуються функції вестибулярного апарату, респіраторної та кардіоваскулярної систем, зорового аналізатора, м'язових веретен.

Стосовно людини, вібрації слід розглядати як небажані рухи, що призводять до *вібраційної хвороби* – професійного захворювання, яке зумовлене дією вібрацій та супроводжується порушеннями серцево-судинної та центральної нервової систем, дегенеративними змінами кісткових тканин, пошкодженнями слухового аналізатора.

Розрізняють загальну та локалізовану дію вібрацій.

*Загальна вібрація* виникає внаслідок впливу регулярно діючих джерел вібрацій на водіїв тракторів, скреперів та бульдозерів, які знаходяться на поверхні, що вібрує. Ці вібрації частотою 1–80 Гц передаються на все тіло працівника. Вібраційна хвороба, що зумовлена дією загальної вібрації, характеризується значними змінами у центральній нервовій системі, викликає дистонію (зміну тону) судин. Вібрації частотою менше, ніж 1 Гц призводять до *кінетоза* – порушення загального стану людини, що викликається дією прискорень, що виникають у процесі різноманітних переміщень тіла у просторі, на вестибулярний апарат, а також комплексом захворювань серцевої, травної та ендокринної систем.

*Локальна вібрація* викликається постійно діючими вібраційними інструментами: відбійними молотками, циркулярними пилами, електродрилями тощо. Локальна вібрація передається через руки та передпліччя. Частотний діапазон локальної вібрації становить 8–100 Гц. Основні симптоми: спазми судин кінцівок, порушення циркуляції кровоносних судин, побіління пальців або «хвороба білих пальців» (рис. 29.1). Тривала дія локальної вібрації може призвести до більш серйозних порушень, таких як гангрена.

У дітей, які довго грають у комп'ютерні ігри, спостерігається симптом «тремтіння рук».

*Противібраційні заходи.* Максимальна чутливість рук працівників, які використовують вібраційні інструменти, становить 8–16 Гц. Заходами, що дозволяють зменшити вплив вібрацій, є застосування антивібраційних рукавичок, які містять шар в'язкопружного матеріалу; обмеження часу перебування працівника на поверхні, що вібрує; механічна ізоляція джерел вібрації або поверхонь, на яких розташовані ці джерела; встановлення поглинаючих вібрацію сидінь; використання антивібраційних амортизаторів.



Рис. 29.1. Хвороба білих пальців

## 29.2. Шумове забруднення

### 29.2.1. Основні визначення

Є декілька визначень терміну *шум*. Перше визначення: шум являє собою звукові коливання, інтенсивність і частота яких змінюються несподівано та аперіодично. Згідно з другим визначенням, шум – це звук, який накладається на інший звук та взаємодіє з ним, тобто небажаний для нашого слуху звук. У третьому варіанті визначення шум – це будь-який звук, який заважає людині. Наприклад, звуки музики є приємними для музиканта, але водночас шумом за другим варіантом визначення для людей, що розмовляють, а також шумом за третім визначенням – для людини, яка хоче заснути.

Отже, шум – це звукові коливання, миттєва амплітуда яких змінюється несподіваним чином. Величина миттєвої амплітуди шуму описується нормальним (гаусовим) розподілом.

Шум може бути побутовим, виробничим, промисловим, транспортним, авіаційним. Шум виникає під час розваг, домашніх робіт, використання іграшок, включення тривожної сигналізації, збирання сміття, будівельних та ремонтних робіт, запуску моделей аеропланів, картингів, спортивних автомобілів.

### 29.2.2. Вплив шуму на живі організми

Розрізняють такі рівні шуму: *слабкий* (30 дБ) – шепотіння, тиха бібліотека; *помірний* (40–50 дБ) – помірний дощ, спокійна кімната; *інтенсивний* (60–80 дБ) – будильник, дорожній рух, пилосос; *дуже інтенсивний* (90–110 дБ) – газонокосарка, дріль, рок-музика, автострада, барабани; *який викликає болісні відчуття* (120–150 дБ) – відбійний молоток, пожежна сирена, реактивний двигун.

*Шумове забруднення* – це небажані для навколишнього середовища звукові коливання, які утворює людина або механізми. Шумове забруднення навколишнього середовища становить велику загрозу для здоров'я

людини. Протягом дня мешканці великих міст змушені терпіти шумові перевантаження на рівні 65–70 дБ і більше. Є прямий зв'язок між інтоксикацією шумом та серцевими хворобами. У зонах великих аеропортів, де рівень шумів сягає 100 дБ, збільшився продаж снодійного, а діти у цих районах гірше засвоюють навчальний матеріал. Шум, величиною 90 дБ викликає різноманітні фізіологічні порушення. Верхня границя для людини становить 140 дБ, при 160–170 дБ відбувається руйнування барабанної перетинки вуха людини. Крім того, шум може бути причиною руйнування органу Корті, бо найбільш уразливими серед всіх елементів слухового аналізатора для дії шуму високої інтенсивності є волоскові клітини внутрішнього вуха. Причому, якщо волоскові клітини зазнають серйозного ушкодження, вони вже не здатні відновлювати свої функції та не можуть бути заміщені іншими клітинами. Наслідком цього може бути часткова або повна втрата слуху.

Для кількісної оцінки впливу шуму на слух використовують параметр, що характеризує зміну слухової чутливості – *індукований шумом пороговий зсув (ІШПЗ)*, який визначається шляхом вимірювання порогу слухової чутливості до і після дії шуму. Цей зсув може бути тимчасовим або постійним – залежно від параметрів шуму (інтенсивності, тривалості, частотного складу).

Після припинення дії шуму інтенсивністю не вище 30 дБ, слух здатний відновлюватися вже через 16–24 години. Вплив більших рівнів інтенсивності викликає безповоротні пошкодження волоскових клітин, що призводять до сталого порогового зсуву. Експерименти на тваринах, які зазнали впливу акустичного шуму різної частоти, з наступним гістологічним аналізом кількості ушкоджених волоскових клітин у внутрішньому вусі свідчать про те, що поріг слухової чутливості зменшується в області  $10^3$ – $10^4$  Гц. Кількість волоскових клітин, що залишилися, може складати при цьому лише 40% від норми.

На здоров'я людини впливає шум невеликої інтенсивності, але тривалий; високочастотний шум; імпульсний шум.

Крім того, шум викликає порушення тиску крові, серцевої діяльності, притуплює увагу, викликає втомленість, дратівливість.

Звичайно, вплив шуму на людину залежить як від рівня інтенсивності звуку, так і від тривалості дії джерела шуму.

Рекомендовані норми шуму становлять: 30–35 дБ – на територіях заповідників; 34–37 дБ – у спальних приміщеннях (будинки, лікарні, квартири); 56–66 дБ – у приміщеннях магазинів, заводів тощо.

### **29.2.3. Заходи проти шумового забруднення**

*Моніторинг шуму* передбачає: планування розташування джерел шуму; врахування та запис побажань та скарг мешканців як під час планування, так й після нього; оцінювання відповідності активності джерел шуму законотворчим нормам та актам; вимірювання рівнів шуму у польових умовах, підрахунки рівнів шуму; картографування розташування джерел

шуму; тренінг спеціалістів; використання захисних та шумоізоляційних засобів, вживання слухових протекторів; обмеження часу шумової експозиції; зменшення гучності; вивчення негативних ефектів, що викликаються шумом; проходження тестування в аудіолога; постійний контроль рівня шуму.

Ефективним засобом захисту від шуму транспортних артерій, промислових підприємств та інших джерел шуму є *шумові бар'єри* – зовнішні структури, що захищають певні ділянки від шумового забруднення (рис. 29.2).



Рис. 29.2. Шумовий бар'єр на автостраді

### 29.3. Електромагнітне забруднення

Джерелами електромагнітного випромінювання, що оточують людину у повсякденному житті, є фени, електричні годинники, тостери, телевізори, комп'ютери, мікрохвильові пічки, мобільні телефони. Електротранспорт, промислові та побутові прилади є також джерелами електричних полів. Оскільки всі вони використовують електричний струм, навколо якого утворюються магнітні поля, доцільно обговорювати вплив саме електромагнітних полів. Електротранспорт (електропоїзди, в тому числі підземні, тролейбуси, трамваї), радіолокаційні станції, системи радіозв'язку та телебачення, промислові установки термообробки матеріалів, отримання плазми, медична апаратура, побутові прилади, стільниковий зв'язок, персональні комп'ютери є джерелами електромагнітних полів, що оточують людину. Промислові установки високої напруги суттєво впливають на людину, викликаючи неприємні враження, а іноді – порушення здоров'я. За накопиченими даними, вплив електромагнітних полів на людину призводить до

негативних змін стану здоров'я, викликаючи зсуви у функціонуванні серцево-судинної, ендокринної, гематологічної, імунної систем, а також збільшує ймовірність розвитку онкопатологій. Вплив електромагнітних полів промислової частоти залежить від напруженості, частоти, тривалості перебування людини у полі, періодичності дії.

Лінії електропередачі є джерелами не лише електричних, але й магнітних полів. У 90-х роках вчені Швеції, Данії, США провели масштабні епідеміологічні дослідження, які довели, що вплив магнітних полів ЛЕП на здоров'я мешканців може проявитися у коридорах завширшки 400–800 м вздовж ліній електропередачі. У 1996 р. величина індукції магнітного поля в 0,2 мкТл була рекомендована як гранично допустимий рівень магнітного поля промислової частоти. Перевищення цієї норми призводить до раку крові та мозку. Наприклад, діти віком до 15 років у 2,7 рази частіше захворюють на лейкемію, якщо перебувають у магнітному полі, магнітна індукція якого перевищує 0,2 мкТл і в 3,8 рази частіше, якщо магнітна індукція становить понад 0,3 мкТл.

Особливо небезпечним є радіочастотне опромінювання мобільними телефонами, якому піддається сучасна молодь: епідеміологічні дані останніх років засвідчують зростання ризиків розвитку деяких видів злоякісних пухлин внаслідок тривалого користування мобільним зв'язком [127].

#### **29.4. Світлове забруднення**

*Світлове забруднення* – це фізичне забруднення, пов'язане з періодичним або тривалим перевищенням рівня природної освітленості місцевості внаслідок використання джерел штучного освітлення. Характерне для великих міст та індустріальних центрів. Самостійно або в поєднанні з іншими формами забруднення здатне призводити до аномалій у розвитку живих організмів, спричинити їх переселення до інших місць. До основних типів світлового забруднення слід віднести: світлове порушення власності – проникнення світла на чужу територію; надмірне освітлення; осліплююче світло; світловий хаос; світлову заграву (рис. 29.3).

Надмірне освітлення та непридатний спектральний склад світла можуть викликати підвищений головний біль, втомленість, погіршення статевих функцій, відчуття неспокою, підвищення артеріального тиску. Штучне світло вночі може викликати порушення здатності до орієнтації та навігації у нічних комах та тварин, міграції – у птахів, харчових ланцюгів – у комах, періодичності цвітіння – у рослин.



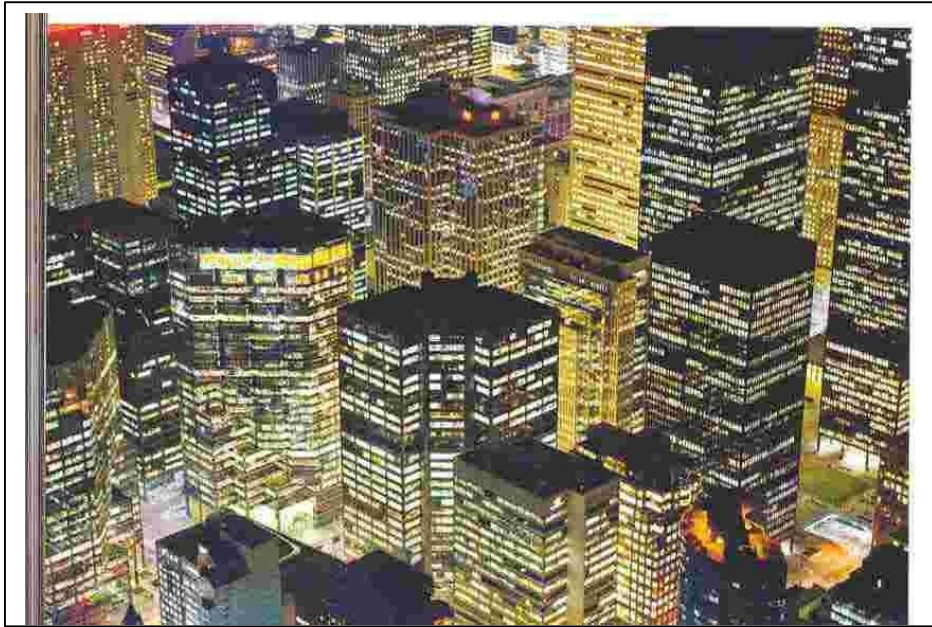


Рис. 29.3. Світлове забруднення у великому місті

## 29.5. Радіоактивне забруднення

*Радіоактивне забруднення* □ це радіоактивні речовини на поверхні або всередині твердих тіл, рідин або газів (включаючи людське тіло), де їх присутність є небажаною, або процес, що призводить до їх появи в таких місцях.

### 29.5.1. Основні завдання радіоекологічного моніторингу

*Радіоекологічний моніторинг* — комплексна інформаційно-технічна система спостережень, досліджень, оцінювання та прогнозування радіаційного стану біосфери, територій поблизу АЕС, потерпілих від радіаційних аварій.

Головними завданнями радіоекологічного моніторингу є:

- спостереження та контроль за станом забрудненої радіонуклідами зони, її окремих особливо шкідливих ділянок та пропонування заходів щодо зниження шкідливості;
- моніторинг стану об'єктів природного середовища за одними і тими самими параметрами, які характеризують радіоекологічну ситуацію як у зоні забруднення, так і за її межами;
- виявлення тенденцій до змін природного середовища, спричинених функціонуванням екологічно небезпечних об'єктів і при реалізації заходів, що проводяться на забруднених територіях;
- з'ясування тенденцій до змін стану здоров'я населення, яке проживає на забруднених радіонуклідами територіях;
- інформаційне забезпечення прогнозу радіоекологічної ситуації у забрудненій зоні та країні загалом.

### 29.5.2. Джерела радіоактивного забруднення

З точки зору екології найбільш небезпечними є радіоактивні елементи з періодом напіврозпаду від кількох тижнів до кількох років. Наприклад, стронцій  $^{90}\text{Sr}$ , що накопичується у кісткових тканинах (28 років) та цезій  $^{137}\text{Cs}$  (32 роки). Крім того, небезпечними є ізотопи простих елементів, що входять у склад живої речовини –  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{35}\text{S}$ . Небезпечними є радіоактивні опади, що виникають внаслідок випробування ядерної зброї. Радіоактивні домішки розсіюються в атмосфері, а потім через ґрунт та воду попадають в біомасу. Джерелом радіоактивного забруднення може бути атомна промисловість. Забруднення може відбуватися під час видобування та збагачення копалин, використання сировини у реакторах, обробці ядерного палива в установках. Вкрай гострою для навколишнього середовища є проблема утилізації радіоактивних відходів.

### 29.5.3. Радіоактивні відходи

*Джерела радіоактивних відходів.* Усі ядерні реактори використовують уранове паливо. Уран виділяють з руди та очищують за допомогою хімічних процесів. Природний уран складається з 0,72% урана-235 і 99,2% урана-238. Такий уран використовують у реакторах з важкою водою. Для роботи реакторів з легкою водою потрібний уран-235, концентрація якого збільшується в 4–5 разів на збагачувальних підприємствах. Уранове паливо виготовляють у вигляді стержнів, які занурюють у реактор, де вони залишаються до двох років. За цей час ці стержні стають вкрай радіоактивними через процес розкладу та утворення трансуранових елементів – плутонію, америцію, кюрію. Після того, як стержні виймають з реактора, їх охолоджують протягом одного-двох років в спеціальних басейнах та транспортують до підземного сховища.

Основними виробниками радіоактивних відходів та місцями їх концентрації на сьогодні в Україні є:

- АЕС (відпрацьоване ядерне паливо та експлуатаційні радіоактивні відходи);
- урановидобувна та переробна промисловість (накопичено 65,5 млн т радіоактивних відходів);
- медичні, наукові, промислові та інші підприємства та організації;
- Українське державне об'єднання «Радон» (накопичено близько 5000 м<sup>3</sup> радіоактивних відходів);
- зона відчуження Чорнобильської АЕС (понад 1,1 млрд м<sup>3</sup> радіоактивних відходів).

*Утилізація рідких радіоактивних відходів.* Проблема поводження із рідкими радіоактивними відходами постійно актуальна для АЕС. Об'єм відпрацьованих відходів залежить від типу реактору: РБМК – 100 тис. м<sup>3</sup> рідких відходів на рік, ВВЕР – 40-135 тис. м<sup>3</sup>. Усього за рік на АЕС утворюється близько 1,7 млн м<sup>3</sup> рідких відходів. Середньо- та високоактивні рідкі РАВ на АЕС концентруються методом упарювання та зберігаються у вигляді концентратів, пульпи, іонообмінних смол та фільтроматеріалів у ем-



ностях із неіржавіючої сталі та залізобетону. Частина пульпи середнього рівня активності цементується та бітумується. Об'єми низькоактивних рідких РАВ настільки великі, що здійснювати будь-яку обробку чи очистку просто неможливо. Практикується консервація та ліквідація радіоактивних басейнів і водойм шляхом заповнення бетонними блоками, засипки скельним ґрунтом, щебенем чи глиною.

Усі рідкі радіоактивні відходи, що утворюються на енергоблоках, зберігаються у ємностях з нержавіючої сталі. За допомогою установок глибокого упарювання УГУ-500 проводиться переробка кубового залишку до сольового концентрату, який в гарячому розплавленому стані заливається у металеві бочки, перетворюючись після охолодження на моноліт. Бочки зберігають у сховищі твердих відходів чи у поверхневих шарах землі вище рівня ґрунтових вод. Це дозволяє зменшувати об'єми рідких радіоактивних відходів та зберігати їх у більш безпечному твердому стані.

Значна кількість рідких відходів також існує у інших областях ядерного використання: атомні підводні човни та підземні ядерні вибухи. Експлуатація та утилізація атомних підводних човнів військового та цивільного атомного флоту в Росії породила багато гострих проблем на Півночі та Далекому Сході, де немає достатніх потужностей для переробки рідких відходів. Після припинення поховання у морях відбувається їх постійне накопичення. Останній злив рідких РАВ у Японське море (400 м<sup>3</sup>, активність 0,38Кі) було здійснено у вересні 1993 р. Гострі проблеми з рідкими відходами флотів вирішуються за допомогою інших країн, включаючи фінансування Фінляндією, Норвегією та Японією.

Практично без уваги залишається питання з рідкими РАВ, що утворилися у порожнинах підземних ядерних вибухів. Вивчення їх дало можливість зробити висновок, що значні об'єми забруднених мас, сконцентрованих у порожнинах та поблизу них, дозволяють класифікувати їх як могильники РАВ тривалого функціонування. Від їх розповзання у Росії постраждали Саха (Якутія), Астраханська та Тюменська області.

*Утилізація твердих радіоактивних відходів.* Тверді відходи вважаються радіоактивними, якщо питома активність їх для джерел  $\alpha$ -випромінення більша від 1 кБк/кг (для трансуранових елементів — 0,1 кБк/кг); 10 кБк/кг — для джерел  $\beta$ - та  $\gamma$ -випромінення.

Основну частку загального об'єму твердих радіоактивних відходів - біля 98%, що утворюються у процесі експлуатації АЕС, складають низько- та середньоактивні відходи. На багатьох АЕС розроблена та діє технологічна схема поводження з твердими радіоактивними відходами, що передбачає: збір безпосередньо на місцях утворення окремо від звичайного сміття; сортування з урахуванням їх природи (неорганічні, органічні, біологічні), періоду напіврозпаду радіонуклідів, що знаходяться у відходах (до 15 діб і більше 15 діб) та вибухопожежобезпеки;

- переробку (пресування);
- транспортування до місць поховання здійснюють на спеціально обладнаних автомашинах із критим кузовом або цистерною (для рідких відходів).

Автомашини та змінні збірники після кожного рейсу повинні бути дезактивовані;

- безпечне зберігання.

Тверді радіоактивні відходи цементують, бітумують, оскловують та тримають у контейнерах із нержавіючої сталі: на десятки років – в траншеях та інших неглибоких інженерних спорудах, на сотні років – у підземних виробках, соляних пластах, на дні океанів. Потужність дози випромінювання на відстані 1 км від збірника з радіоактивними відходами повинна бути не більше 0,1 мЗв/год.

Для поховання низькоактивних відходів можна використовувати сховища у вигляді резервуарів та траншей. Небезпечними є середньо- і високоактивні відходи. Поводження з ними передбачає поховання їх у затверділому стані у підземних сховищах та шахтах на глибині 300-1000 м. Поховання високоактивних відходів у шахтах не завжди можливе, тому що відходи виділяють велику кількість теплоти, що може призвести до вибухів. Менш небезпечним є поховання відходів у морі на великих глибинах в ізольованому вигляді, що потребує попередньої обробки відходів (оскління, бетонування, поміщення у високоміцні контейнери).

Для радіоактивних відходів абсолютно безпечних способів зберігання на сьогоднішній день немає через корозійне порушення контейнерів.

Найбільш радіоактивні відходи – *відпрацьоване ядерне паливо*, що являє собою опромінене ядерне паливо, подальше використання якого у ядерному реакторі не передбачається. Об'єм опроміненого ядерного палива у світі та в Росії досить значний. У світі до 2000 р. накопичено близько 250 тис. т опроміненого ядерного палива, а в Росії – близько 14 тис. т, а його сумарна радіоактивність – 5 млрд Кі.

Відпрацьоване ядерне паливо перед переробкою витримують у тимчасових сховищах – басейнах витримки (як правило, з примусовим охолодженням) від кількох діб до десятків років з метою зменшення активності. Порушення режиму зберігання може мати катастрофічні наслідки.

Новий спосіб захоронення високотоксичних та радіоактивних відходів було запропоновано на міжнародному екологічному форумі «Інвестиції в екологію – крок у майбутнє», що проходив у вересні 2001 р. у Москві. Вчені секції «Радіаційно-ядерна безпека» внесли на розгляд проект зберігання радіоактивних відходів у глибинних частинах Світового океану – океанічних жолобах.

Вчені стверджують, що більша частина глибоководних жолобів просторова тяжіє до узбережжя материків, що полегшує завдання транспортування небезпечних вантажів. Крім того, у світі накопичено значний досвід глибоководних досліджень, занурень апаратів та розробки на глибинах, наприклад, марганцевих родовищ, тому технічна сторона проекту не складна. Також спеціалісти зауважують, що за геологічними законами поховані матеріали будуть занурюватися ще глибше, що виключає можливість їх надходження у біосферу.

Проблема безпечного видалення та поховання радіоактивних відходів ще не вирішена остаточно і потребує подальшого розвитку.

Невирішеність питань ліквідації наслідків аварії, зокрема безпосередньо на ЧАЕС, недовіра економічних важелів у підтримці належних рівнів радіаційної безпеки на неядерних підприємствах, недостатність фінансування протирадіаційних заходів, недосконалість ядерного законодавства у частині фінансового забезпечення національних програм поводження з радіоактивними відходами, відпрацьованим ядерним паливом, зняттям ядерних об'єктів з експлуатації посилюють негативне ставлення населення до радіації взагалі та атомної енергетики зокрема. У державі виникла нагальна потреба виділення значних обсягів коштів та матеріальних ресурсів для приведення стану радіаційної безпеки і захисту персоналу, населення й навколишнього середовища у відповідність до вимог національного законодавства [128].

#### **29.5.4. Система раннього попередження про радіаційну аварію ГАММА-1**

Система раннього попередження про радіаційну аварію ГАММА-1 в Україні створена в 1994-1998 рр. Вона складається з Рівненської та Запорізької підсистем моніторингу, інформаційно-аналітичного центру, учбового центру та систем комунікації. В УкрНДІЕП, м. Харків, розташовані інформаційно-аналітичний та учбовий центри системи Гамма-1. Інформаційно-аналітичний центр призначено для обробки інформації, що надходить з Рівненської та Запорізької підсистем моніторингу в режимі реального часу та інформування кризового центру про радіаційний стан в місцях розташування Рівненської та Запорізької АЕС.

Рівненська система ГАММА-1 являє собою мережу з 26 станцій моніторингу з повітряними детекторами гамма-випромінювання, а також аерозольний та водний монітори, які розташовані в 30-ти км зоні Рівненської АЕС.

10-хвилинні дані вимірювань, метеорологічна інформація та інша службова інформація по каналах радіозв'язку та телефонних лініях автоматично надходять на сервер регіонального центру системи до державного управління екології та природних ресурсів у Рівненській області, а далі по виділених телефонних каналах – до Кризового Центру Мінекоресурсів України у м. Київ.

Останній координує дії на випадок виникнення аварійних ситуацій, а також здійснює експертну оцінку радіаційної обстановки. Головне управління з питань надзвичайних ситуацій та цивільного захисту населення облдержадміністрації також має у режимі реального часу доступ до бази даних системи.

Система ГАММА-1 на території України включає в себе національний центр (інформаційно-кризовий центр ІКЦ), розташований у Мінекобезпеки та два локальних центри (у мм. Рівне та Запоріжжя). Окрім того, до складу системи входять:

- 27 постів контролю потужності дози  $\gamma$ - випромінювання, встановлених у зоні Рівненської АЕС;
- 11 постів контролю потужності дози  $\gamma$ - випромінювання, встановлених у зоні Запорізької АЕС;
- 1 пост автоматичного контролю  $\alpha$ -  $\beta$ - активності аерозолів, розміщений на відстані 5 км від Рівненської АЕС;
- 1 автоматичний пост контролю  $\gamma$ - активності води на Рівненській АЕС;
- 2 автоматичні пости метеоконтролю (на Рівненській та Запорізькій АЕС).

Інформація про відповідні дози від датчиків по радіоканалах надходить до локальних центрів, а далі по спеціально виділених телефонних каналах передається у національний центр. Міністерство з надзвичайних ситуацій України та обласні підрозділи міністерства у м. Рівне та Запоріжжя також мають доступ до інформації системи ГАММА-1 у режимі реального часу (режим on-line).

У плани Мінекобезпеки входить розповсюдження системи дистанційного моніторингу на всі АЕС України (при належній підтримці Німеччини та Євросоюзу). Європейський Союз у рамках програми TACIS паралельно з системою ГАММА розробив та впроваджує систему RODOS (Real Time On-line Decision Support System) — європейська система підтримки прийняття рішень у реальному часі по зовнішньому об'єктному реагуванню при ядерних аваріях. У проекті RODOS задіяні вчені понад 40 інститутів країн Центральної та Східної Європи, України, Росії та Білорусі.

Основними завданнями системи RODOS є забезпечення засобами для обробки та управління великими обсягами інформації метеорологічного та радіаційного типу, здійснення оцінки та прогнозу радіаційної ситуації у випадку аварії, а також моделювання використання контрзаходів і варіантів дій при аварії.

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Дати визначення забрудненню навколишнього середовища.
2. Що таке забруднююча речовина?
3. Назвати причини та ознаки «хвороби білих пальців».
4. Дати визначення терміну «шум».
5. Пояснити шкідливу дію мобільного зв'язку.
6. Як впливає на живу природу світлове забруднення?
7. Сформулювати головні завдання радіоекологічного моніторингу.

### *СЕМІНАР*

#### **Тверді відходи**

Класифікація та характеристики твердих відходів. Перероблення відходів у енергію – добування біогазу, перероблення біомаси. Муніципальні тверді відходи (МТВ) та їх динаміка у часі. Порівняння найпоширеніших практик поводження з МТВ. Фактори, що впливають на тверді відходи. Захист населення та довкілля від МТВ. Мінімізація джерел МТВ та застосування повторного циклу (рециклінг).

Методи повторного циклу. Збирання, сортування та переробка МТВ. Перероблення та утилізація особливо небезпечних відходів (пестицидів). Сортування, роздільне збирання, інтегроване управління відходами виробу з відходів. Методологія оцінювання МТВ (моніторинг, моделювання, контроль). Переробка та утилізація МТВ в Україні. Основні шляхи вирішення проблеми МТВ у контексті екологічної безпеки. Конфліктні ситуації у світі, пов'язані з МТВ. Тверді відходи в океані. Тверді відходи у космосі.



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

### МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ В АТМОСФЕРІ [129]:

Розглянемо клуб забруднювача, який поширюється під впливом вітру у просторі у площині  $x, z$  (рис.1). Концентрація забруднюючої речовини  $C(x, y, z)$  змінюється згідно з нормальним (Гаусовим) розподілом та залежить від середньої швидкості вітру  $\langle V \rangle$  та швидкості викиду забруднюючої речовини  $Q$ :

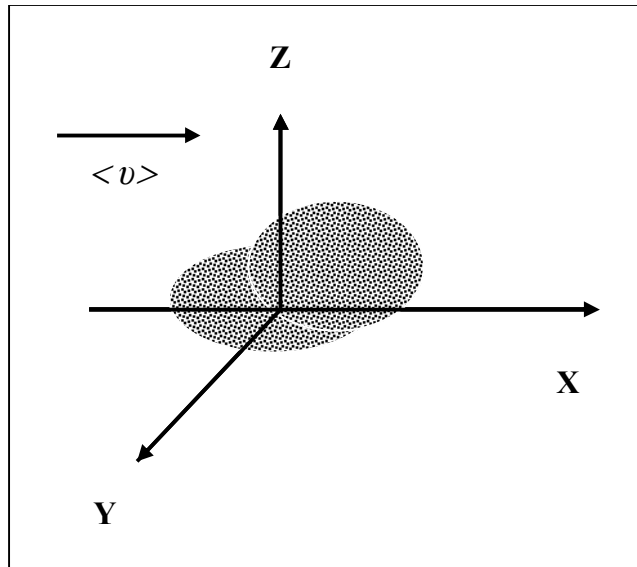


Рис. 1. Поширення клуба забруднюючої речовини під впливом вітру

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{\langle V \rangle} G_y G_z, \quad (1)$$

де

$$G_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right], \quad (2)$$

$$G_z = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right]. \quad (3)$$

Тут  $\sigma_y$  і  $\sigma_z$  - стандартні відхилення дисперсії у напрямках  $y$  та  $z$ ;  $Q$  вимірюється у  $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Звідси

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{\langle V \rangle} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \right\} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} =$$

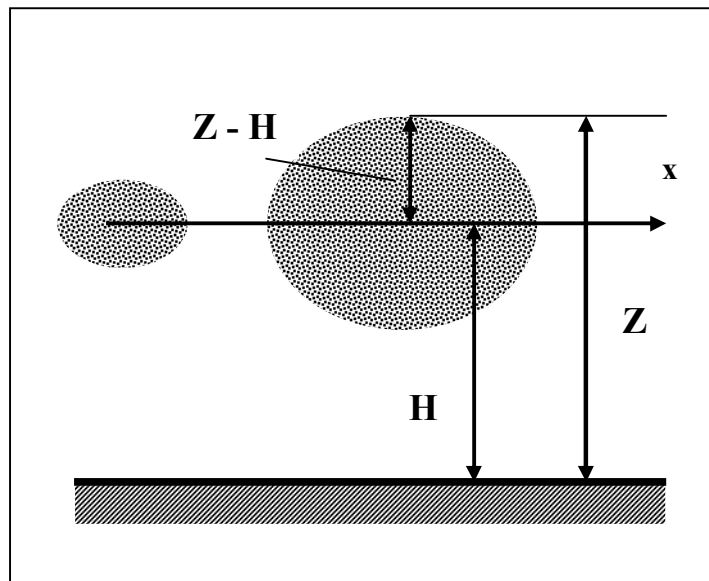
$$= \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right]. \quad (4)$$

Якщо центр клуба забруднюючої речовини знаходиться на висоті  $H$  від земної поверхні, то концентрація забруднюючої речовини у будь-якій точці на висоті  $z$  визначається за виразом:

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]. \quad (5)$$

Схему поширення забруднюючої речовини наведено на рис.2. Величини коефіцієнтів дисперсії  $\sigma_y$  і  $\sigma_z$  залежно від відстані до джерела забруднення та атмосферних умов наведено у номограмах (рис.3); категорії атмосферної стабільності оцінюють за табл.1.

Рис. 2. Схеми поширення клуба забруднюючих речовин



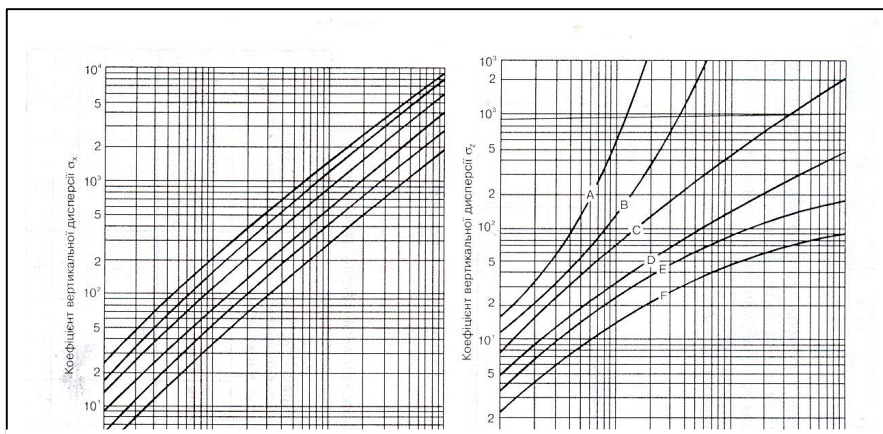


Рис. 3. Номограма для визначення коефіцієнтів дисперсії залежно від відстані до джерела забруднення та атмосферних умов: А – надзвичайно нестабільні; В – помірно нестабільні; С – трохи нестабільні; D – нейтральні; Е – трохи стабільні; F – помірно стабільні атмосферні умови

#### 1. Категорії атмосферної стабільності

Швидкість приповерхневого (10 м) вітру, м·с <sup>-1</sup>	День: характеристика сонячного випромінювання, що надходить			Ніч: рівень хмарності	
	Інтенсивне	Помірне	Слабке	≥ 4/8 низької хмарності	≤ 3/8 низької хмарності
< 2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

#### Приклад

Хмара газу  $H_2S$  рухається зі швидкістю  $\langle v \rangle = 2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Потужність джерела забруднення становить 500 кг/день. Визначити висоту хмари на відстані  $x = 2000 \text{ м}$  від джерела, при якій концентрація газу не перевищує  $30 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Атмосферна стабільність відповідає категорії F.



### Розв'язання

Припускаючи, що максимальну концентрацію газ має на рівні земної поверхні ( $z = 0$ ) і те, що хмара поширюється у напрямку  $x$  ( тобто  $y = 0$  ), рівняння ( 5 ) можна записати так:

$$C(x,0,0) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z\langle V \rangle} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{H^2}{\sigma_z^2}\right].$$

Підставляємо числові дані:

$$30 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} = \frac{500 \text{ кг} / 86400 \text{ с}}{3,14 \cdot 70 \cdot 20 \cdot 2} \exp\left[-\frac{H^2 \text{ м}^2}{2 \cdot 20^2 \text{ м}^2}\right].$$

Звідси

$$\exp\left[-\frac{H^2}{800}\right] = 0,046.$$

$$H = 49,63 \text{ м}.$$

### Моделювання підіймання клуба забруднювача в атмосфері

Уявимо джерело, яке висилає в атмосферу нагріте до температури  $T_3$  клуб забруднюючої речовини. Якщо температура  $T_a$  навколишнього середовища менша за  $T_3$ , відбувається піднімання клуба. Рівняння, яке описує процес піднімання клуба забруднюючої речовини, має вигляд:

$$\Delta H = 2,6 \left( \frac{F}{\langle V \rangle S} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

де  $S$  – параметр стабільності,  $F$  – початковий потік забруднюючої речовини, який висилається із джерела,  $\langle v \rangle$  – середня швидкість вітру на висоті  $H$ .

Початковий потік забруднюючої речовини  $F$  визначається за виразом:

$$F = \frac{g(T_s - T_a) \langle U \rangle}{T_s} \left( \frac{D}{2} \right)^2. \quad (7)$$

Тут  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\langle v \rangle$  – середня швидкість висилання забруднюючої речовини із джерела,  $D$  – діаметр клуба.

Параметр стабільності  $S$  у рівнянні ( 6 ) визначається за формулою:

$$S = \frac{g}{T_a} \left[ \frac{\Delta T_a}{\Delta z} + 0,01^\circ C \cdot m^{-1} \right]. \quad (8)$$

Процес поширення клуба забруднюючої речовини в атмосфері наведено на рис.4.

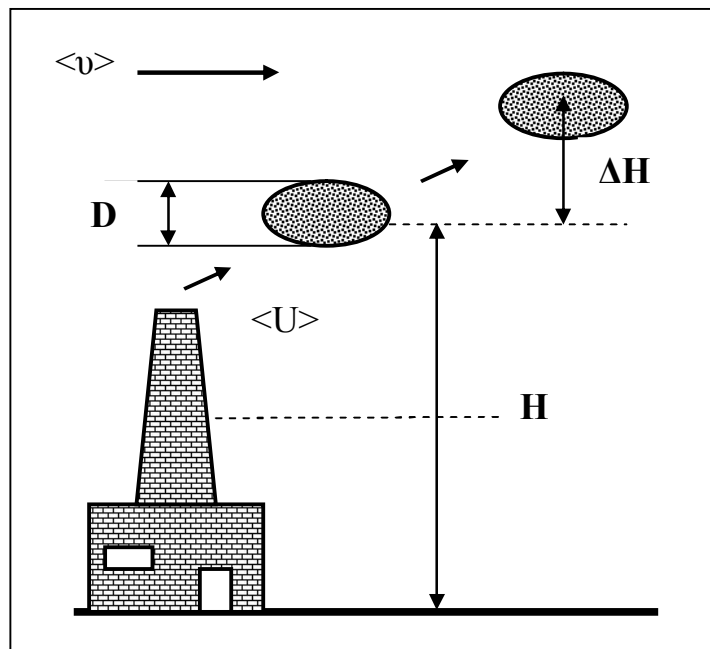


Рис. 4. Процес поширення клуба забруднюючої речовини в атмосфері (пояснення у тексті)

### Приклад

Паперова фабрика викидає у повітря клуб газу діаметром  $D = 2,5$  м з початковою швидкістю  $\langle U \rangle = 20$  м·с<sup>-1</sup>. Температура газу становить  $T_g = 122$  °С, а температура повітря  $T_a = 17$  °С. Середня швидкість вітру дорівнює  $\langle v \rangle = 2$  м·с<sup>-1</sup>. Визначити висоту піднімання клубу газу, якщо градієнт температури становить  $\frac{\Delta T}{\Delta z} = -6$  °С·км<sup>-1</sup>.

### Розв'язання

Визначимо початковий потік забруднюючої речовини:

$$F = \frac{g(T_g - T_a)\langle U \rangle \left(\frac{D}{2}\right)^2}{T_g} = \frac{9,81 \cdot (395 - 290) \cdot 20 \left(\frac{2,5}{2}\right)^2}{395} = 81,4 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-3}.$$

Параметр стабільності дорівнює:

$$S = \frac{g}{T_a} \left[ \frac{\Delta T_a}{\Delta z} + 0,01 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м}^{-1} \right] = \frac{9,81}{290} (-0,006 + 0,01) = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-2}.$$

Звідси висота піднімання клубу газу визначиться так:

$$\Delta H = 2,6 \left( \frac{81,4}{2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/3} = 174,3 \text{ м}.$$

### Контрольне завдання

Завод викидає в атмосферу клуб газу  $SO_2$  діаметром 1 м через трубу висотою 150 м. Температура клубу дорівнює 100 °С, температура повітря 15 °С, середня швидкість вітру  $\langle v \rangle = 15$  м·с<sup>-1</sup>, швидкість викидання газу  $\langle U \rangle = 10$  м·с<sup>-1</sup>, градієнт температури  $\frac{\Delta T}{\Delta z} = -8$  °С·км<sup>-1</sup>. Визначити висоту піднімання газу.

Відповідь:  $H = 46$  м.



## VI. ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ БІОСФЕРИ

### 30. ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ

Збирання, запис і аналіз інформації щодо об'єктів навколишнього середовища на відстані називається *дистанційним зондуванням*. Методи і техніка дистанційного зондування базуються на реєстрації поглинутої, відбитої або випромінювальної енергії, яка надає специфічні характеристичні ознаки основним компонентам біосфери.

Основні компоненти дистанційного зондування – джерело енергії, випромінювання, середовище, об'єкт, сенсор, система обробки та аналізу інформації.

#### 30.1. Поширення електромагнітного випромінювання крізь атмосферу

Електромагнітне випромінювання під час проходження через атмосферу зазнає поглинання та розсіювання. Крім того, теплове випромінювання і розсіювання з інших напрямків вносить свій вклад в випромінювання, що реєструється. Отже, вплив атмосфери на електромагнітне випромінювання, яке несе інформацію про об'єкт навколишнього середовища, має бути обмеженим.

*Поширення  $\gamma$ -випромінювання.* На інтенсивність  $\gamma$ -випромінювання, яке проходить через атмосферу на систему реєстрації, впливає вологість ґрунту. Збільшення вологості впливає на послаблення цього випромінювання.

*Поширення випромінювання видимої та близької інфрачервоної області спектра.* В видимому діапазоні основний вклад в ослаблення оптичного випромінювання вносять молекули і аерозолі атмосфери.

Основними молекулами атмосфери, які здатні поглинати оптичне випромінювання, є водяна пара, двоокис вуглецю, озон, кисень, оксид вуглецю, метан і оксиди азоту. Особливо багатими на лінії поглинання являються асиметричні молекули, такі як  $H_2O$ ,  $O_3$ . Молекули лінійні за своєю структурою ( $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $CO$ ,  $O_2, N_2$ ) мають меншу кількість ліній на спектральний інтервал, хоча спектри цих молекул можуть бути складними (як, наприклад, у молекули метану). Слід зауважити, що поглинання відбувається за рахунок переходів між коливальними та обертальними рівнями. Крім того, молекули основних компонентів атмосфери – азоту і кисню – внаслідок своєї симетричної структури позбавлені електричного дипольного моменту і не беруть участі в процесі поглинання.

При відсутності опадів атмосфера містить дисперговані тверді та рідкі частинки (льоду, пилу, ароматичних та органічних речовин, біологічних матеріалів), що мають розміри від декількох молекул до 40 мкм. Такі колоїдні системи, в яких газ (в даному випадку – повітря) містить дисперговані частинки, називаються *аерозолями*.

Під час взаємодії оптичного випромінювання із середовищем, внутрішня структура якого неоднорідна, має місце розсіювання випромінювання. Цей процес супроводжується поширенням частини випромінювання в напрямку, що відрізняється від напрямку поширення випромінювання, яке падає. Характер розсіювання оптичного випромінювання залежить від співвідношення між розмірами частинок середовища, які розсіюють, та довжиною світлової хвилі  $\lambda$ . Звичайно, в атмосфері середньої прозорості розсіювання на аерозолях домінує, якщо довжина оптичного випромінювання перевищує 0,5 мкм.

*Розсіювання Релея* виникає за рахунок зміщення зв'язаних електронів під впливом електричного поля, що падає на молекулу. Це поле сприяє утворенню диполя, який коливається і висилає електромагнітне випромінювання такої ж частоти. Розсіювання Релея характеризується тим, що інтенсивність розсіяного випромінювання змінюється залежно від четвертого ступеня довжини світлової хвилі. Саме такою залежністю можна пояснити природний блакитний колір неба, який спостерігається за рахунок відбивання сонячного світла від частинок пилу і водяної пари, присутніх в атмосфері. В видимій області спектра є суттєва залежність інтенсивності розсіяного випромінювання від довжини хвилі; розсіювання Релея відбувається при  $d < 0,05\lambda$ . В області  $\lambda > 1$  мкм цим типом розсіювання можна знехтувати.

*Розсіювання Мі* відбувається на частинках великих розмірів ( $d > \lambda$ ) і супроводжується виникненням інтерференції світла, що призводить до появи інтерференційної картини і суттєвої зміни діаграми кутового розподілу розсіяного світла.

*Розсіювання Дебая* відповідає проміжному випадку між двома попередніми типами розсіювання – Релея і Мі ( $0,05\lambda < d < \lambda$ ).

В інфрачервоній області спектра проходження електромагнітного випромінювання обмежене *вікнами прозорості* атмосфери (рис. 30.1).

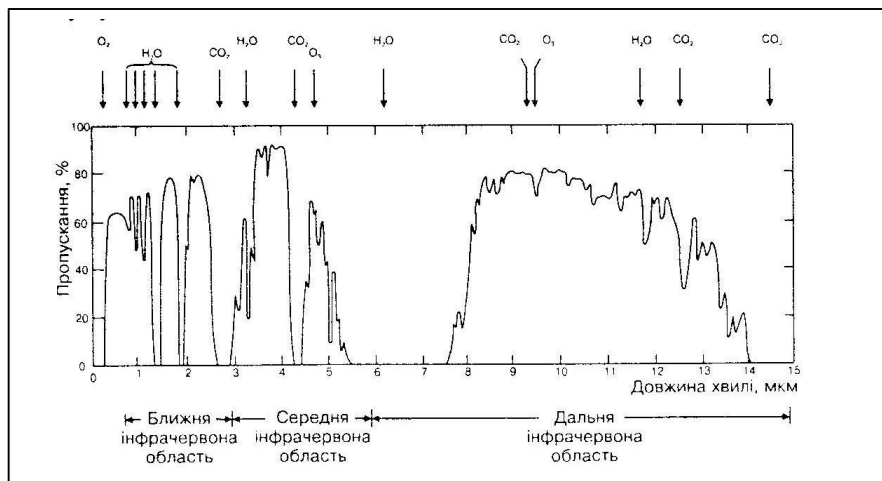


Рис. 30.1 – Вікна прозорості атмосфери

Таким чином, проходження оптичного випромінювання через атмосферу характеризується процесами його поглинання та розсіювання атмосферними молекулами і аерозолями. Під час проходження через атмосферу оптичне випромінювання зазнає ослаблення, яке визначається за законом Бера:

$$\tau = \frac{I(z)}{I_0} = e^{-\gamma z}, \quad (30.1)$$

де  $\tau$  – коефіцієнт пропускання,  $\gamma$  – коефіцієнт ослаблення,  $z$  – довжина оптичного шляху.

Величина коефіцієнта ослаблення  $\gamma$  залежить від процесів поглинання молекул  $k_{AM}$ , розсіювання молекул  $k_{SM}$ , поглинання аерозолів  $k_{AA}$ , та розсіювання аерозолів  $k_{SA}$ , що присутні в атмосфері:

$$\gamma = k_{AM} + k_{SM} + k_{AA} + k_{SA}, \quad (30.2)$$

де індекси “М” і “А” відповідають молекулам та аерозолям відповідно.

*Поширення надвисокочастотного випромінювання.* Використання НВЧ-області дає можливість спостерігати за землею поверхнею через хмари та опади. Спостереження, що проводять в вікнах прозорості (до 40 ГГц та в інтервалі 80–100 ГГц), проводять для оцінювання опадів з супутників.

### 30.2. Класифікація систем дистанційного зондування

Дистанційні методи поділяються на два основні типи: *пасивні* та *активні*. Пасивні методи засновані на вимірюванні природного теплового або відбитого сонячного випромінювання. Активні методи передбачають використання штучних джерел випромінювання (в першу чергу, лазерів) та реєстрацію відбитого випромінювання або флуоресценції об’єктів, що досліджуються.

Пасивні методи характеризуються певними обмеженнями: залежністю інформації, яка реєструється, від спектральних характеристик та положення Сонця, метеорологічних та кліматичних умов, оптичних параметрів атмосфери та ґрунту. Активним методам притаманна можливість зондувати об’єкт вузькою спектральною лінією, що разом із плавним перестроюванням частоти дозволяє збуджувати певні атоми та молекули. Перевагою цих методів є мала розбіжність лазерного випромінювання, що дає змогу переносити енергію на великі відстані. Вони також характеризуються більшою чутливістю та просторовим розділенням. Недоліком активних методів є висока вартість.

Сучасні методи дистанційного зондування передбачають використання різноманітної апаратури – від переносних приладів та платформ до авіаносіїв і супутників.

### 30.2.1. Реєстрація $\gamma$ -випромінювання

Метод базується на вимірюванні природного короткохвильового ( $\lambda < 2 \cdot 10^{-10}$  м)  $\gamma$ -випромінювання присутніх у земній корі або у сніговому покриві радіоактивних елементів – природних радіоізотопів  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{208}\text{Th}$ . У звичайному ґрунті 90%  $\gamma$ -випромінювання утворюється у 20-сантиметровому поверхневому шарі.

Кількість елементів K, Th і U в поверхневих шарах ґрунту оцінюють завдяки виявленню  $\gamma$ -випромінювання за допомогою сцинтиляційного лічильника, що утворюється під час радіоактивного розпаду цих елементів.

Для впевненої реєстрації  $\gamma$ -випромінювання використовують авіаносії, що повинні летіти на досить малій (максимум 120 м) висоті. Зона зондування становить 200-500 м, 1000 м, 5000 м і навіть 25000 м. Сигнали реєструють через кожну секунду, що відповідає відстані на поверхні близько 60 м.

Перевагами методу є можливість усереднення даних упродовж польоту авіаносія. Недоліком методу є обмежене просторове розділення та можливість вимірювань лише на невеликих висотах польоту авіаносія.

### 30.2.2. Фотографічні та відеографічні системи

В основі техніки повітряної фотографії лежить створення зображень земної поверхні з авіаносіїв та супутників на фотоплівці. Звичайно використовують чорно-білі панхроматичні, чорно-білі інфрачервоні, кольорові та кольорові інфрачервоні плівки. Фотографічні системи здатні створювати зображення об'єктів навколишнього середовища з високим рівнем розділення. Застосування техніки багатоспектральної фотографії надає можливість отримати додаткову специфічну інформацію, на яку в меншій мірі впливають температура та вологість навколишнього середовища. Фотографічні системи, що встановлюються на літаках, спроможні забезпечити знімки з висоти близько 20 км; розміри площі, яка фотографується, можуть досягати  $30 \times 50$  км<sup>2</sup>.

Застосування відеокамер дає можливість створювати та записувати зображення у видимій, близькій та середній інфрачервоній областях спектра. Перевагою відеосистем є невисока вартість, створення та накопичення послідовних зображень будь-якого процесу. До недоліків цієї техніки можна віднести невисоке просторове розділення.

### 30.2.3. Багатоспектральні сканери

Принцип дії цих систем полягає у реєстрації спектрального відбивання об'єктами навколишнього середовища на певних спектральних ділянках видимого та інфрачервоного спектра (0,3–14 мкм). Ці ділянки можуть бути або широкими (близько 0,2 мкм), або вузькими (менш ніж 0,01 мкм). Прилади багатоспектрального сканування, що встановлюються на супутниках, дозволяють отримати інформацію з роздільною здатністю близько 10 м, скануючи при цьому території розмірами 60–185 км.



Принцип дистанційного зондування за допомогою багатоспектрального сканера пояснюється на рис. 30.1.

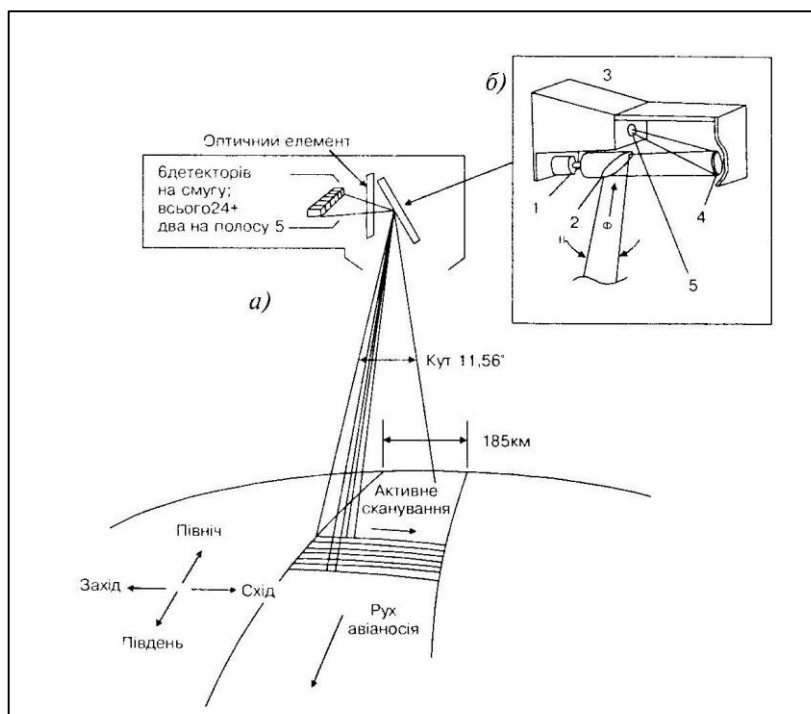


Рис. 30.1. Дистанційне зондування земної поверхні за допомогою супутника: *a* – принцип дії багато спектрального сканера; *б* – система сканування: 1 – двигун; 2 – сканер; 3 – монохроматор; 4 – дзеркало; 5 – щілина

Перевагою багатоспектральних сканерів є здатність використовувати вузькі спектральні ділянки та отримувати інформацію у цифровій формі. Багатоспектральні сканери використовують для аналізу земної поверхні, рослинних покривів, картографії, визначення вологості ґрунту, оцінки рослинної біомаси, сніжних покривів, непрохідних просторів.

#### 30.2.4. Теплові сенсори

Усі матеріали є джерелами інфрачервоного випромінювання, яке зумовлено молекулярними коливаннями. Це теплове інфрачервоне випромінювання реєструється за допомогою техніки, схожої на багатоспектральне сканування, але у діапазоні 8–14 мкм. Характер зображення при цьому залежить від температури об'єкта та його випромінювальної здатності. Теплові сенсори, які встановлюються на авіаносіях, що зондують об'єкти на невеликих висотах, забезпечують високу роздільну здатність (близько метра); тоді як на супутниках теплові сенсори розділяють простори розмірами 700–900 м.

Сучасні прилади теплового зондування здатні реєструвати різницю температур близько 0,4 К. До недоліків слід віднести вплив метеорологіч-

них умов на результати вимірювань; зондуванню ґрунту підлягає лише шар товщиною 2–4 см.

### **30.2.5. Надвисокочастотні (НВЧ) локатори**

Цей тип техніки дистанційного зондування передбачає використання електромагнітних хвиль в області від 0,1 см до 2 м (що відповідає частотам від 100 МГц до 50000 МГц). НВЧ-локаторні системи можуть бути активними (коли об'єкт дослідження опромінюється з подальшою реєстрацією відбитого випромінювання) та пасивними (коли реєструється природне випромінювання об'єкта).

Принцип дії дистанційного зондування земної поверхні за допомогою локаторів полягає у вимірюванні діелектричних властивостей цієї поверхні, які суттєво залежать від вмісту вологи та температури ґрунту, нерівності земної поверхні, рівня сніжного покриву, типу рослинних покривів та впливають на відбивальні та випромінювальні параметри, що вимірюються. НВЧ-локація дає можливість визначати положення, рух та природу віддалених об'єктів. Серед основних типів локаторів, що застосовуються при дистанційному зондуванні, слід відмітити локатори зображення, вимірювачі розсіяного випромінювання, висотоміри, НВЧ-радіометри. Завдяки високій проникності НВЧ-випромінювання через хмари та листя локатори здатні створювати зображення земної поверхні у дрібних деталях.

Об'єкти земної поверхні опромінюються локаторним імпульсами, які відбиваються, реєструються та перетворюються у зображення. Амплітуда відбитого імпульсу складним чином залежить від конкретного об'єкту спостереження. Альтернативним локатору зображення є локатор з синтетичною апертурою (ЛСА). Об'єкт з'являється у системі реєстрації локатора лише протягом певного проміжку часу; під час цього проміжку відбитий сигнал заноситься у пам'ять бортового комп'ютера. Усі таким чином записані сигнали дають можливість реконструювати повну картину всіх об'єктів, що опромінювалися локатором з достатньо вузькою апертурою (звідси термін «синтетична апертура»). Слід зауважити той факт, що сигнали локатора, що висилаються по ходу руху літака, набувають зсув до високих частот, тоді як сигнали, що висилаються назад, набувають зсуви до низьких частот завдяки доплерівському ефекту. Реєстрація та аналіз цих зсувів дає можливість точно визначати істинне просторове положення наземних об'єктів. Техніка локаторів з синтетичною апертурою достатньо складна і коштовна, але її можливості дозволяють найширше застосування. До переваг локаційних приладів можна віднести високу роздільну здатність, до недоліків – вплив рослинного покриву та нерівності ґрунту на сигнал, що реєструється.

#### **Приклад**

У 1977 р. у США було запущено космічні апарати Voyager-1 та Voyager-2, які провели дослідження планет Юпітер, Сатурн, Уран та Нептун. Зараз ці апарати виходять за межі Сонячної системи. Апарати летять з третьою космічною швидкістю – 16,6

км/с. Визначити, скільки часу потрібно для того, щоб радіосигнал пройшов до Землі та повернувся назад, якщо відстань між апаратом та Землею становить 14 млрд км.

### Розв'язання

Використовуючи формулу ( 1 ), отримуємо:

$$t = 2L/c = 2 \cdot 14 \cdot 10^{12} \text{ м} / 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 9,3 \cdot 10^4 \text{ с} = 93 \cdot 10^4 / 24 \cdot 3600 = 11 \text{ діб}$$

### 30.2.6. Дистанційне зондування рослинних покривів

В основі лазерного дистанційного зондування лежать процеси реєстрації поглинання, розсіювання та флуоресценції.

Метод дистанційного зондування рослинних покривів базується на збуджуванні флуоресценції хлорофілу випромінюванням лазера. Уперше цей метод було застосовано у 1973 році [122]. Результати застосування лазерної техніки для дистанційного контролю рослинних покривів упродовж розвитку та під впливом стресових умов висвітлено в роботах [123, 124]

Метод індукованої лазером перехідної флуоресценції було розроблено для вимірювання фотосинтетичних властивостей наземної рослинності [125,126]. Метод передбачає просторову та часову модуляцію випромінювання збудження, що утворюється лінійкою лазерних діодів (рис.28.13).

Сигнал збудження потужністю 30-50 Вт/м<sup>2</sup> впливає на насичення фотосинтетичного транспорту електронів, викликаючи перехідне збільшення флуоресцентного сигналу. Амплітуду перехідного флуоресцентного сигналу та швидкість насичення флуоресценції контролюють за допомогою таких параметрів, як оптимальний квантовий вихід фотосинтезу  $Y_{ef}$ , відносна швидкість електронного транспорту  $ETR$ , фотосинтетична ефективність  $ETR_{max}$ .

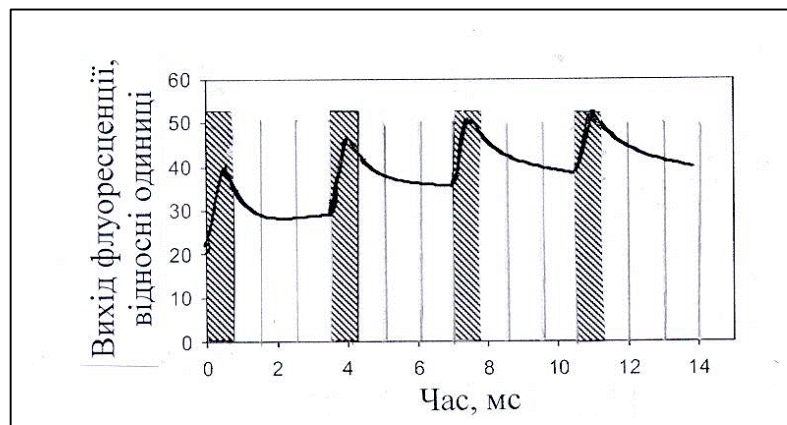


Рис. 30.2. Модуляція інтенсивності збудження флуоресценції (заштриховані ділянки). Інтенсивність випромінювання флуоресценції (суцільна лінія) набуває перехідного збільшення під час дії імпульсу збудження та зменшення впродовж відсутності дії цих імпульсів [125]

Метод дозволяє визначати фотосинтетичні параметри рослин на відстані від 50 м на земній поверхні до 150-300 м під час застосування авіаносіїв. На рис. 30.4 наведено результати дистанційного вимірювання перехідної флуоресценції рослин *Persea americana* та *Ficus sp.*

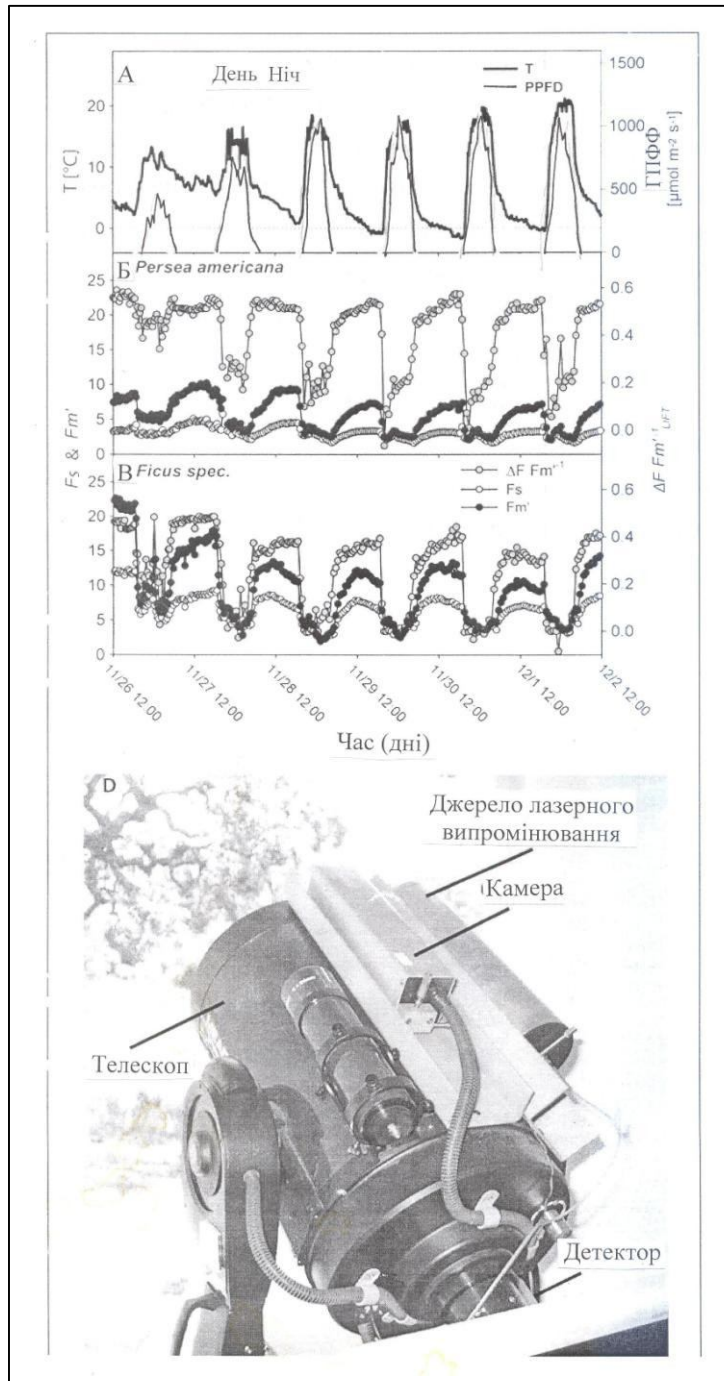


Рис. 30.3.. **Метод індукованої лазером флуоресценції:** А – залежність температури та густини потоку фотосинтетичних фотонів (ГПФФ) від часу доби та дня тижня; результати дистанційного вимірювання перехідної флуоресценції рослин *Persea americana* (Б) та *Ficus sp.* (В). Тут:  $F_s$  – стаціонарна флуоресценція;  $F_m'$  – максимальна флуоресценція адаптованого до темряви листа;  $\Delta F = F_m' - F_s$  ефективність квантового

Метод флуоресцентної спектроскопії дає можливість реєструвати та аналізувати вплив різноманітних природних та антропогенних стресів на рослинні покриви, а саме: агрохімічних препаратів, збезводнення, механічних пошкоджень, температури, недостачі азоту, забруднення біосфери тощо.

### 30.2.7. Лідари

Прилад для дистанційного зондування компонентів біосфери називається ЛІДАРом (від англійської фрази **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging). Класифікують лідари залежно від тих параметрів лазерного випромінювання, зміна яких реєструється.

*Лідар на основі реєстрації зворотного випромінювання.* Зворотне розсіювання описується таким рівнянням:

$$P_r(R) = P_0 \left( \frac{c\tau}{2} \right) k_p S_r R^{-2} \exp \left[ -2 \int_0^R k_A(r) dr \right] \quad (30.3)$$

де  $P_r(R)$  – миттєва потужність, яка реєструється приймачем у момент часу  $t$ ,  $P_0$  – потужність, яка пропускається об'єктом в момент часу  $t_0$ ,  $c$  – швидкість світла,  $\tau$  – тривалість імпульсу,  $k_p$  – коефіцієнт об'ємного розсіювання атмосфери,  $R$  – дальність,  $S$  – ефективна площа приймача,  $k_A$  – коефіцієнт об'ємної екстинкції атмосфери.

Розрахунки та приклади обчислення параметрів, що входять у рівняння лідара цього типу, наведено у роботі [15].

Реєстрація рівня послаблення оптичного випромінювання лідара за рахунок його взаємодії з атмосферними молекулами або аерозолями дає можливість оцінити їх концентрацію.

Джерелом випромінювання у лідарі є лазер, який генерує світлові імпульси. Якщо лазерний імпульс поширюється в атмосфері до будь-якого об'єкта, то час  $t$  проходження імпульсом відстані  $L$  до об'єкта і назад до приймача дорівнює:

$$t = 2L/c, \quad (30.4)$$

де  $c$  – швидкість світла.

Реєстрація моменту сприймання імпульсу приймачем дає можливість оцінити відстань до об'єкта.

Крім того, лазерний імпульс має певну тривалість  $\tau$ . Якщо припустити, що передній фронт імпульсу досягає об'єкта на відстані  $R$ , то задній фронт імпульсу в цей час буде знаходитися на відстані  $R'$ . Співвідношення між  $R$ ,  $R'$ , часом  $t_0$  та часом  $t$  реєстрації імпульсу мають вигляд:

$$R = c(t - t_0)/2; \quad (30.5)$$

$$R' = c(t - t_0 - \tau)/2. \quad (30.6)$$

Звідси розмір  $D$  об'єкта визначають за виразом:

$$D = R - R' = c\tau/2. \quad (30.7)$$

Лідар на основі реєстрації диференційного поглинання. Метод базується на реалізації суттєвої залежності коефіцієнта об'ємної екстинкції від довжини світлової хвилі. В основу роботи диференційного лідара покладено принцип опромінювання об'єкта, що контролюється, світлом із різними довжинами хвиль. Випромінювання з однією ( $\lambda_0$ ) довжиною хвилі, яка співпадає з лінією поглинання об'єкта (газу чи забруднення) поглинається об'єктом, тоді як випромінювання з іншою ( $\lambda_\omega$ ) довжиною хвилі, яка далека від лінії поглинання, набуває пружне розсіювання (рис.36.2). Критерієм оцінки забруднення атмосфери є відношення сигналів, які реєструються на обох довжинах хвиль. Лідар такого типу отримав в англійській літературі назву *DIAL* (**D**ifferential **A**bsorption **L**idar) або *DAS* (**D**ifferential **A**bsorption **A**nd **S**cattering).

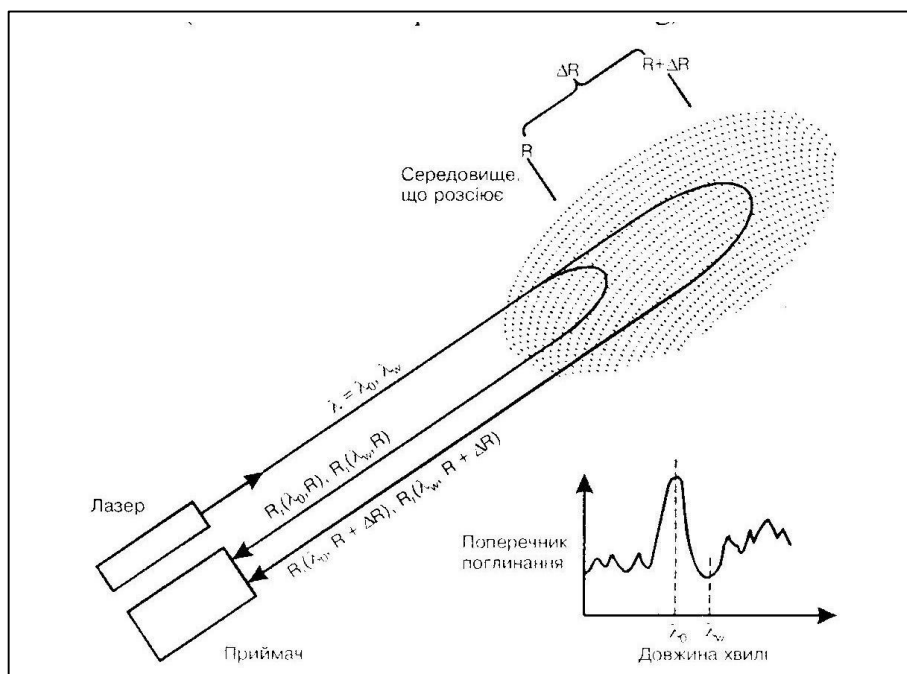


Рис. 30.2. Принцип дії лідара на основі реєстрації диференційного поглинання

Мінімальна концентрація газу чи забруднювача, які вимірюються методом реєстрації диференційного поглинання, визначається за виразом:

$$N_{min} = \frac{\Delta \ln a}{2\sigma \Delta R}, \quad (30.8)$$

де  $\sigma$  – переріз диференційного поглинання, а величина  $\Delta \ln a$  описується рівнянням:

$$\Delta \ln a = \ln \frac{P(\lambda_0, R)}{P(\lambda_0, R + \Delta R)} - \ln \frac{P(\lambda_\omega, R)}{P(\lambda_\omega, R + \Delta R)}, \quad (30.9)$$

Для практичних обчислень залежно від того, в яких одиницях вимірюється концентрація  $N$ , використовуються такі вирази:

$$N_{min} (\text{см}^{-3}) = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\Delta \ln a}{\sigma (\text{см}^2) \Delta R (\text{м})}; \quad (30.10)$$

$$N_{min} (\text{г} \cdot \text{см}^{-3}) = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\Delta \ln a}{\sigma (\text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}) \Delta R (\text{м})}; \quad (30.11)$$

$$N_{min} (\text{млн}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}) = \frac{5 \Delta \ln a}{\sigma (\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}) \Delta R (\text{км})}. \quad (30.12)$$

В останньому виразі  $\sigma$  називають коефіцієнтом диференційного поглинання  $k$ , який можна пов'язати з  $\sigma (\text{см}^2)$  виразом:

$$k (\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}) = N_0 (\text{см}^{-3} \cdot \text{атм}^{-1}) \sigma (\text{см}^2), \quad (30.13)$$

(де  $N_0 = 2,55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot \text{атм}^{-1}$  – густина молекул в атмосфері на рівні моря при температурі  $0^\circ \text{C}$ ), або:

$$k (\text{млн}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}) = 2,55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot \sigma (\text{см}^2) \cdot 10^{-6}. \quad (30.14)$$

#### Приклад

Визначити мінімальну концентрацію молекул  $\text{SO}_2$ , якщо  $\Delta \ln a = 0,02$ , а  $\Delta R = 100$  м. Коефіцієнт диференційного поглинання  $\text{SO}_2$  становить  $k = 26 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$

#### Розв'язання

Підставляємо числові дані у вираз (30.12):

$$N_{min} (\text{млн}^{-1} \cdot \text{атм}) = \frac{5 \cdot 0,02}{26 (\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}) \cdot 0,1 \text{ км}} = 0,038 \text{ млн}^{-1} \cdot \text{атм}.$$

#### Контрольне завдання

Визначити коефіцієнт диференційного поглинання  $k (\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1})$  озоном випромінювання з довжиною хвилі  $0,29 \text{ мкм}$ , якщо  $\Delta \ln a = 0,02$ ,  $\Delta R = 0,1 \text{ км}$  і  $N_{min} = 0,08 \text{ млн}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ .

Відповідь:  $12,5 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ .

*Доплерівський лідар.* Суть ефекту Доплера полягає у тому, що при опромінюванні об'єкта, який рухається зі швидкістю  $v$ , світлом певної довжини хвилі  $\lambda$  відбувається розсіювання світла, причому частота (довжина хвилі) розсіяного світла залежить від швидкості руху об'єкта. Доплерівський зсув  $\Delta f$  частоти світла залежить від кута розсіювання  $\theta$  світла об'єктом, швидкості руху  $v$  об'єкта та від кута  $\phi$  між напрямком швидкості і напрямком поширення світла:

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi. \quad (30.15)$$

### Приклад

Визначити швидкість руху частинок аерозолі під впливом вітру для таких параметрів доплерівського розсіювання:  $\Delta f = 2,2 \cdot 10^7$  Гц,  $f = 4,7 \cdot 10^{14}$  Гц,  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\theta = 180^\circ$ .

### Розв'язання

Підставимо числові дані у формулу (30.15):

$$\begin{aligned} v &= \frac{\lambda \cdot \Delta f}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi = \frac{c \Delta f}{2f} \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi = \\ &= \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 2,2 \cdot 10^7 \text{ Гц}}{2 \cdot 4,7 \cdot 10^{14} \text{ Гц}} \sin 90^\circ \cos 0^\circ = 7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \end{aligned}$$

### Контрольне завдання

Визначити величину доплерівського зсуву, що реєструється при опромінюванні краплин дощу, для таких параметрів:  $\lambda = 638$  нм,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ ,  $v = 6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Відповідь:  $9,4 \cdot 10^6$  Гц.

*Лідар на основі реєстрації флуоресценції.* Суть флуоресцентних методів полягає в опромінюванні речовини, яку досліджують, збудженні молекули цієї речовини та перевипромінюванні світла у вигляді флуоресценції. Довжина хвилі випромінювання флуоресценції завжди перевищує довжину хвилі збудження. Реєстрація різноманітних параметрів флуоресценції (інтенсивності, спектрів випромінювання та збудження, часової кінетики, поляризації тощо) дає можливість отримати інформацію про речовину, яка є об'єктом дослідження. Перевагами методів флуоресцентної спектроскопії є висока чутливість, селективність та універсальність.

*Лідар на основі реєстрації комбінаційного розсіювання.* Розглянемо молекулу, на яку подають монохроматичне випромінювання з частотою  $\nu_0$ . Комбінаційне розсіювання світла можна розглядати як процес, що складається з двох пов'язаних актів: поглинання кванта  $h\nu_0$  первинного світла частоти  $\nu_0$  та випромінювання кванта  $h\nu_p$  частоти  $\nu_p$ . Однак, на відміну від процесу флуоресценції, при комбінаційному розсіюванні система під впливом кванта з енергією  $h\nu_0$  не переходить у збуджений електронний стан. Ось чому енергія  $h\nu_0$  первинного кванта може бути значно меншою, ніж енергія  $h\nu_e$  кванта, здатного перевести молекулу з основного електронного стану  $E_0$  у збуджений електронний стан  $E_1$  (рис. 26.33,а). У процесі комбінаційного розсіювання світла квант світла  $h\nu_0$  діє на електронну систему молекули та передає їй чи приймає від неї частину енергії, завдяки чому переходить у інший, так званий *віртуальний* коливальний стан; квант, що розсіюється, має незмінну енергію  $h\nu_p \neq h\nu_0$ . Пояснення виникнення віртуального стану є не простим завданням; можна уявити, що квант з енергією  $h\nu_0$  здатний настільки «затрясти» електронну оболонку молекули, що з'являється вірогідність зміни її коливального стану.



Отже, частина випромінювання розсіюється зі зміною частоти  $\nu_0 \pm \nu$ ; таке розсіювання спричиняється пружними зіткненнями молекул з фотонами та називається *комбінаційним*. Внаслідок зіткнень енергія молекули набуває зміни  $\Delta E$ :

$$\Delta E = h\nu_0 - h(\nu_0 \pm \nu_p) = \pm h\nu_p, \quad (30.16)$$

де  $h$  – стала Планка,  $\nu_p$  – комбінаційний зсув.

Комбінаційне розсіювання світла, що виникає внаслідок переходу молекули з незбудженого коливального стану, який характеризується коливальним квантовим числом  $V = 0$ , у збуджений стан з  $V = 1$ ;  $V = 2$  тощо, називається *стоксовим* (рис. 30.3).

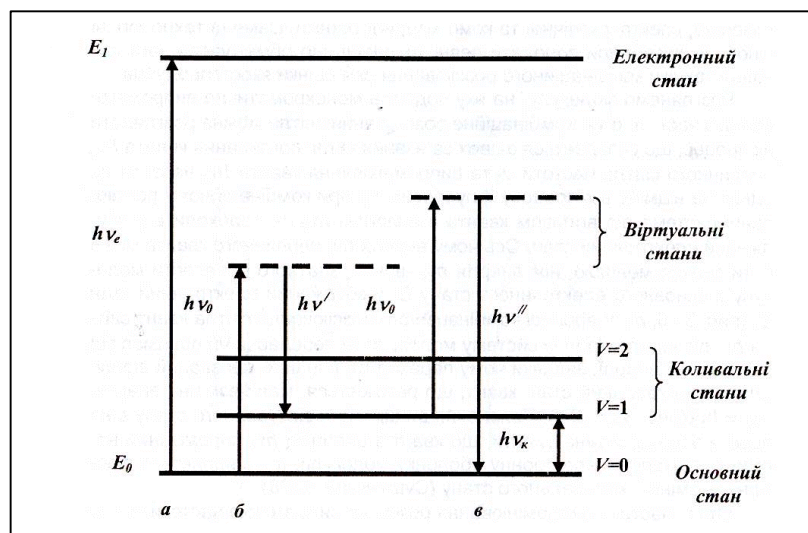


Рис. 30.3. Схема переходів при поглинанні та комбінаційному розсіюванні світла (пояснення в тексті)

Енергія кванта світла, що розсіюється, менша, ніж енергія поглинутого кванта. Зміна енергії молекули у цьому разі позитивна ( $\Delta E > 0$ ); співвідношення між енергіями квантів, що падає та розсіюється, має вигляд:

$$h\nu' = h\nu_0 - h\nu_\kappa, \quad (30.17)$$

де  $h\nu_0$  – енергія поглинутого кванта;  $h\nu_\kappa$  – енергія збудженого коливального стану молекули.

Якщо ж до дії світла молекула знаходилася у збудженому коливальному стані (наприклад, з  $V = 1$ ), то внаслідок комбінаційного розсіювання світла вона спроможна перейти у незбуджений коливальний стан з  $V = 0$ , причому енергія кванта світла, що розсіюється, перевищує енергію поглинутого кванта; зміна енергії молекули в цьому разі негативна ( $\Delta E < 0$ ). Таке розсіювання називається *антискотковим* (рис. 30.4).

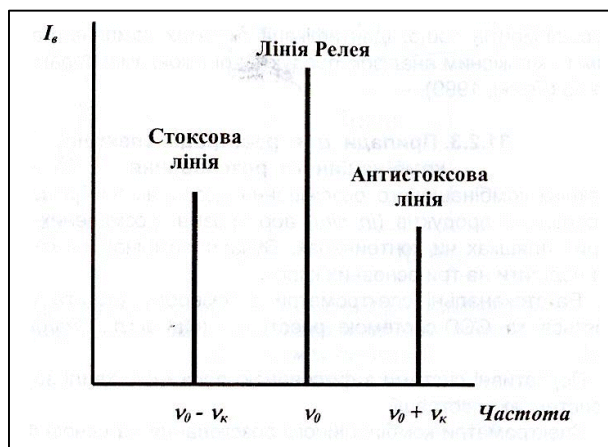


Рис. 30.4. Спектр комбінаційного розсіювання

Співвідношення між енергіями квантів, що падають та розсіюються, має вигляд:

$$h\nu'' = h\nu_0 + h\nu_k. \quad (30.18)$$

Співвідношення (30.17) та (30.18) пояснюють основні закономірності структури спектрів комбінаційного розсіювання. Комбінаційні лінії розташовані симетрично відносно незміщеної (*релеївської*) лінії, частота якої співпадає з частотою збуджуючого світла  $\nu_0$ . Частота кожного із супутників являє собою комбінацію частоти збуджуючого світла та частоти коливального переходу. Кожному супутнику з частотою  $\nu_0 - \nu_k$  (*стоксова лінія*) відповідає супутник з частотою  $\nu_0 + \nu_k$  (*антистоксова лінія*) (рис. 30.4).

Усі ці міркування можна застосовувати й до обертальних переходів молекули. Так саме, як і в інфрачервоній спектроскопії, у спектроскопії комбінаційного розсіювання діють правила добору. Спектри комбінаційного розсіювання знаходяться у інфрачервоній області; вони не дублюють інфрачервоні спектри, а доповнюють їх.

*Перевагами* методу спектроскопії комбінаційного розсіювання є його неруйнівність; можливість аналізу сільськогосподарських продуктів *in situ* та *in vivo*. Спектральні комбінаційні зсуви специфічні для кожної молекули, а інтенсивність кожної лінії пропорційна концентрації кожного компонента, що важливо з точки зору ідентифікації компонентів продуктів. Вузькі спектральні лінії та комбінаційні зсуви обмежують вплив прямого та розсіяного випромінювання; метод характеризується просторовим і часовим розділенням. Слід також відзначити можливість досліджень об'єктів, які знаходяться у твердому стані, а також рідкому стані або містять у собі воду, оскільки вода демонструє слабкий комбінаційний спектр. Для реалізації методу потрібні незначні (близько 100 мл) кількості речовини, що дослі-

джується; розміри зразків визначаються типовим діаметром (близько 50 мкм) лазерного випромінювання

*Недоліками* методу є слабка інтенсивність сигналу комбінаційного розсіювання, яка становить близько  $10^{-10}$ – $10^{-12}$  від інтенсивності падаючого випромінювання. Крім того, більшість продуктів містять речовини, що флуоресціюють; через те що інтенсивність флуоресценції перевищує інтенсивність комбінаційного розсіювання, реєстрація останнього являє собою проблему. Нарешті, висока інтенсивність лазерного випромінювання, що подається на зразок, викликає небажані фотохімічні ефекти.

### **30.3. Застосування дистанційного зондування**

*Реєстрація  $\gamma$ -випромінювання* дозволяє за рахунок оцінки рівня його послаблення визначати вологість ґрунту, наявність або кількість снігу на поверхні.

*Фотографічні та відеографічні системи* застосовуються для визначення типів та структури ґрунтів, аналізу стану рослинних покривів, спостереження за дренажними системами, оцінки характеру морських поверхонь. Завдяки використанню фотографічних систем можна отримати інформацію щодо просторового розподілу седиментів, характеру ерозійних процесів, викиду забруднень та стічних вод з труб.

*Багатоспектральні сканери* використовують для аналізу земної поверхні, рослинних покривів, картографії, визначення вологості ґрунту, оцінки рослинної біомаси, сніжних покривів, непрохідних просторів, кольору океану

*Теплові сенсори* знаходять застосування при визначенні рівня теплового забруднення водойм, оцінках розмірів, температури рослинних покривів та впливу на них зовнішніх факторів, вологості ґрунту, теплових аномалій, температури та стану поверхні водойм, морських течій, льодових та сніжних масивів, вулканічної активності, евапотранспірації, дренажних структур, термічних індустріальних викидів. Широкого застосування набула техніка дистанційного зондування теплового інфрачервоного випромінювання для аналізу ландшафтних екологічних процесів – вимірювання випаровування, евапотранспірації та вологості ґрунту, вивчення характеристик теплового балансу та теплових потоків, оцінки теплообміну між лісовими масивами.

*Надвисокочастотні (НВЧ) локатори* дають можливість вимірювати характеристики ґрунтів (нерівність, структуру, вологість), рослинних покривів та опадів, оцінювати водні ресурси, стан морської поверхні, прогнозувати наближення цунамі, визначати типи та розміри льодових масивів, аналізувати характер упаковки снігу. Яскравими прикладами застосування радіолокаційної техніки є дистанційне спостереження за блискавкою та дистанційний контроль за повенями.

*Реєстрація пасивного НВЧ-випромінювання* застосовується для спостереження за температурним станом земної та морської поверхонь, визна-

чення вологості ґрунту, оцінки розмірів та стану рослинних, льодових та сніжних покривів.

*Лазерні системи* використовуються для дистанційного зондування атмосфери, зокрема визначення висоти хмар, дослідження структури та властивостей хмар, вимірювання параметрів вітру, вимірювання вологості та температури повітря, оцінки опадів. Лазерні системи, що встановлені на борту авіаносія чи супутника, здатні проводити топографічні вимірювання на земній поверхні, оцінювати рослинні покриви, водяні потоки, ерозійні процеси.

Використання техніки реєстрації розсіювання оптичного випромінювання видимої області спектра лежить в основі аналізу молекул та аерозолів, присутніх в атмосфері.

Лазерний диференційний лідар застосовується для дослідження розподілу забруднень над промисловими підприємствами, визначення озону.

Доплерівський лідар використовують для вимірювання параметрів вітру та опадів.

З точки зору контролю навколишнього середовища перспективними можна вважати застосування флуоресцентної дистанційної спектроскопії для оцінки в атмосфері частинок попелу з підприємств, які використовують вугілля; сполук кальцію та ртуті з плавильних та металургійних заводів, флуоридів, які супроводжують виробництво алюмінію або фосфору; частинок сульфатів, хлоридів, ванадію, миш'яку, оксидів та сульфідів різноманітних елементів. Серед неорганічних та органічних сполук, які супроводжують діяльність хімічних та промислових підприємств та які демонструють флуоресценцію, варто відмітити такі:  $AlF_3$ ,  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $CaF_2$ ,  $CaSO_4$ ,  $CuSO_4$ ,  $HgSO_4$ , криоліт, кам'яновугільний газ, фосфати.

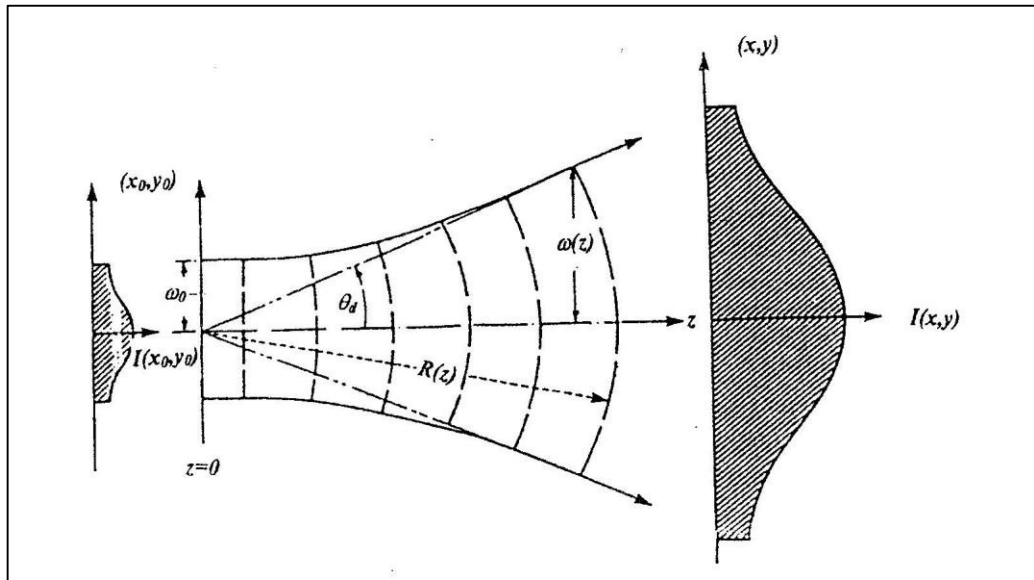
Лідар на основі комбінаційного розсіювання може бути застосований для визначення наявності та кількісної оцінки атмосферних молекул, таких як  $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $C_2H_4$  та ін. Слід також відзначити можливість досліджень об'єктів, які знаходяться у рідкому стані або містять у собі воду; за допомогою методів спектроскопії комбінаційного розсіювання можливо вимірювання температури поверхні водойм.

У інфрачервоній області спектра домінує поглинання сонячного випромінювання різноманітними газами над розсіюванням. Так, аналіз поглинання в області 4,3 мкм ( $CO_2$ ), 4,5 мкм ( $N_2O$ ) та 13–15 мкм ( $CO_2$ ) використовують для вимірювання температурних профілів; в області 6–7 мкм – для оцінки водяної пари; за станом земної поверхні доцільно проводити спостереження у широкій області 8–12,5 мкм.

**ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ**  
**ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**Розбіжність лазерного випромінювання**

Лазерний промінь характеризується Гаусовим розподілом профілю інтенсивності у поперечному перерізі. Радіус променя  $\omega$  визначається як відстань в поперечному напрямку від осі променя до точки, в якій інтенсивність зменшується в  $1/e^2$  величини, яку вона має на осі (рис. 1).



**Рис. 1. Гаусів розподіл інтенсивності у поперечному перерізі лазерного променя**

Розмір поперечника променя  $\omega(z)$  на відстані  $z$  від найбільш вузького поперечника променя визначається за виразом:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (\lambda z / \pi \omega_0^2)^2} ; \quad (1)$$

де  $\omega_0$  – радіус найвужчої частини променя;  $\lambda$  – довжина хвилі.

Промінь розходить з відстанню; кут  $\theta$  розбіжності променя визначається за виразом:

$$\theta = \omega(z)/z = \lambda / \pi \omega_0. \quad (3)$$

**Приклад**

Розрахувати діаметр неколімованого лазерного променя діаметром 1 мм на верхні перистих хмар, висота яких становить 10 км, якщо розбіжність лазерного променя дорівнює  $10^{-3}$  радіан.

**Розв'язання**

Підставляємо у рівняння (1) числові дані:

$$\begin{aligned} \omega(z) &= \omega_0 \sqrt{1 + (\lambda z / \pi \omega_0^2)^2} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м} [(1 + (633 \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot 10^4 \text{ м}) / (3,14 \cdot 25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2))]^{1/2} = \\ &= 5 \cdot 10^{-4} \text{ м} [1 + 6,33 \cdot 10^{-3} / 78,5 \cdot 10^{-8}]^{1/2} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot 90 = 450 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,45 \text{ м}. \end{aligned}$$

### Контрольне завдання

Для газових лазерів розбіжність становить:  $\theta \approx 10'$ ; для твердотільних –  $\theta \approx 10' - 40'$ ; для напівпровідникових –  $\theta \approx 30^\circ$ . Перевести ці величини у радіани.

### Контрольне завдання

Розрахувати діаметр неколімованого лазерного променя діаметром 1 мм на поверхні Місяця (відстань до якого від Землі становить  $L=384400$  км). Розбіжність лазерного променя дорівнює  $10^{-3}$  радіан.

### Коліматор

Розбіжність лазерного випромінювання може бути значно зменшена за допомогою *коліматора*, який являє собою дві послідовно розміщені лінзи з фокусними відстанями  $f_1$  і  $f_2$ , причому фокуси обох лінз знаходяться в одній точці (рис. 2).

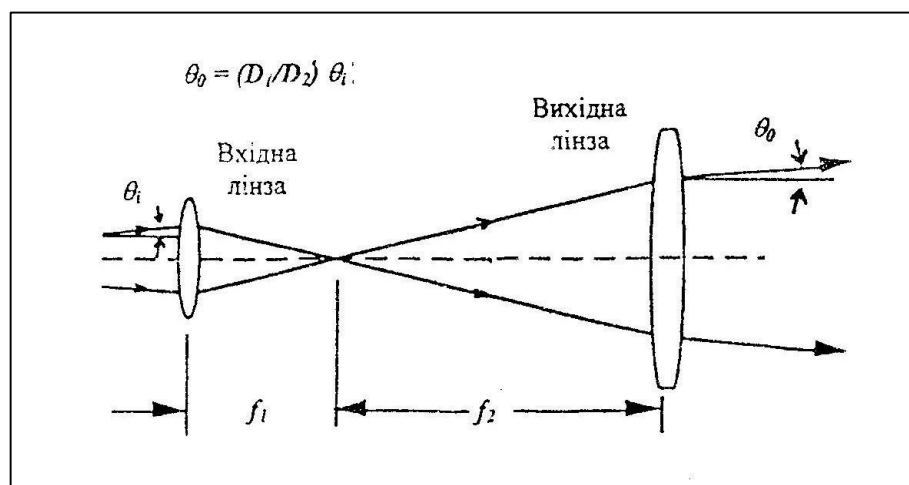


Рис. 2. Принцип дії коліматора

Діаметр колімованого променя визначається за виразом:

$$D_q = (f_2/f_1)D_i, \quad (4)$$

де  $D_i$  – діаметр неколімованого променя. Основним наслідком колімації лазерного променя є зменшення розбіжності до рівня:

$$\theta_0 = (f_1/f_2)\theta_i = (D_1/D_2)\theta_i. \quad (5)$$

### Контрольне завдання

Лінзи з якими фокусними відстанями потрібно підібрати для коліматора, щоб зменшити розбіжність та отримати на Місяці діаметр променя 4 км?

### Конструктивні тести

1. Який лазер і чому доцільно використати як джерело збудження флуоресценції хлорофілу (690 нм і 740 нм) під час дистанційного зондування водної рослинності: He:Cd-лазер (440 нм), He:Ne-лазер (632,8 нм), CO<sub>2</sub>-лазер (10,6 мкм)?

2. Який лазер і чому доцільно використовувати для забезпечення зв'язку з косміч-

ним апаратом, що знаходиться поза земною атмосферою?

3. З теорії дифракції відомо, що якщо пропустити лазерний промінь через лінзу діаметром  $D$  та фокусною відстанню  $f$ , інтенсивність у центрі фокальної плями дорівнює:

$$I_0 = P \left( \frac{\pi D^2}{4\lambda^2 f^2} \right) \sim \left( \frac{D}{\lambda f} \right)^2 P,$$

де  $P$  – потужність лазерного випромінювання.

Оцінити інтенсивність випромінювання гелій-неонового лазера ( $\lambda = 632,8$  нм;  $P=1$  мВт), яка утворюється на сітківці (фокусна відстань  $f = 22,4$  мм) під час фокусування цього випромінювання кришталиком ока.

Порівняти одержану інтенсивність з інтенсивністю сонячного випромінювання, яка дорівнює  $7 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>.

Пояснити ваші дії під час відвідування дискотеки, де використовують лазерні промені для приваблювання відвідувачів.



## **VII. ПРИКЛАДИ ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ ПІСЛЯ АНАЛІЗУ МОНІТОРИНГОВИХ ДАНИХ**

Розглянемо технологічні процеси ремедіації як приклад налагодження управлінських рішень після аналізу моніторингових даних.

*Ремедіація* – це процес виведення забруднювачів з навколишнього середовища, зокрема з ґрунту, підземних, поверхневих вод та атмосфери з метою захисту здоров'я людини та довкілля. Слово *remedy* (від латин. *remedium* – лікувати) означає застосовувати щось, що знімає біль, лікує, або позбавляє порушень.

Є два підходи до ремедіації довкілля – *in situ* та *ex situ*. Перший підхід передбачає очищення середовища на місці; він дешевший та позбавлений ризику для персоналу, який реалізує цю технологію. Другий підхід ґрунтується на транспортуванні забрудненого середовища у спеціальні місця, де воно обробляється з метою очищення.

### **31. EX SITU РЕМЕДІАЦІЯ**

#### **311. Ремедіація ґрунту**

Ґрунт містить надзвичайно велику кількість металів та радіонуклідів, які знаходяться у розчинах завдяки різноманітним процесам сорбції або іон-обмінним реакціям. Розчинені забруднюючі речовини мігрують у підземних водах, надходять у рослини чи водні організми. Найбільш поширеними неорганічними речовинами у ґрунті та підземних водах є свинець, хром, цинк, арсен, кадмій. На відміну від органічних забруднюючих речовин та короткоіснуючих радіонуклідів, метали вважаються консервативними речовинами, які не розпадаються у ґрунті. Хоча є метали, такі як миш'як та кадмій, які завдяки процесам перетворення та сорбції можуть змінювати свої рухливість та відносну токсичність.

Забруднення ґрунту призводить до руйнування екосистем, зменшення продуктивності сільського господарства, порушення харчових ланцюгів, захворюванням людей та тварин.

Незважаючи на користь, яку можна отримати від очищеного ґрунту, процедура ремедіації ґрунту часто сповільнюється через високу вартість та трудомісткість. Ґрунтові компоненти та забруднюючі речовини, які взаємодіють завдяки силам електричного притягання, дуже важко роз'єднати. Крім того, ґрунт є механічно густим середовищем, що ускладнює та здорожчує процес розкопування та транспортування ґрунту з метою подальшого очищення. Саме через це увага звертається до технології фіторемедіації.

Найбільш поширеними підходами, які використовуються протягом 1970-1990 років, є для ґрунту – «копай та викидай», для підземних вод «накачай та обробляй».



## **31.2. Технології ремедіації**

Є три основних підходи щодо стратегії ремедіації:

- 1) *утримання* забруднюючих речовин у обмеженій просторовій зоні з метою запобігання його подальшого поширення;
- 2) *віддалення* забруднюючих речовин з відкритої у контрольовану зону;
- 3) *обробка* забруднених об'єктів до безпечних субстанцій.

Лише останній варіант дає можливість обмежити токсичність забруднюючих речовин. Перші два застосовують, коли можливість обробки забруднених об'єктів неможлива.

## **31.3. Утримання забруднюючих речовин**

Для іммобілізації забруднюючих речовин застосовують фізичні або гідравлічні бар'єри.

### **31.3.1. Фізичні бар'єри**

Принцип дії фізичного бар'єра полягає у контролі водних потоків з метою запобігання їх поширення. Цей бар'єр розташовують вздовж концентраційного градієнту забруднення. Глибина занурення такого бар'єра досягає 50 м, а горизонтальні розміри залежать від забрудненого ареалу та варіюють від десятків до кількох сот метрів.

Виконується фізичні бар'єри з глини, з цементу або металу. Ці фізичні бар'єри складаються з вертикально викопаних траншей, заповнених рідким розчином. Рідкий розчин являє собою суміш ґрунту+бентоніту та води або цементу+бентоніту та води. Останні затримують важкі метали та деякі органічні сполуки.

Бентонітові глини (K, Na, Al) мають добру каталітичну активність, зв'язуючі та склеюючі властивості. Спочатку упродовж викопування траншеї її заповнюють бентонітом для зміцнення стінок, а потім заповнюють траншею рідким розчином, який характеризується невисокою проникністю, а хімічною резистивністю та низькою вартістю.

Рідкі розчини використовують, коли масиви забруднень дуже великі та коли компоненти забруднень дуже небезпечні для попадання в організм людини через питну воду. Ефективність таких бар'єрів може досягати 95 %. Обмеження: деякі агресивні компоненти (кислоти, луги, сольові розчини, деякі органічні сполуки) можуть викликати руйнування бар'єрів.

Самі бар'єри деградують та руйнуються з часом. Такі фізичні бар'єри з рідких розчинів мають розміри 30 м у глибину та 0,6–1,2 м у ширину.

### **31.3.2. Пасивні та реактивні бар'єри**

Проникна реактивна стінка встановлюється поперек потоку забруднювача. Вода проходить через таку стінку, тоді як забруднююча речовина затримується. Як матеріал для такого бар'єра застосовують залізо нульо-

вої валентності, хелати (від грец. *χηλή*, *chelè* — «клішня») або внутрішньокомплексні сполуки — клішнеподібні комплексні сполуки, що утворюються при взаємодії іонів металів з молекулами деяких органічних сполук, сорбенти. До основних забруднюючих речовин слід віднести хлоромісні розчинники, органічні сполуки, метали, радіонукліди. У США встановлено близько 125 таких бар'єрів.

Як приклад можна навести використання гранул заліза, що взаємодіє з трихлороетаном, дихлороетаном, вінілхлоридом. Коли залізо окислюється, атом хлору віддається від сполуки через один з механізмів дехлорування, використовуючи електрон, який завдяки окисненню заліза. Хоча гранули заліза розчиняються, цей процес довготривалий.

Обмеженість методу: стінки пасивної дії втрачають з часом свої реактивні властивості та вимагають заміни. Проникність бар'єрів зменшується завдяки осадженню солей металів. Вартість 1,3–2,5 доларів США за куб. метр.

### 31.3.3. Гідравлічні бар'єри

Для іммобілізації забруднювачів застосовують гідравлічні бар'єри. Принцип дії гідравлічного бар'єра полягає у маніпулюванні водним тиском, який утворюється внаслідок додавання або вилучання води. Ключовим моментом цієї технології є можливість окреслити та зафіксувати зону забруднення з метою її захоплення, що здійснюється за допомогою системи траншей або колодязів. У такій дренажній системі забруднена вода збирається та відкачується (рис. 31.1). Зрозуміло, що розміри таких забруднених зон не можуть бути необмежено великими.

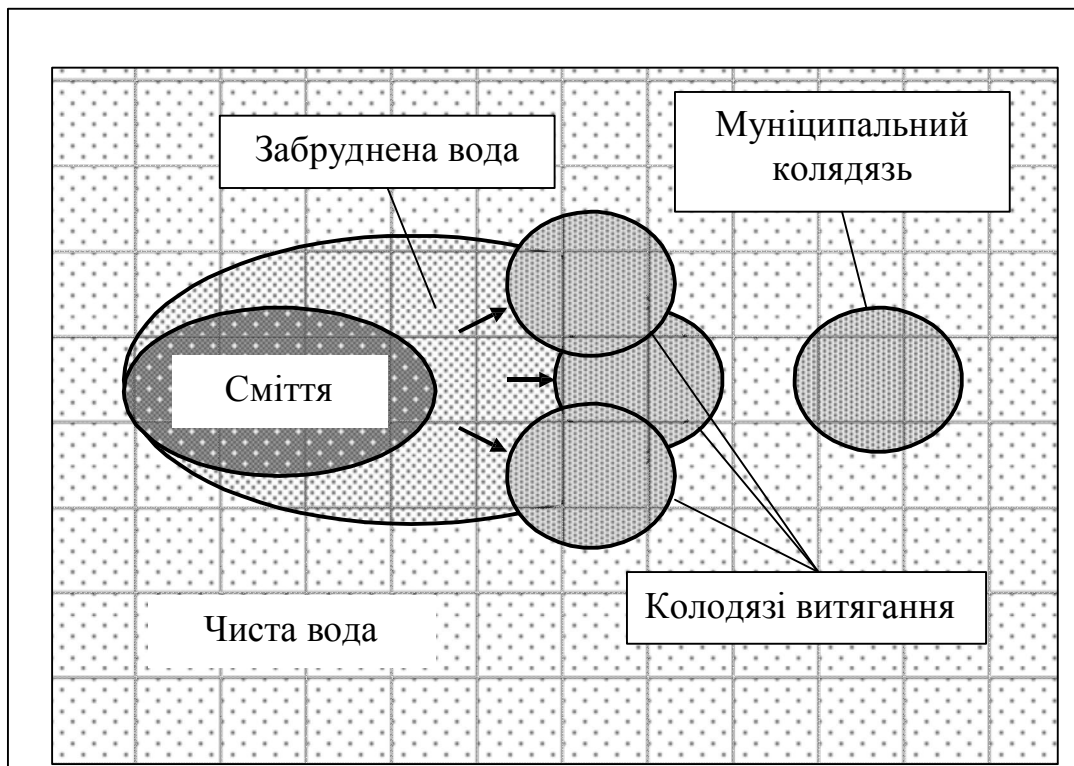


Рис. 31.1. Вилучення забрудненої води за допомогою гідравлічного бар'єра

Гідравлічні бар'єри зазнали більшого поширення порівняно з фізичними, не зважаючи на вищу вартість та довготривалість процесу встановлення бар'єрів та необхідність зберігання, обробки та розміщення великої кількості забрудненої води, яка викачується на поверхню.

Можливо застосування колодязів, у яких утворюється підвищений тиск, з метою обмеження поширення забруднених вод. Глибина гідравлічних бар'єрів досягає 50 м, а периметр може простягатися до кількох кілометрів.

### **31.4. Віддалення забруднюючих речовин**

Віддалення ґрунту передбачає обробку забрудненого ґрунту на полігонах. Основними забруднюючими речовинами є нафта, азбест (більш ніж 1 %), пестициди, діоксин, компоненти ракетного палива (перхлорати), леткі органічні сполуки, важкі метали.

#### **31.4.1. Викопування ґрунту**

Поширеним підходом є викопування забрудненого ґрунту. Але цей метод передбачає контакт робітників з забрудненим ґрунтом; він є коштовним, оскільки вимагає подальшої обробки ґрунту; він може застосовуватися для невеликих ареалів забруднення.

Недоліки: небезпека для робітників, що працюють з забруднювачами; забруднений ґрунт вимагає обробки, що характеризується високою вартістю; ця технологія може бути застосована для невеликих та неглибоких ділянок.

Дуже сумно, але близько 400 робітників гинуть щорічно та тисячі отримують поранення у США через інциденти з викопуванням ґрунту. Не слід забувати, що густина сухого ґрунту становить близько  $1300 \text{ кг/м}^3$ ; отже 1 кубометр важить 1350 кг!

#### **31.4.2. Накачування та обробка**

Поширеним є метод накачування та обробки забруднених ґрунтових вод. Забруднена вода відкачується для подальшої обробки, тоді як замість неї у забруднену зону накачується чиста вода (рис. 32.2).

Замість води у ґрунт може накачуватися повітря; оскільки в'язкість повітря менша, ніж води, такий метод вимагає менше енергії та є менш коштовним.

Ще одна модифікація гідравлічних бар'єрів передбачає застосування реактивних матеріалів, які розташовують на шляху забруднених потоків. Ці матеріали забезпечують перетворення забруднювачів у безпечні для навколишнього середовища форми.

Для обробки хімічних забруднюючих речовин використовують флокулянти разом з піщаними фільтрами. Обробку нафтопродуктів реалізують шляхом застосування активованого вуглецю у гранулах. Леткі органічні сполуки обробляють за допомогою технології розпилення повітря.

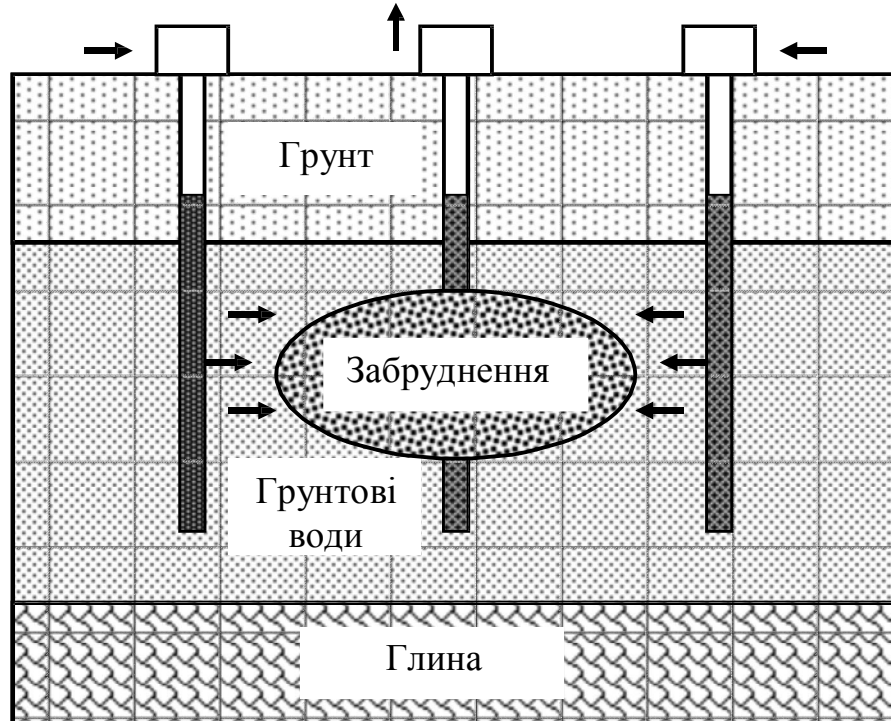


Рис. 31.2. Вилучення забрудненої води за допомогою методу накачування та обробки

Недоліки методу накачування та обробки:

1. Метод не завжди ефективний; рівень віддалення забруднюючих речовин залежить від хімічної природи цих речовин та геології простору, що обробляється; оптимальними умовами для застосування методу є мобільність та розчинність забруднень, мінімальна сорбція до оточення;
2. Серйозну проблему являє наявність у ґрунтових водах *рідин неводної фази (Non-Aqueous Phase Liquids або NAPL)*, густина яких перевищує густину води та які не змішуються та не розчинюються у воді. До цих рідин слід віднести ВТЕХ (скорочення термінів benzene, toluene, ethylbenzene та xylene) – суміш летких органічних сполук, що знайдені у нафтопродуктах та бензин, які менш густі, ніж вода; а також трихлороетан та хлорбензол, густина яких більша, ніж у воді. Ці рідини захоплюються порами ґрунту та розглядаються як довготривалі джерела забруднення. Всі ці сполуки знайдено у багатьох водоносних шарах США;
3. Забруднення, що знаходяться у вадозній (ненасиченій) зоні не підлягають відкачуванню; після припинення відкачування води мігрують у водоносний шар.

Вартість методу відкачування та обробки варіює від 50000 до 5 мільйонів доларів США, хоча в екстремальних випадках витрати можуть бути більшими.

В цілому, варто зазначити, що ефективність методу не дуже висока: лише дві третини рідин неводної фази вилучаються з водоносного шару; навіть прискорена промивка підвищує ефективність цього процесу до 50-80 %.

Альтернативою методу відкачування та обробки є застосування сурфактантів, метод біоремедіації, розпилення повітря, промивка ґрунту тощо.

### **31.4.3. Прискорена промивка**

Суть цієї технології полягає у додаванні у ґрунт води або добавок, що містять воду, з метою підвищення розчинності забруднень. Крім того, можлива інжекція води у водоносний шар з тим, щоб підняти його рівень до рівня забрудненого ґрунту.

Ця технологія може бути застосована для нейтралізації таких забруднюючих речовин, як рідини неводної фази, неорганічні сполуки, радіонукліди, леткі та напівлеткі органічні сполуки, паливо, пестициди.

Перспективно віддалення важких металів, хоча їх токсичність не зменшується.

Процес прискореної промивки ускладнюється низькою розчинністю забруднюючих речовин, високим рівнем їх сорбції, наявністю рідин, що не змішуються.

Аби запобігти впливу цих факторів, запропоновано ввести у ґрунт спеціальні розчини (*поверхнево-активні речовини* або *сурфактанти*), які містять молекули детергентів.

Сурфактанти характеризуються малим значенням коефіцієнту поверхневого натягу, через що вони зменшують взаємодію рідин на границі поверхонь. Окремі молекули забруднюючих речовин покриваються молекулами сурфактантів (розмірами 5-10 нм) та «розчинюються» у межах цього покриву.

Застосування прискореної ремедіації за допомогою сурфактантів дозволяє полегшити процес відкачування завдяки збільшенню рухливості та розчинності забруднюючих речовин, прикріплених до ґрунтової матриці.

### **31.4.4. Ґрунтова парова екстракція**

Ґрунтова парова екстракція (ГПЕ) – це *in situ* технологія ремедіації ненасиченої (вадозної) зони ґрунту, у основі якої лежить застосування вакууму до ґрунту з тим, щоб стимулювати контрольований потік повітря та вивести леткі та напівлеткі забруднюючі речовини з ґрунту (рис. 31.3).

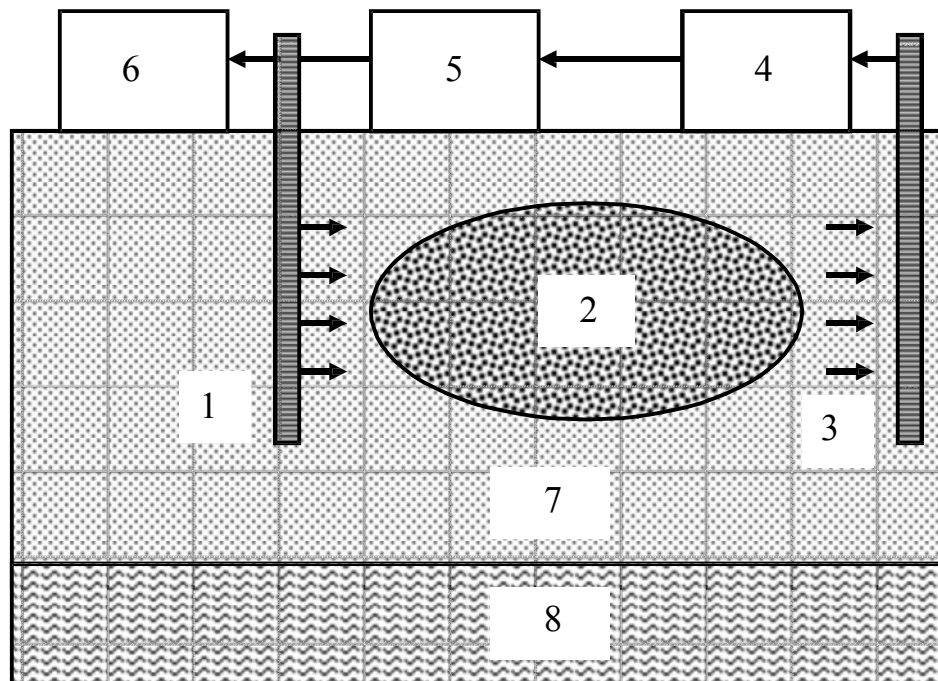


Рис. 31.3. Екстрагування пари з ґрунту: 1 – нагріте повітря або пара; 2 – забруднена зона; 3 – колодязь відкачування; 4 – сепаратор; 5 – насос; 6 – активований вуглець; 7 – ґрунт; 8 – ґрунтові води

Газ, що покидає ґрунт, підлягає обробці – його пропускають через гранульований активований вуглець. Крім того, потік повітря може стимулювати біодеградацію тих органічних забруднюючих речовин, які у меншій мірі леткі. На відміну від методу накачування та обробки, який передбачає застосування повітря; оскільки в'язкість повітря менша, ніж води, такий метод вимагає менше енергії та є менш коштовним.

Глибина занурювання свердловин становить від 1,5 м до 90 м.

Метод ГПЕ може бути застосований до таких забруднюючих речовин, як хлоровані розчинники, рідини неводної фази.

Технологія обробки ЛОС залежить від їх концентрації  $C$ : гранульований активований вуглець –  $C < 500$  ppmv; каталітичне окиснення –  $C = 500 - 2000$  ppmv; конденсація пари та хімічна обробка –  $C > 1000$  ppmv.

Леткі органічні сполуки (ЛОС) та напівлеткі органічні сполуки (НЛОС) присутні у нафтопродуктах, зокрема у бензині. Менш леткі нафтопродукти, такі як дизельне паливо, керосин, мастила, не випаровуються. Для їх віддалення застосовують метод *біовентиляції*, у основі якого лежить продування ґрунту нагрітим повітрям. Однак цей метод характеризується більшими енерговитратами, через що є більш коштовним.

На ефективність випаровування впливають такі фактори, як проникність ґрунту, структура та стратифікація ґрунту, вологість ґрунту та глибина розташування ґрунтових вод.

Переваги методу ГПЕ:

- Нескладне обладнання, яке легко встановлюється;
- Мінімальне турбування ґрунту;
- Короткотривалість процесу (від 1-30 днів до 0,5-2 років);
- Невисока вартість (20-50 доларів США за тону забрудненого ґрунту).

Недоліки методу ГПЕ:

- Може бути застосований лише до ненасиченої (вадозної) зони;
- Використання вакууму може призвести до засмоктування ґрунтової води, через що вона може бути забруднена;
  - Метод не віддаляє важкі нафтопродукти, метали, діоксини, поліхлорбіфеніли;
- Важко досягнути ефективність методу більшої, ніж 90 %;
- Можливі викиди забруднюючих речовин в атмосферу.

#### **31.4.5. Розпилення повітря**

Цей метод передбачає підвищення швидкості віддалення забруднюючих речовин (в першу чергу летких компонентів нафтопродуктів, а також ВТЕХ за рахунок інжекції повітря у забруднену насичену зону з метою перенесення маси летких та напівлетких забруднюючих речовин від ґрунтових вод за допомогою повітряних пухирців, які завжди прагнуть рухатися догори, де їх уловлюють. Забруднена ґрунтова вода відкачується на поверхню, де вона очищується біореактором, активованим вуглецем або згорянням. У воду додають поживні речовини або кисень для прискорення біодеградації забруднюючих речовин, але якщо їх концентрація незначна.

Розпилення повітря доцільно вживати при обробці більш летких компонентів з невеликою розчинністю та для ґрунтів з високою проникністю. Технологію розпилення повітря застосовують зазвичай разом з технікою відкачування та обробки та ґрунтовою паровою екстракцією.

Переваги методу:

- Нескладне обладнання, що легко встановлюється;
- Неруйнівність методу;
- Невисока вартість (20-50 доларів США за тону насиченого ґрунту).

Недоліки методу:

- Наявність численних каналів, якими повітря прямує до поверхні та які не завжди перетинають забруднену зону;
- Наявність зон з низькою проникністю, на яких диспергують забруднюючі речовини у просторі;
- Недостача лабораторних та експериментальних даних для повного розуміння процесів, що відбуваються під час розпилення повітря.

#### 31.4.6. Теплові методи

В основі теплових методів лежить нагрівання забрудненого ґрунту або ґрунтових вод, що призводить до руйнування летких органічних сполук, а також густих та легких рідин неводної фази.

З метою інтенсифікації десорбції (фізичного відділення від ґрунту), звітрювання (утворення летких речовин) та випаровування забруднюючих речовин використовують нагрівання забрудненої зони або нагрітою водою, повітрям, паром, або електричним чи радіочастотним способом, або за рахунок теплопровідності.

Електричний спосіб передбачає використання теплоти, що виділяється у провіднику у процесі проходження ним електричного струму. Ця кількість теплоти пропорційна квадрату сили струму, опору провідника та часу проходження струму. Нагрівання забезпечується електродами, що занурюються у ґрунт навколо центрального електрода. Отже, вся ділянка ґрунту пронизується електричними струмами, спрямованими від периферійних електродів до центрального. Температура ґрунту при цьому підвищується до 100-150 °С. Слід зазначити, що такий спосіб забезпечує швидку (менш ніж 40 днів) ремедіацію ґрунту, хоча вимагає витрат на енергію, через що є більш коштовним.

##### Переваги

- Метод може бути застосований для будь-яких ґрунтів;
- Можливість проводити ремедіацію під будівлями;
- Після закінчення процесу нагрівання, ґрунт залишається нагрітим довгий час (місяці або роки), що сприяє біоремедіації.

##### Недоліки

- Можливість обробляти невеликі за розмірами ділянки;
- Ділянки невеликої глибини, але великої площі характеризуються втратами енергії;
- Нафтопродукти та мастила утруднюють процес ремедіації;
- Наявність металевих конструкцій у зоні обробки спотворює шляхи проходження зони електричним струмом.

Інжекція нагрітого повітря або пари забезпечує випаровування летких органічних сполук, присутніх у залишках нафтопродуктів. До глибоко розташованих шарів ґрунту нагріте повітря постачається за допомогою високого тиску. Пара сприяє зменшенню в'язкості рідин, утворенню газової фази та збільшенню рухливості рідин неводної фази.

На глибині 40 м під тиском близько 7 атмосфер температура ґрунту досягає 164 °С.

Нагріта вода подається у ґрунт або ґрунтові води за допомогою свердловин. Завдяки нагріванню водою забезпечується переміщення рідин (в першу чергу рідин неводної фази) та зменшення в'язкості рідкого середовища.



Радіочастотне нагрівання забезпечується вертикально розташованими електродами, що оточують забруднену зону та утворюють конденсатор. Прикладання напруги до електродів викликає нагрівання до 300 °С.

Метод теплопровідності забезпечує нагрівання глибоких шарів ґрунту за допомогою колодязів, а неглибоких – завдяки поверхневому укритвалу. Внаслідок нагрівання виділяються продукти випаровування, які відкачуються до системи обробки.

#### 31.4.7. Електрокінетичний метод

В основі електрокінетичних методів лежить збільшення рухливості забруднюючих речовин за рахунок прикладання електричних полів: у забруднену зону занурюються металеві електроди, до яких прикладена напруга 50-150 В (рис. 31.6). Відрізняють такі електрокінетичні методи як [130]: *електроосмос* – це рух води (вологи) у ґрунті під впливом прикладеного електричного поля; *електрофорез* – це рух твердих частинок або краплин, завислих у електроліті, під впливом прикладеного електричного поля; *електроміграція* – це перенесення іонів або іонних комплексів до електроду протилежного заряду.

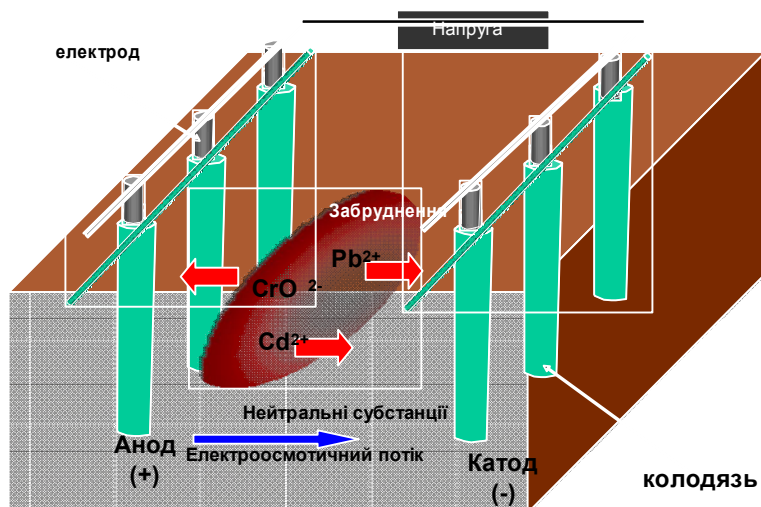


Рис. 31.6. Електрокінетичний метод ремедіації

Електрокінетичні методи застосовуються для очищення ґрунту від важких металів, радіонуклідів, нітратів та сульфатів, залишків нафтопродуктів.

Ці методи успішно використовуються для очищення ґрунтів з високим рівнем вологості, глини; вони характеризуються невисокою собівартістю.

Ще один метод – *Lasagna<sup>TM</sup>*, який передбачає застосування багатошарової структури, що містить плоскі електроди та напівпроникні пласти-

ни (рис. 31.7); ця технологія застосовується для вилучення важких металів з однорідних ґрунтів низької проникності.

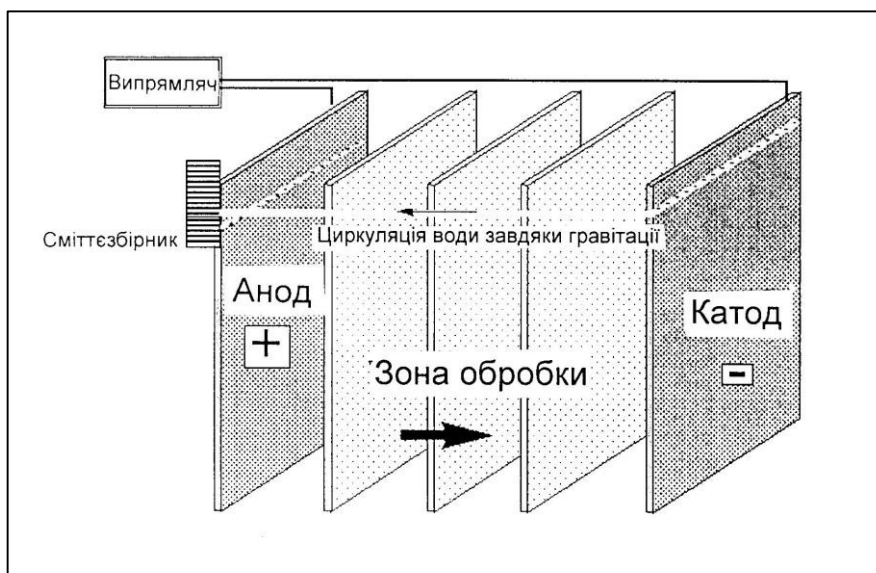


Рис. 31.7. Електрокінетичний метод *Lasagna*<sup>TM</sup>

Метод електрокінетичної ремедіації дає можливість віддаляти з ґрунту такі забруднювачі як важкі метали, радіоізотопи ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , уран), токсичні аніони (нітрати та сульфати), рідини неводної фази, цианіди, вуглеводні нафтопродуктів (дизельне паливо, бензин, керосин), вибухові матеріали.

Переваги:

- Характеризується високою ефективністю;
- Віддаленню підлягає багато різних забруднюючих речовин;
- Можливість обробляти ґрунти з низькою проникністю (глину);
- Можливість застосування як у насиченій, так і в ненасиченій зонах;
- Невисока собівартість

Недоліки:

- Залежність ефективності методу від вологості ґрунту: максимальна ефективність відповідає діапазону вологості 14-18 %; якщо вологість становить менше 10 %, ефективність методу різко спадає;
- Вплив металевих та провідних матеріалів у ґрунті на процес ремедіації;
- Необхідність застосування інертних електродів (вуглець, графіт, платина);
- Залежність розчинності забруднюючих речовин та ефективності процесу ремедіації від рН середовища (низькі значення рН сприяють збільшенню ефективності ремедіації);
- Необхідність застосування розчинів, що прискорюють процес.

## 32. *Ex Situ* БІОРЕМЕДІАЦІЯ

### 32.1. Заорювання

*Заорювання* – це процес біореємедіації, що реалізується у верхньому шарі ґрунту. Забруднений ґрунт, седименти або бруд вносяться у ґрунт, після чого верхній шар періодично переєортають з метою аерації або обробляють.

Метод успішно застосовується для реємедіації ґрунтів з залишками нафтопродуктів, вуглеводнів та пестицидів. Заорювання ґрунту сприяє прискоренню мікробної деєградації небезпечних компонентів.

Преєваги:

Простота, не потребує складного обладнання.

Недоліки:

1. Потребує великих площ;
2. Процеси, що відбуваються у ґрунті, не завжди контролювані;
3. Довготривалість процесу реємедіації;
4. Неорганічні сполуки не підлягають біодеєградації;
5. Іони металів можуть бути токсичними для мікрорганізмів.

### 32.2. Компостування

*Компостування* являє собою *ex situ* технологію реємедіації. Компост – це залишки органічних речовин рослинного та тваринного походження. Компост (або гумус) є продуктом розкладання органічної речовини. Компост покращує структуру ґрунту, збільшує кількість органічної речовини та забезпечує постачання поєживних речовин.

Компостування є контролюване розкладання органічної речовини. Щоб сприяти активності мієрофлори, купа компосту мусить містити такі інєредієнти як вуглець, азот, кисень, вода.

Найбільш активну участь у розкладанні беруть бактерії, гриби, плісняві гриби та актиноміцети – бактерії, що мають подібну грибам мієцеліальну будову, черв'яками, мурашки, равлики, слимаки тощо. Максимальне розкладання забезпечується за співвідношенням вуглець:азот (C:N) = від 25:1 до 30:1. Наприклад, для зрізаної трави C:N = 19:1, тоді як для осіннього листя C:N = 55:1; отже, переємішуючи ці два середовища, можна отримати оптимальне співвідношення C:N.

Солома, осінєне листя мієстять багато вуглецю; гній після травоїдних тварин, залишки фруєктів та овочів забезпечують азот. Кінський гній дає вуглець та азот разом.

### 32.3. Біокупа

Ця техніка переєбачає збирання забрудненого ґрунту у купу та стимулювання активності мієроорганізмів через аерацію або додавання поєживних речовин, солей, вологи. На відміну від заорювання та компостування, де процеси аерації забезпечуються завдяки природному повітєрю, біокупи

використовують вимушені потоки повітря, яке постачається або екстрагується через труби.

Застосовується для зменшення концентрації майже всіх компонентів нафтопродуктів.

Переваги:

- Застосовується для зменшення концентрації майже всіх компонентів нафтопродуктів.
- Відносна простота обладнання та процедури обробки;
- Короткочасна дія – від 6 місяців до 2 років;
- Невисока собівартість: 30-90 доларів США за тону забрудненого ґрунту;
- Ефективна дія на органічні компоненти з повільною швидкістю біодеградації;
- Потребує менші площі, ніж заорювання;
- Може бути сконструйована як замкнута система з контрольованою емісією газів;

Недоліки:

- Важко досягнути ефективності  $> 95\%$  та зменшення концентрацій  $< 0.1$  ppm;
- Метод не ефективний, якщо концентрації нафтових вуглеводнів перевищують 50,000 ppm;
- Наявність високих ( $>2,500$  ppm) концентрацій важких металів викликає пригнічення росту мікрофлори;
- Леткі компоненти прагнуть до випаровування раніше, ніж їх оброблять.



### 33. *In situ* БІОРЕМЕДІАЦІЯ

#### 33.1. Технології *in situ* біоремедіації

Ґрунт зазвичай містить різноманітні мікроорганізми, такі як бактерії, водорості, найпростіші, актиноміцети. Ці мікроорганізми здійснюють аеробний спосіб життєдіяльності, якщо ґрунт добре аерований. Серед всіх цих мікроорганізмів найбільш чисельну групу складають бактерії. Вони потребують вуглець як джерело енергії та для забезпечення росту клітин. Крім того, для росту клітин потрібні азот та фосфор. Отже, для деградації нафтових вуглеводнів потрібні великі за чисельністю популяції бактерій, яким потрібен кисень та поживні речовини.

Біоремедіація *in situ* ґрунтових вод являє собою технологію, яка сприяє росту та репродукції місцевих мікроорганізмів з метою інтенсифікації біодеградації органічних компонентів у насиченій зоні. Ця технологія сприяє ефективній деградації органічних компонентів, розчинених у ґрунтових водах або адсорбованих до матриці водоносного шару. Застосовується ця технологія для віддалення нафтових вуглеводнів.

Біоремедіація передбачає застосування механізмів стимулювання та підтримання активності мікроорганізмів. У цьому плані відрізняють такі технології як: 1. додавання кисню; 2. додавання поживних речовин.

Під час біоремедіації ґрунтова вода екстрагуються за допомогою одної чи кількох свердловин, де вона пропускається через біореактор, який містить мікроорганізми, які акліматизуються до забруднень. Очищена вода змішується з киснем та поживними речовинами, після чого знову посиляється у забруднену зону.

#### 33.2. Додавання кисню

Кисень та поживні речовини стимулюють біодеградацію *in situ* забруднювачів. Забруднювачі 1, що знаходяться на границі вадозної зони та ґрунтових вод, відкачуються за допомогою колодязя 2 та помпи 3 (рис. 33.1). На земній поверхні ці забруднювачі пропускаються через систему обробки, яка складається з біореактора 4, цистерн 5 з поживними речовинами 5 (азот, фосфор) та киснем 6. Після обробки очищена вода поступає через колодязь 7 знову у забруднену зону 1.

Такий цикл повторюється, доки очищення забрудненої зони не досягне потрібного рівня.

Аеробний (у присутності кисню) метод обробки забруднень застосовують для нейтралізації аліфатичних (гексан) та ароматичних вуглеводнів нафтопродуктів (бензин); анокисний (у присутності нітратів) метод доцільно застосовувати для обробки хлорованих розчинників.

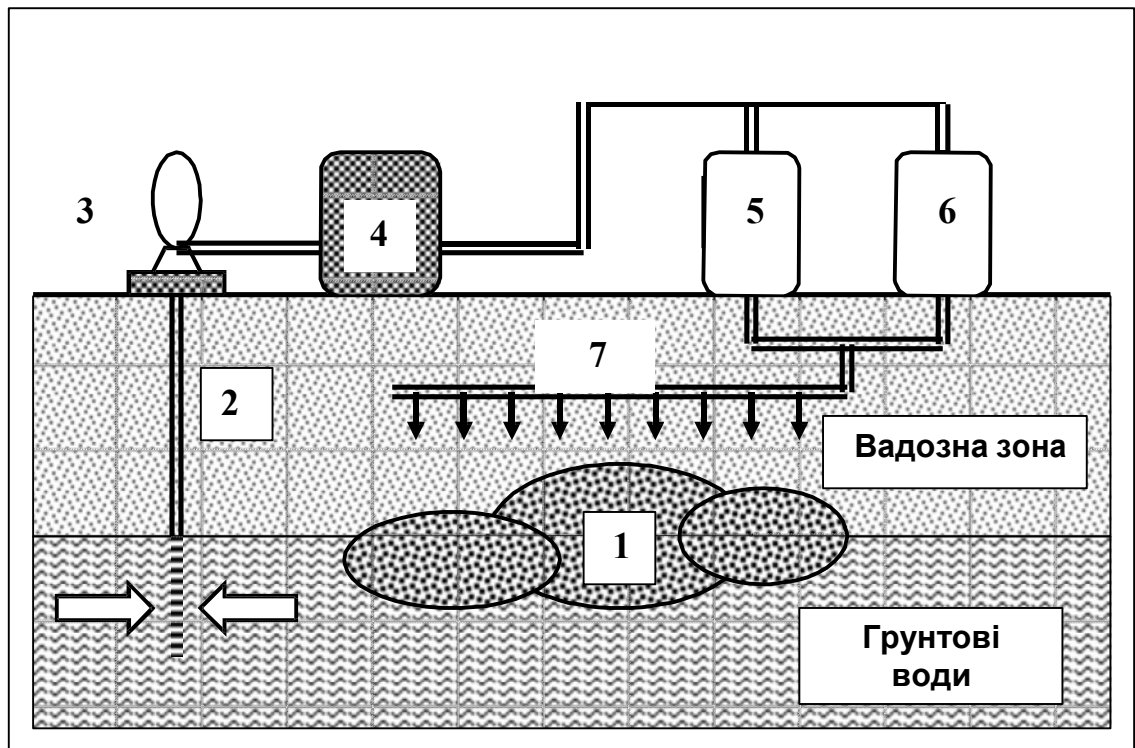


Рис. 33.1. Принцип *in situ* біоремедіації забрудненої зони

Переваги:

- Очищує забруднюючі речовини, що поглинуті або захоплені поверхнею геологічних пород у водоносному шарі;
- Не потребує складного обладнання і, отже, менш коштовний;
- Характеризується неруйнівною на середовище дією;
- Може застосовуватися у комбінації з іншими методами – екстракцією водяної пари, розпиленням повітря;
- Не залишає відходів після закінчення процесу ремедіації.

Недоліки:

- Інжекційні свердловини та інші елементи обладнання засмічуються мікроорганізмами;
- Метод не дає можливості вилучити важкі метали (кадмій, свинець);
- Високі концентрації забруднювачів (більших ніж 50000 ppm) можуть бути токсичними.

### 33.3. Біообдування

Свердловини оточують місце забруднення (рис.33.2). За допомогою цих свердловин забезпечується вакуум за допомогою колодязя 2 та насосу 3, завдяки чому прискорюється потік повітря через забруднену зону. За-

бруднене повітря проходить через системи біофільтрації 4, обробки активованим вуглецем 5 та згоряння 6, що дає можливість вилучити леткі сполуки. Крім того, на забруднену зону спрямовуються поживні речовини 7, завдяки чому прискорюється біодеградація забруднювачів.

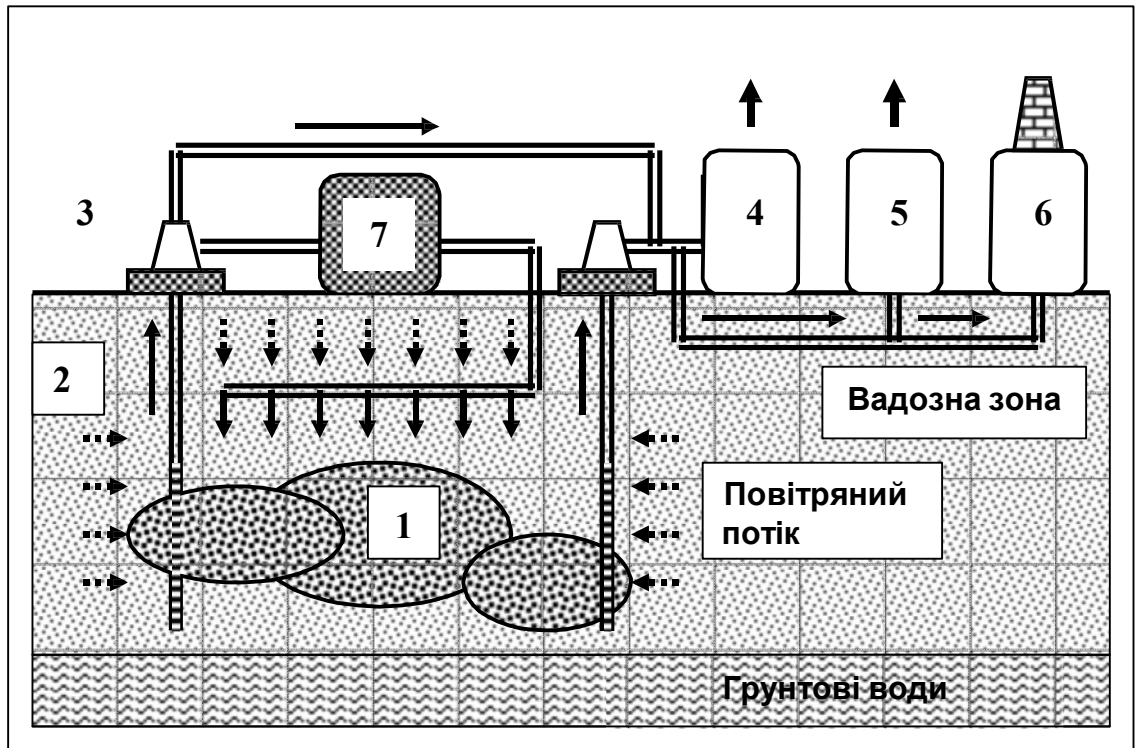


Рис.33.2. Принцип біообдування

Біообдування нагадує екстракцію ґрунтової пари (ЕГП), але ці дві технології відрізняються швидкістю руху повітря: під час ЕГП повітря для забезпечення випаровування забруднюючих речовин рухається з більшою швидкістю, ніж упродовж біообдування.

Техніка біообдування забезпечує очищення середовища від таких речовин як нафтопродукти (бензин, керосин, дизельне паливо).

Переваги:

- Не потребує складного обладнання;
- Характеризується неруйнівною дією;
- Можна обробляти ґрунт під будівлями;
- Вимагає небагато часу: від 2 місяців до 2 років;
- Вартість процесу 45-140 доларів за тону ґрунту;
- Легко комбінується з іншими методами ремедіації.

Недоліки:

- Висока концентрація деяких хімічних сполук може бути токсичною для мікроорганізмів; до таких сполук відносять кадмій, свинець та хлорид натрію.
- Технологія непридатна для деяких типів ґрунту (з низькою проникністю, глини).

### **33.4. Додавання поживних речовин**

Забруднені місця часто містять органічні компоненти, багаті на вуглець, але бідні на азот та фосфор. У цьому разі доцільно забезпечити зовнішнє додавання цих речовин (див. попередні рисунки). Мета такої технології – забезпечити оптимальне співвідношення між вуглецем, азотом та фосфором (C:N:P), а саме 100:10:1.

### **33.5. Додавання мікроорганізмів**

Якщо у ґрунті є недостача певних мікроорганізмів або мікрофлора постраждала від присутніх у ґрунті токсикантів, доцільно вносити у ґрунт так звані «додаткові» мікроорганізми. Цей процес називають *біозбільшенням (bioaugmentation)*. Ці мікроорганізми можуть представляти або природні штами, або представляти продукти генної інженерії. Так, наприклад, бактерія *Deinococcus radiodurans* була модифікована так, щоб споживати толуол та іонну ртуть з радіоактивних відходів.

### **33.6. Фіторемедіація**

#### **33.6.1. Основні процеси фіторемедіації**

Термін *фіторемедіація* походить від грецького слова *фіто* – «рослина» та латинського *ремедіум* – «лікувати». Процедура фіторемедіації полягає у знезаражуванні ґрунту, води або повітря за допомогою рослин, які здатні містити, зменшувати або обмежувати присутні у навколишньому середовищі метали, пестициди, розчинники, нафту та її похідні та різноманітні забруднюючі речовини.

Відрізняють такі процеси фіторемедіації [131-136]:

*Фітотрансформація (фітодеградація)* – захоплення, накопичення та перетворення органічних токсичних субстанцій з ґрунту, повітря та води; всі ці процеси призводять до хімічних модифікацій забруднюючих речовин шляхом рослинного метаболізму та зменшенню їхньої токсичності.

*Фітоекстрація* – поглинання забруднюючих речовин кореневою системою рослин та їх перенесення у рослинну біомасу.

*Ризофільтрація* – руйнування забруднюючих речовин ґрунтовими мікроорганізмами у зоні, що оточує кореневу систему рослини.

*Фітостабілізація* – утворення хімічних субстанцій, які здатні іммобілізувати забруднюючі речовини, за рахунок сорбції, осідання та утворення комплексів.



*Фітоволатилізація* – здатність рослин віддаляти забруднюючі речовини з ґрунту чи води та звільнити їх у атмосферу внаслідок фітотрансформації у менш леткі або менш забруднюючі субстанції.

Основні типи фіторемедіації наведено на рис. 33.3.

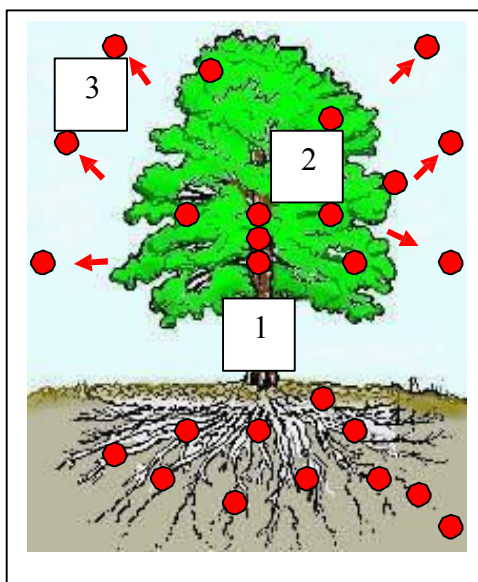


Рис. 33.3. Основні типи фіторемедіації: 1 – фітотрансформація; 2 – фітоекстрагування; 3 – фітоволатилізація

Як приклади таких рослин, що здатні здійснювати фіторемедіацію, можна навести соняшник (*Helianthus annuus*), який вилучає арсен, або цукровий буряк (*Beta vulgaris*), який екстрагує хлорид натрію, що накопичується у сільськогосподарських угіддях внаслідок їх затоплення морською водою.

### 33.6.2. Механізми фітотрансформації

Є два основних підходи щодо реалізації технології фітотрансформації [137]:

1. залучання рослинних ферментів, які здатні перетворювати токсичні компоненти у безпечні субстанції.

2. генетична інженерія, тобто створення трансгенних рослин, що здатні перетворювати забруднюючі речовини.

*Рослинні ферменти.* Більше 100 метаболічних ферментів, отриманих з рослин та ідентифікованих, можуть бути застосовані у фіторемедіації. Ці ферменти здатні детоксифікувати різні органічні забруднюючі речовини. Як приклад такого ферменту можна навести цитохром Р-450, знайдений у багатьох рослинах та тваринах, який бере участь у реакціях окислення багатьох природних та ксенобіотичних сполук.

Свою назву фермент отримав через наявність максимального поглинання світла при 450 нм.

*Генетична інженерія.* Ця технологія передбачає створення та застосування трансгенних рослин, які містять ген або гени, що можуть бути перенесені до інших рослин; молекули ДНК, що належать різним видам і навіть царствам, комбінуються *in vitro* у молекулу, що супроводжується створенням нового гену.

Відомо, що цитохром P450 2E1 (CYP2E1) є ключовим ферментом, що бере участь у метаболізмі ссавців та відповідає за детоксифікацію таких низькомолекулярних летких органічних сполук як трихлоретилен (ТХЕ), вінілхлорид (ВХ), карбонтетрахлорид (КТХ), бенхол, хлороформ та бромодихлорометан (БДХМ), що є небезпечними для здоров'я людини.

Застосування генної інженерії дозволило отримати трансгенний тютюн (*Nicotiana tabacum* cv. Xanthii), який містить фермент CYP2E1 з підвищеною активністю проти ТХЕ, ВХ, бензолу, толуолу, хлороформу та БДХМ порівняно з дикими формами тютюну [138].

### 33.6.3. ФітореMediaція радіонуклідів

Найбільш поширеними радіонуклідами є  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{234,235,238}\text{U}$ ,  $^{238-241}\text{Pu}$ . Особливістю радіонуклідів є їх нездатність природно деградувати. Якщо радіонукліди потрапляють у ґрунт, вони або з'єднуються з ґрунтовими частинками, або залишаються у ґрунтового розчині. Надзвичайно високу здатність адсорбувати радіонукліди демонструють ґрунти з глиною завдяки високій загальній поверхні.

Якщо радіонукліди адсорбуються ґрунтом або зв'язуються з ним, вони стають недоступними для рослин, мікроорганізмів або безхребетних; якщо радіонукліди знаходяться у ґрунтового розчині, вони здатні потрапляти до ґрунгової біоти та рослин.

У природних умовах радіонукліди, що потрапляють у рослини, можуть потрапити в організм травоядних тварин та, відповідно, в організм людини. Крім того, радіонукліди можуть потрапити у людський організм через контакт з забрудненими ґрунтом чи водою. Наслідком радіоактивного забруднення людини можуть бути онкологічні захворювання або генетичні мутації.

Що стосується ремедіації ґрунту, є два традиційних підходи:

*Викопування* забрудненого радіонуклідами ґрунту з подальшим віддаленням ґрунту або захороненням його у бетонних чи скляних матрицях. Але цей метод дуже коштовний – викопування, упакування, транспортування та розміщення  $1 \text{ м}^3$  забрудненого ґрунту коштує 2100 доларів США. 200-300 млрд доларів потрібно витратити на ремедіацію радіонуклідів у воді та ґрунті.

Другий метод передбачає *промивання* ґрунту, що також потребує віддалення ґрунту та певні хімічні операції. Потім очищений від радіонуклідів ґрунт повертається на своє місце, але він вже містить детергенти, су-

рфактанти та інші сполуки, які також викликають проблеми для навколишнього середовища, особливо якщо вони потрапляють у ґрунтові води.

Альтернативою цим двом методам є *фітореMediaція*, зокрема такі її різновиди як *фітоекстрація* та *різофільтрація*. ФітореMediaція (або фітодезактивація) – це видалення радіонуклідів з ґрунту за допомогою спеціально вирощуваних на них рослин. Для цього застосовують види, що мають високі коефіцієнти акумуляції радіонуклідів та формуючих значну біомасу. Найбільш цим вимогам відповідає *люпин*, в дещо меншій мірі *люцерна*, також *кукурудза* та *соняшник* при вирощуванні на зелену масу, деякі травосумішки.

Перевагами фітореMediaції є її здатність очищати ґрунт *in situ*, тобто без порушення ґрунтової динаміки. По-друге, рослини після вилучання радіонуклідів можна транспортувати у місця їх заховання. По-третє, процес фітореMediaції зменшує час взаємодії працівників з радіонуклідами.

Кількісне оцінювання ефективності фітореMediaції радіонуклідів можна здійснювати за допомогою *коефіцієнта біоаккумуляції (КБА)*, який дорівнює відношенню кількості радіонуклідів у сухій рослинній тканині до концентрації радіонуклідів у ґрунтовому розчині.

Так, для *КБА* для  $^{137}\text{Cs}$  варіює від 0,01 до 1,0 для стеблини та 38-165 – для кореня; для урану – 0,01- 0,0001; для плутонію – 0,0001.

Процес фітореMediaції  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  може тривати від 5 до 20 років, щоб досягнути повного очищення ґрунту.

Вартість фітореMediaції ґрунту становить 25-100 доларів за тонну ґрунту та 0,6-6,0 доларів за 1 галон (3,786 л) води.

Найкращими з точки зору фітореMediaції є рослини з інтенсивно розвинутою кореневою системою, яка здатна здійснити різофільтрацію, або з розвинутою над землею поверхнею біомасою, що важливо для фітоекстракції.

Два види рослин є перспективними з точки зору різофільтрації: соняшник (*Helianthus annuus*) та водний гіацинт (*Eichornia crassipes*). Обидва здатні накопичувати значну кількість радіонуклідів ( $^{137}\text{Cs}$ , U,  $^{90}\text{Sr}$ ) протягом кількох годин або днів [139]. Ставок біля ЧАЕС було оточено соняшниками, коефіцієнт біоаккумуляції  $^{137}\text{Cs}$  коріння яких складав 4900-8600 [139].

Вереск (*Calluna vulgaris*) є потенціальна рослина, яка завдяки зв'язку з мікорізними грибами здатна накопичувати радіонукліди у значній мірі порівняно з іншими рослинами. Вереск росте на підвищеннях Великобританії, які постраждали від Чорнобильського інциденту. Ці регіони характеризуються кислими та торф'яними ґрунтами.

Мікориза верескових необхідна для забезпечення рослини скоріше азотом, ніж фосфором, що особливо важливо для кислих ґрунтів. Не виключено, що мікориза підвищує стійкість верескових до дії важких металів, які утворюються у таких ґрунтах або природним шляхом, або завдяки кислотним дощам.

Коренева система таких видів сосни як *Pinus ponderosa* та *Pinus radiata* здатна асоціювати з ектомікоризою (гриби оточують коріння, але не проникають у нього). Така система здатна поглинати Sr<sup>90</sup> з ґрунту; 6% радіонуклідів накопичувалося у надземній частині рослин протягом 1 місяця [140].

Переваги фітореємедіації радіонуклідів:

- Технологія передбачає обробку *in situ*, тобто без руйнування ґрунту;
- Рослини зменшують тривалість можливого контакту робітників з радіонуклідами;
- Фітореємедіація може бути застосована упродовж тривалого часу, що збільшує ефективність очищення середовища.

Недоліки фітореємедіації радіонуклідів:

- Тривалість очищення середовища досить велика. Так, наприклад, для очищення ґрунту від <sup>137</sup>Cs та <sup>90</sup>Sr потрібно від 5 до 20 років, щоб досягнути повного очищення [140].
- Вартість фітореємедіації ґрунту становить від 25 до 100 доларів США за тону та від 0.60 доларів до 6 доларів за 1000 галонів води.
- Фітореємедіація радіонуклідів створює певний ризик для оточуючого середовища.

Взагалі методи фітореємедіації характеризуються такими перевагами та недоліками:

Переваги: низька вартість; використання природних організмів та збереження довкілля.

Недоліки: фітореємедіація обмежена площею та глибиною розташування кореневої системи рослин; повільний ріст та низька біомаса вимагають довготривалого процесу реємедіації; потенціальна можливість проникнення забруднювачів у травний тракт споживачів рослинної продукції.

Що стосується *in situ* біореємедіації, то на даний час існує велика кількість технологій реємедіації довкілля та їх комбінацій; єдиний універсальний метод *in situ* реємедіації ґрунту, ґрунтових вод та повітря відсутній; потрібні подальші дослідження та тестування методів реємедіації навколишнього середовища.

### Контрольні запитання та завдання

1. Що таке реємедіація навколишнього середовища?
2. Назвати основні технології реємедіації.
3. Проаналізувати конструктивні та функціональні властивості фізичного бар'єра.
4. Порівняти пасивні та реактивні бар'єри.
5. Пояснити принципи дії гідравлічних бар'єрів.
6. Пояснити суть методу накачування та обробки?
7. Що таке прискорена промивка?
8. Пояснити принцип дії ґрунтової парової екстракції.

9. Назвати види теплових методів ремедіації.
10. У чому полягає суть електрокінетичного методу?
11. Назвати методи біоремедіації.
12. Що таке фіторемедіація?
13. Пояснити механізми фіторемедіації.



## 34. НАНОТЕХНОЛОГІЇ ТА РЕМЕДІАЦІЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### 34.1. Нанотехнології

Протягом останніх років у науковій та популярній літературі, а також в Інтернеті можна знайти відомості щодо *нанотехнології* – міждисциплінарної галузі фундаментальної та прикладної науки і техніки, яка має справу з сукупністю теоретичного обґрунтування, практичних методів дослідження, аналізу та синтезу, а також методів виробництва та застосування продуктів із заданою атомною структурою шляхом маніпулювання окремими атомами та молекулами. Префікс «нано» походить від грецького слова *нанос* (карлик), що означає  $10^{-9}$  від будь-якої величини.

Річарду Фейнману, американському фізику-теоретику, належить перше згадування методів, які пізніше назвуть нанотехнологією (1959). Він припустив, що можливо окремо, механічно переміщувати атоми за допомогою маніпулятора відповідних розмірів [141].

Японський вчений Норіо Танігуті вперше використав у 1974 році термін «нанотехнологія», яким назвав виробництво виробів розмірами порядку нанометрів: «*Nano-technology*» *mainly consists of the processing of, separation, consolidation, and deformation of materials by one atom or by one molecule*» [142].

Об'єктами нанотехнології є *наночастинки* – дрібні тіла, що поводять себе як окремі одиниці з точки зору їх властивостей і транспортування, та розміри яких становлять 1–100 нм, а також *наноматеріали*, розроблені на основі наночастинок з унікальними характеристиками, обумовлених мікроскопічними розмірами їх складових [143,144].

Для порівняння типова довжина подвійного зв'язку між атомами вуглецю у молекулі становить 0,12-0,15 нм; діаметр подвійної спіралі ДНК дорівнює близько 2 нм.

### 34.2. Наночастинки

Особливою рисою наночастинок є суттєво більше порівняно з макрочастинками відношення площі частинок  $S$  до їх об'єму  $V$ . Так, якщо для частинок  $S/V$  становить близько  $10^3$ , то для наночастинок  $S/V$  досягає порядку  $10^9$  (рис. 34.1). Це характеризує високу реактивну здатність наночастинок та їх більш високий контакт з забруднювачами.

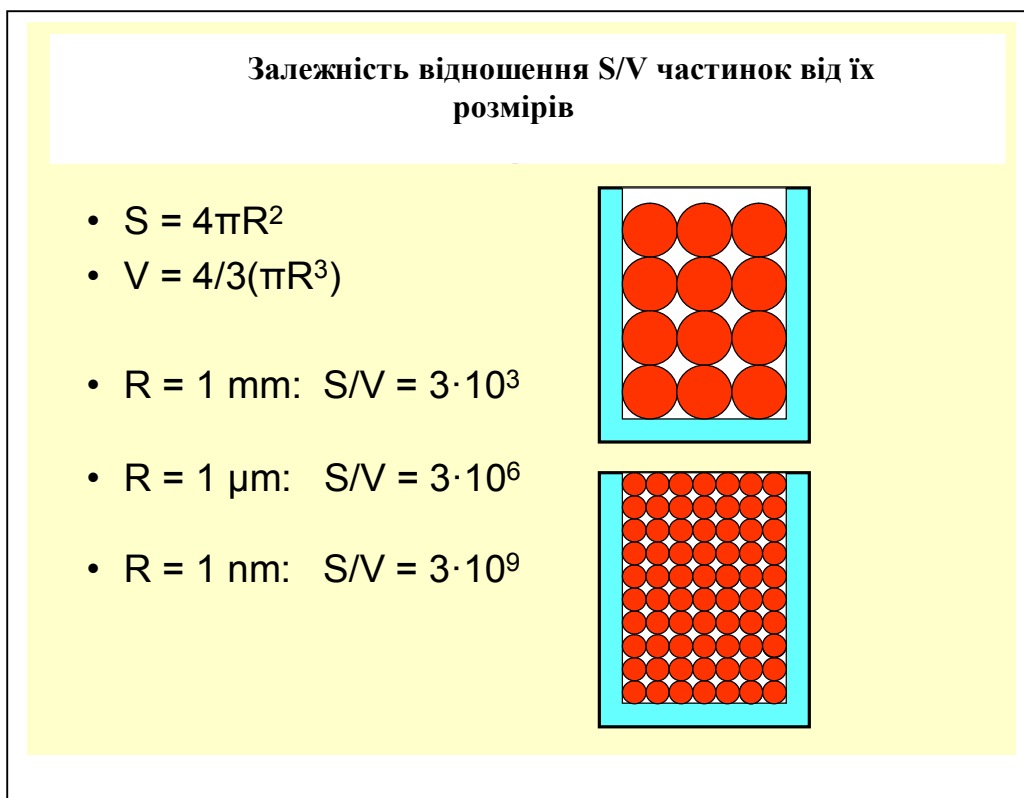


Рис. 34.1. Залежність відношення S/V частинок від їх розмірів (пояснення в тексті)

### 34.2.1. Залізо нульової валентності

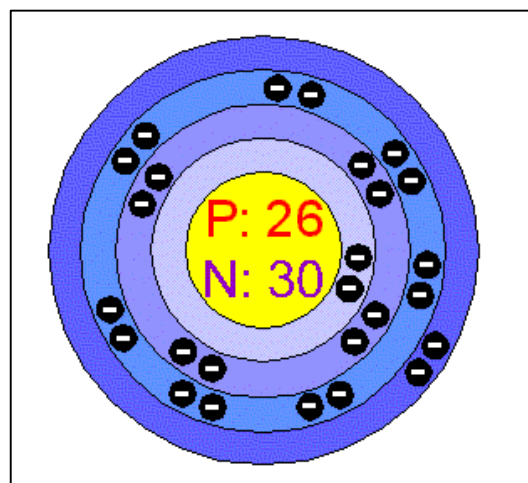
Типовими представниками наночастинок, що застосовуються у ремедіаційних технологіях, варто відзначити наночастинки заліза нульової валентності (у тому числі емульсифіковані частинки), їх комбінації з благородними металами Pd, Ag, Cu, Co, Ni.

Масова частка феруму в земній корі становить 5 %. Він займає четверте місце по розповсюдженості в природі. Найважливішими залізними рудами є: магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , лімоніт –  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , сидерит  $\text{FeCO}_3$ , пірит  $\text{FeS}_2$ .

Залізо — блискучий сріблясто-білий важкий метал, який легко окиснюється в атмосферних умовах, утворюючи оксиди феруму. Характерною для заліза є його змінна ступінь окиснення: +2, +3 та +6.

Окиснення – це втрата електронів, відновлення – придбання електронів.

Рис.34.2. Електронна конфігурація заліза



Електронну конфігурація заліза ( $1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^6 4s^2$ ) наведено на рис. 34.2.

На зовнішньому енергетичному рівні атома феруму знаходиться два s-електрони, а на передзовнішньому енергетичному рівні відбувається заповнення d-підрівня.

У своїх сполуках залізо проявляє ступені окиснення +2 та +3.

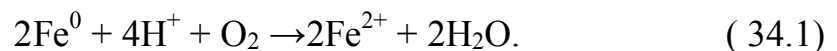
*Залізо нульової валентності (nZVI).* Особливу увагу упродовж останніх років привернуло залізо нульової валентності (Zero-Valent Iron, ZVI або  $Fe^0$ ) завдяки своїй здатності відновлювати різноманітні забруднювачі, у тому числі дехлорувати хлоровмісні розчинники, відновляти нітрати до атмосферного азоту, іммобілізувати численні неорганічні іони [145,146].

Метали нульової валентності, зокрема залізо нульової валентності (nZVI), які мають надзвичайну поверхневу реактивність та використовуються у ремедіації ґрунтів, седиментів та ґрунтових вод.

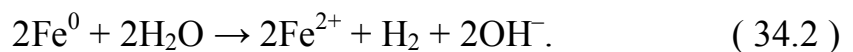
Елементарне залізо діє як електронний донор, тоді як забруднювачі виконують функції акцепторів електронів. Процес відновлення забруднювачів супроводжується їх перетворенням у менш токсичну і навіть у безпечну форми. Застосування наночастинок дає можливість очистити ґрунт, ґрунтові води та седименти від важких металів (ртуть, свинець, кадмій) та органічних сполук (бензол, хлоровані розчинники, креозот, толуол).

Залізо нульової валентності або елементарне залізо є відновлюючий реагент, який здатний реагувати з розчиненим киснем та водою.

За аеробними умовами (у присутності кисню)  $Fe^0$  реагує з розчиненим киснем, утворюючи іони  $Fe^{2+}$  та воду [147]:



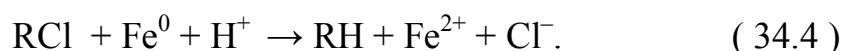
Крім того,  $Fe^0$  може реагувати з водою, утворюючи іони  $Fe^{2+}$ , водень та іони гідроксиду  $OH^-$  [147]:



Якщо у середовищі присутня забруднююча речовина (хлорований вуглеводень), то відбувається реакція, що супроводжується приєднанням електронів до забруднення та його відновленням, тобто дехлоруванням:



Залізо нульової валентності звільнює електрони, які приєднуються до хлорованого вуглеводню:





Отже, у присутності окислювального агента (розчиненого кисню чи води)  $Fe^0$  окислюється до  $Fe^{2+}$ , що супроводжується звільненням двох електронів:



На рис. 35.3 наведено результати реакції частинок заліза нульової валентності (5 г/д) з сумішшю хлорованих аліфатичних вуглеводнів: шість сполук, таких як транс-дихлоретилен (транс- $C_2H_2Cl_2$ ), цис-дихлоретилен (цис- $C_2H_2Cl_2$ ), 1,1,1-трихлоретан ( $CCl_3CH_3$ ), тетрахлоретилен ( $C_2Cl_4$ ), трихлоретилен ( $C_2HCl_3$ ), тетрахлоретан ( $CCl_4$ ) в концентрації 10 мг/л демонструють спад інтенсивності хроматограми впродовж 120 годин [148].

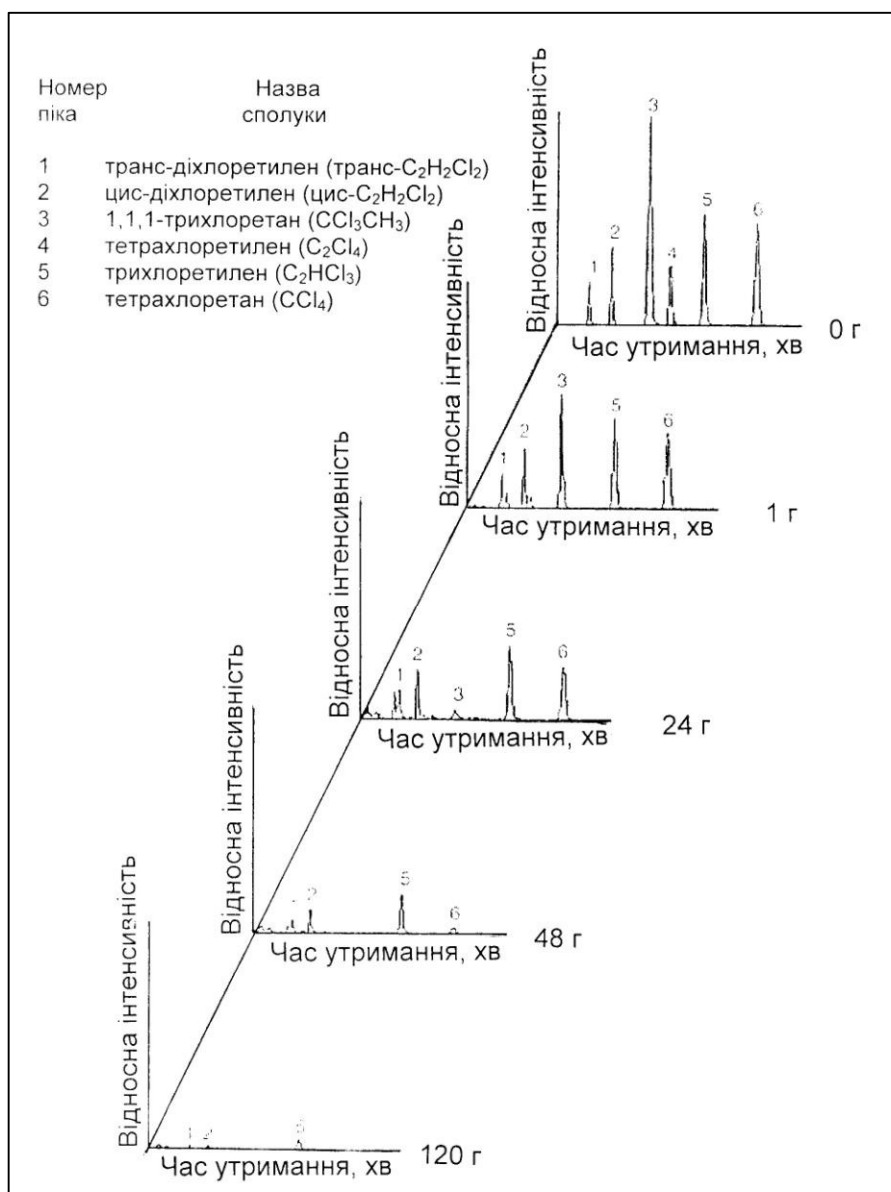
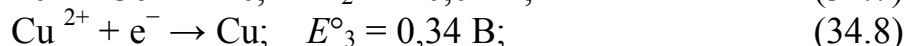
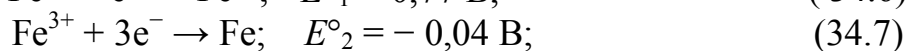


Рис. 34.3. Результати реакції частинок заліза нульової валентності з сумішшю хлорованих аліфатичних вуглеводнів [148]

### 34.2.2. Окисно-відновний потенціал

Окисно-відновний потенціал – міра здатності хімічної речовини приднувати електрони (відновлюватися). Розглянемо як приклад, чи можлива окисно-відновна реакція між металевою міддю Cu та водним розчином заліза Fe<sup>3+</sup>. Використаємо дані табл.34.1:



Видно, що  $E^{\circ}_2 < E^{\circ}_3 < E^{\circ}_1$ , тобто друга система не може бути окислювачем міді; реакція  $2\text{Fe}^{3+} + 3\text{Cu} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{Cu}^{2+}$  не має місця. Втім, перша система може окислювати мідь; реакція  $2\text{Fe}^{3+} + \text{Cu} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + \text{Cu}^{2+}$  відбувається. Отже, процес окислення іде в тій системі, де  $E^{\circ}$  менший.

#### 34.1. Значення стандартного окисно-відновного потенціалу

Реакція відновлення	Стандартний електродний потенціал $E^{\circ}$ , В
$\text{Ba}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Ba}$	-2,90
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Zn}$	-0,76
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Fe}$	-0,44
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Cd}$	-0,40
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Ni}$	-0,25
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Pb}$	-0,13
$\text{Fe}^{3+} + 3\text{e}^{-} \rightarrow \text{Fe}$	-0,04
$\text{Cu}^{+} + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Cu}$	0,34
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	0,77
$\text{Ag}^{+} + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Ag}$	0,80
$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{Cl}$	1,36

Окисно-відновні потенціали заліза наведено на рис. 34.4.

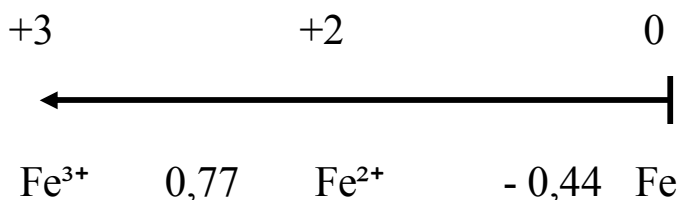


Рис. 34.4. Окисно-відновні потенціали заліза

Отже, сорбція має місце, якщо металеві катіони мають ОВП більш негативний, ніж у Fe ( $Ba^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ).

Якщо ОВП металевих катіонів трохи більш позитивний, ніж у Fe, то відбувається сорбція+відновлення ( $Ni^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ).

Відновлення відбувається, якщо ОВП металевих іонів значно вищий, ніж у Fe ( $Cu^+$ ,  $Ag^+$ ).

Властивості заліза нульової валентності знаходять своє практичне застосування. Так, наприклад, застосування 1,7 кг наночастинок заліза нульової валентності до зони забруднення ґрунтових вод трихлоретиленом об'ємом 14 м<sup>3</sup> дало можливість зменшити концентрацію забруднюючої речовини на 96 % протягом 4 тижнів. Ефективність відновлення трихлоретилену досягла 96% упродовж 4-тижневого моніторингу [149].

Технологію закачування наночастинок заліза разом з водою у ґрунтові води наведено на рис. 34.5.

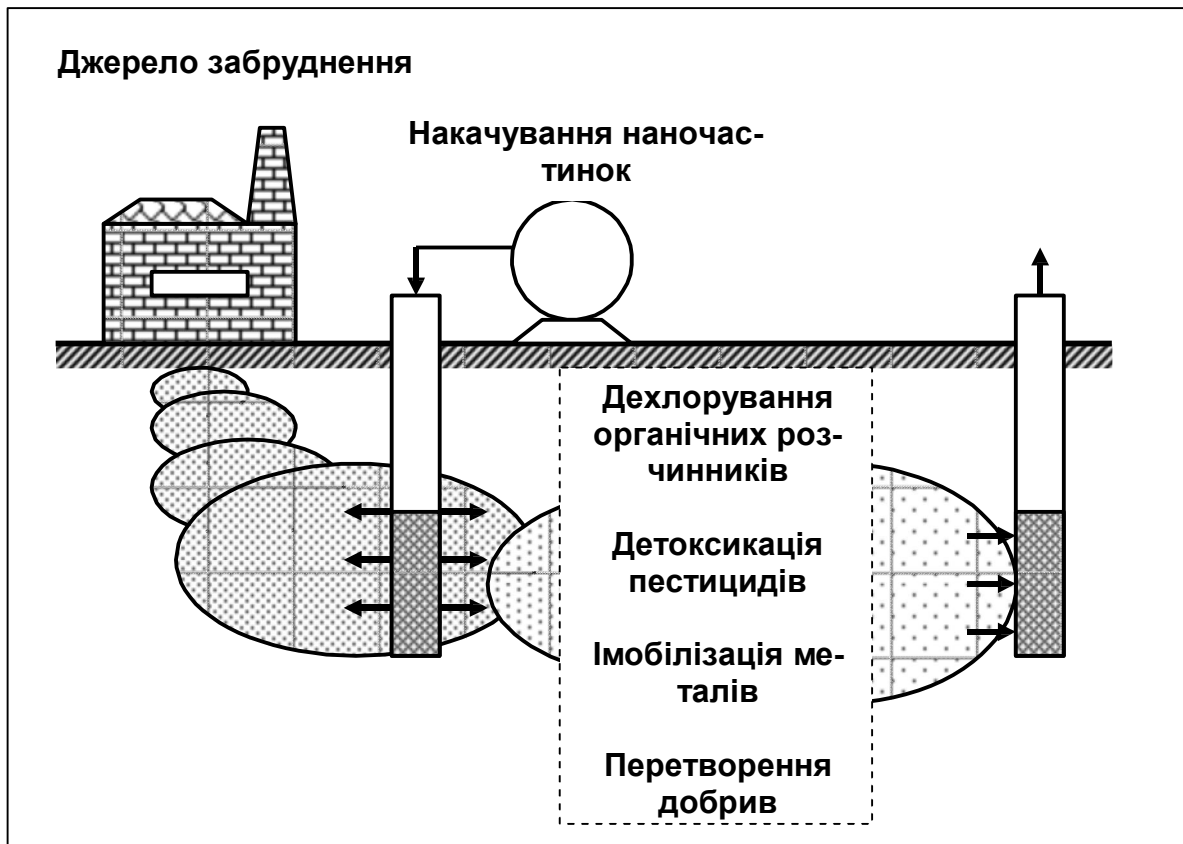


Рис.34.5. Застосування наночастинок під час ремедіації ґрунту

Активна поверхня наночастинок заліза нульової валентності становила 33,5 м<sup>2</sup>/г порівняно з поверхнею 0,9 м<sup>2</sup>/г, притаманної мікроскопічним частинкам;

Швидкість реакції наночастинок у 100 разів перевищує швидкість реакції мікрочастинок.

### 34.2.3. Біметалеві наночастинки

Залізо окиснюється значно швидче, коли воно приєднується до менш активного (благородного) металу (наприклад, Pd, Ag, Cu, Co, Ni).

Отже, перетворення забруднювачів навколишнього середовища покращується внаслідок застосування біметалевих наночастинок (Pd/Fe, Pd/Zn, Pt/Fe, Ni/Fe) [150].

Благородні метали у даному випадку виконують функції *каталізатора* – речовини, яка змінює швидкість хімічних реакцій, а сама після реакції залишається хімічно незмінною і в тій же кількості, що й до реакції.

Наприклад, біметалеві наночастинки на основі заліза (99.9 %) з паладієм (0.1 %) викликають деградацію забруднювачів на два порядки швидше порівняно з результатами застосування лише залізних частинок.

### 34.2.4. Емульсифіковані частинки

Серйозну проблему являє наявність у ґрунтових водах *рідин неводної фази (Non-Aqueous Phase Liquids або NAPL)*, густина яких перевищує густину води та які не змішуються та не розчинюються у воді

*Емульсифіковані частинки заліза нульової валентності (ЕЗНВ)* являють собою наночастинки заліза, які покриті емульсійною мембраною, що полегшує обробку хлорованих вуглеводнів.

Емульсійна мембрана виготовлена з сурфактанту та олії, що розкладається мікроорганізмами, тоді як внутрішній простір краплини містить воду та частинки заліза нульової валентності (рис. 34.6).

Оскільки зовнішня сторона мембрани має гідрофобні властивості, такі як у рідин неводної фази, емульсія здатна змішуватися з цими рідинами.

Отже, забруднювач дифундує у середину краплини, де входить у контакт з ЗНВ та деградує. Деградації також сприяє олія та сурфактанти, які є донорами електронів [151].

Емульсифіковані частинки заліза нульової валентності були застосовані для очищення ґрунту та ґрунтових вод від трихлороетилену на авіаційній базі США (Patrick Air Force Base) у Флориді.

Якщо початкова концентрація трихлороетилену була 150000 мкг/л, та внаслідок обробки вона зменшилася до рівня 3580 мкг/л.

Процес відновлення забруднюючих речовин супроводжується їх перетворенням у менш токсичну і навіть у безпечну форми.

Застосування наночастинок дає можливість очистити ґрунт, ґрунтові води та седименти від важких металів (ртуть, свинець, кадмій) та органічних сполук (бензол, хлоровані розчинники, креозот, толуол)

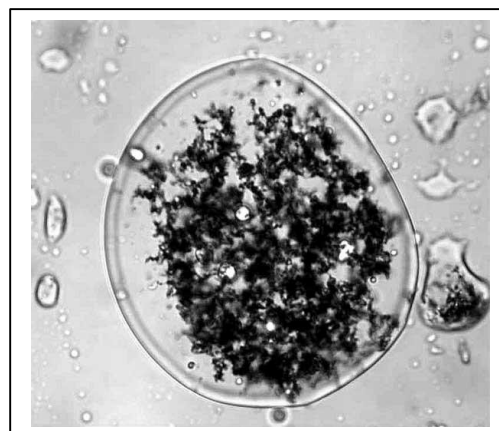


Рис. 34.6. Емульсифікована частинка

### 34.3. Наноматеріали

*Наноматеріали* – це матеріали з морфологічними рисами наноб'єктів та які мають специфічні властивості, що впливають з їх нанорозмірів.

Упродовж останніх років було розроблено та виготовлено велику кількість наноматеріалів, придатних для ремедіації навколишнього середовища. Вони застосовуються для очищення ґрунту та ґрунтових вод від хлорованих розчинників та залишків нафтопродуктів.

Наноматеріали привабливі для ремедіації через свої унікальні властивості, пов'язані з великим відношенням їх поверхні до їх об'єму, через що їх реактивність значно більша у порівнянні із звичайними матеріалами.

Ця підвищена реактивність пояснюється наявністю великої кількості реактивних ділянок, що дозволяє покращити контакт з забруднюючими речовинами та забезпечити швидке зменшення їх концентрації.

Крім того, завдяки малим розмірам наноматеріали можуть бути легко суспендовані у ґрунтових водах, що забезпечує їх більш широке поширення.

#### 34.3.1. Графен та фулерен

Наноструктури можна збирати не лише з окремих атомів чи поодиноких молекул, але й з молекулярних блоків, якими є графен та фулерени (рис. 34.7).

*Графен* – двовимірна модифікація вуглецю, що утворена шаром атомів вуглецю товщиною в один атом та з'єднаних у гексагональну решітку.

*Фулерен* – будь-яка молекула, що складається з вуглецю та має форму порожнистої сфери або трубки.

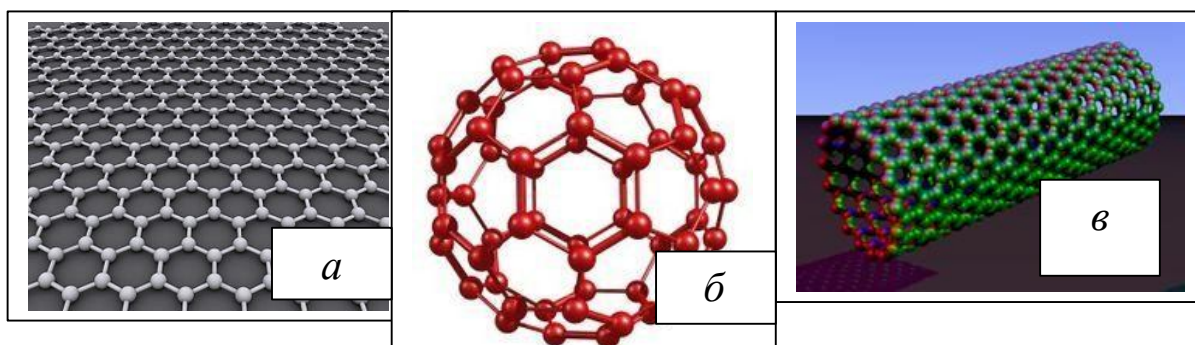


Рис.34.7. Наноструктури: *a* – графен; *б* – фулерен сферичної форми; *в* – фулерен трубчастої форми.

Вперше зразки графену – моноатомного шару вуглецю, запакованого в гексагональну гратку – було отримано й досліджено в Центрі мезоскопії й нанотехнологій Манчестерського університету (Велика Британія) групою вчених. У 2010 році двоє вчених з цієї групи Костянтин Новосьолов та Андрій Гейм одержали Нобелівську премію в галузі фізики "за новаторські експерименти, що стосуються двовимірного матеріалу графена".

### 34.3.2. Самоорганізуючі моношари на мезопористій підкладці

Деякі матеріали вироблені з поверхневими функціональними групами, що виконують функції сорбентів для вилучення специфічних забруднюючих речовин з рідких середовищ, стічних вод, промислових відходів.

Серед них – самоорганізуючі моношари на мезопористій підкладці (self-assembled monolayers on mesoporous supports- SAMMS<sup>TM</sup>). Структуру такого моно шару наведено на рис. 34.7.

Хоча самі SAMMS<sup>TM</sup> матеріали розмірами перевищують нанодіапазон, вони вважаються наноматеріалами, оскільки містять нанопори (розмірами 2-20 нм). Ці матеріали мають велику поверхню (~1000 м<sup>2</sup>/г), завдяки якій здійснюється швидка сорбційна кінетика.

Застосовують SAMMS<sup>TM</sup> матеріали для сорбції таких забруднювачів як радіонукліди, ртуть, хромати, арсеніти, селеніти [152].

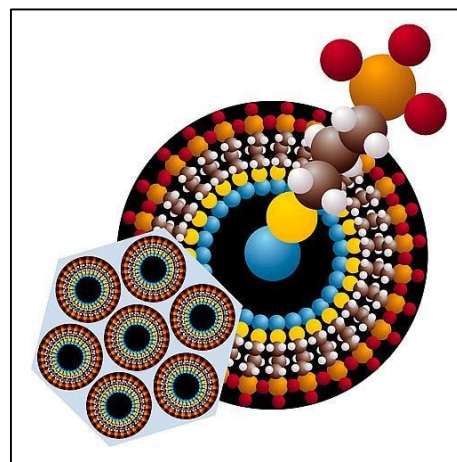


Рис. 34.8. Самоорганізуючі моношари на мезопористій підкладці

### 34.3.3. Нанотрубки

Нанотрубки, виготовлені з діоксиду титану, здатні виконувати функції фотокаталізаторів, тобто прискорювати хімічні реакції під впливом світла (сонячного випромінювання).

Ці нанотрубки мають надзвичайно велику поверхню, що забезпечує їх ефективність.

Під впливом сонячного світла, кисню з повітря та води  $TiO_2$  утворює вільні радикали, які здатні зруйнувати органічні та неорганічні забруднюючі речовини атмосфери, серед яких є  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ , бензол, поліциклічні ароматичні вуглеводні. Також розкладаються на безпечні молекули води та двоокису вуглецю леткі хімічні сполуки, віруси, бактерії [153,154].

У 19 районі Парижу на території, де знаходяться канали та покинуті залізничні колії, знаходиться будівля, яка є каталізатором чистого повітря. Зовнішня поверхня нової архітектурної будівлі складається з більш ніж 250 квадратних метрів сонячних фотоелектричних панелей та покрита діоксидом титану. За рахунок природного ультрафіолетового випромінювання  $TiO_2$  взаємодіє з твердими частинками повітря та вилучає забруднювачі з повітря.

#### 34.3.4. Феритини

Феритин – це глобулярний білковий комплекс, що накопичує внутрішньоклітинне залізо (рис.31.9).

Міститься майже у всіх живих організмах – бактеріях, водоростях, рослинах, тваринах. Накопичене залізо добре розчиняється та нетоксичне.

Феритини застосовуються під час виробництва наночастинок. Міжмолекулярні простори білків виконують функції шаблонів або трафаретів для наночастинок: використовуючи білки різних розмірів, можна синтезувати наночастинки різних калібрів. Змінюючи кількість заліза у білках, можна варіювати розміри частинок [155].

Феритин застосовують для зменшення токсичності таких забруднюючих речовин як хром та технецій в поверхневих та ґрунтових водах. Зокрема, відбулося перетворення під впливом оптичного випромінювання Хрому-6 у Хром-3, який не розчиняється у воді.

Технецій-7 є об'єктом радіоактивних відходів під Вашингтоном: великі каністри з цими відходами були заховані в 40-х та 50-х роках і зараз вони повільно протікають.

Застосування наночастинок дає надію на можливе очищення ґрунтових вод.

#### 34.3.5. Дендримери

Дендримери – надзвичайно розгалужені полімери, які можуть являти собою різноманітні функціональні групи конусоподібної, сферичної та дископодібної форми.

Слово «дендример» походить від грецького «dendron» – дерево. Зазвичай, дендример має симетричну двовимірну або тривимірну симетричну відносно центра форму. Дендримери відносяться до класу полімерних сполук, молекули яких мають велику кількість розгалужень.

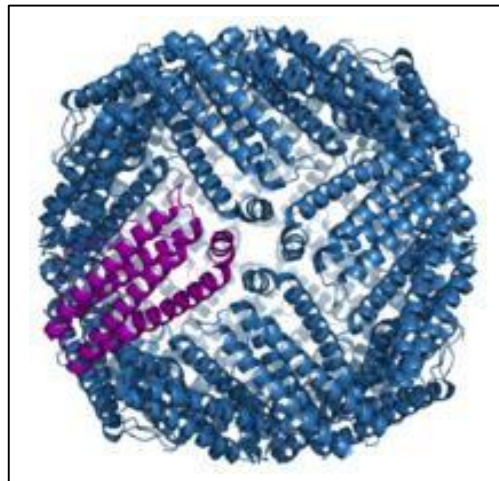


Рис. 34.9. Структура феритину [155]

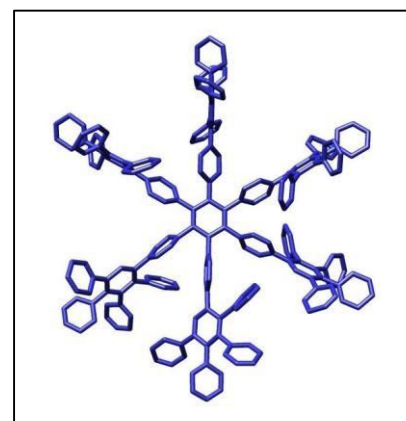


Рис. 34.10. Структура дендримера



Завдяки зітканню «гілок» розгалужень утворюються внутрішні порожнини, в яких можуть знаходитися невеликі молекули, що хімічно з'єднані з дендримером.

Регулюючи розміри міцел та відстані між ними під час синтезу, можна створювати молекулярні сита із заданими порами.

Так, синтез  $Fe^0/FeS$  частинок з використанням дендримера як шаблону надає можливість створювати проникні реактивні бар'єри для ремедіації забруднених ґрунтових вод [156,157].

#### 34.3.6. Металопорфірини

Металопорфірини являють собою комплекси металів з природними молекулами порфірину, в якій металевий іон зв'язаний з чотирма атомами азоту у пірольному кільці (рис. 34.11).

Прикладами металопорфіринів є гемоглобін та вітамін В12.

Експерименти [158] продемонстрували, що металопорфірини здатні відновлювати хлоровані вуглеводні такі як тетрахлорид вуглецю, тетрахлороетилен та трихлороетилен у забрудненому ґрунті та ґрунтових водах.

Найважливішою особливістю порфіринів є наявність у молекулі координаційної порожнини, обмеженої атомами азоту та здатної координувати іони металів  $M^{2+}$ ,  $M^{3+}$ ,  $M^{4+}$  і навіть з більшим ступенем окиснення.

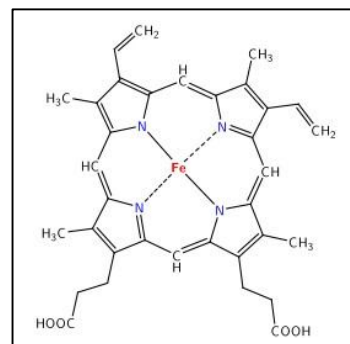


Рис. 34.11. Гемова група гемоглобіну

#### 34.3.7. SOMS (Swells of Organically Modified Silica) або Osorb (Organic Sorbtion)

SOMS (комерційна назва Osorb) є органічно модифікований кремнезем який здувається та захоплює такі дрібні молекули органічних сполук як бензин, природний газ, ацетон, етанол тощо.

SOMS здатний збільшувати свій об'єм у 8 разів внаслідок захоплення органічних сполук (рис. 34.12) [159].

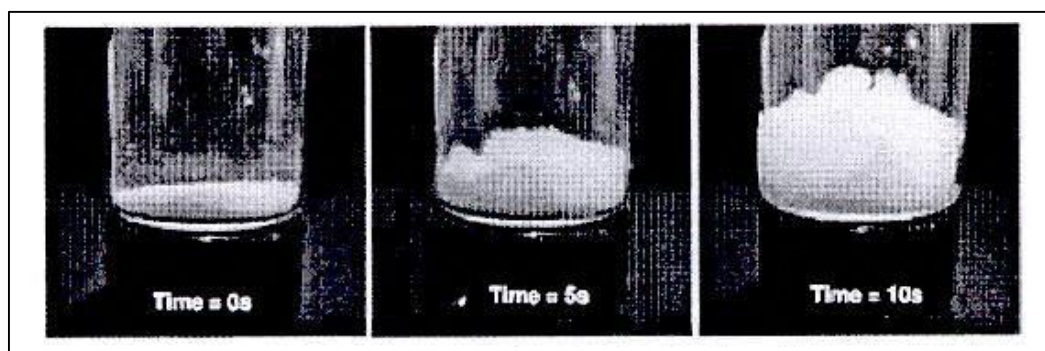


Рис. 34.12. Збільшення об'єму SOMS у 8 разів внаслідок захоплення органічних сполук



SOMS-прилад був апробований у Мексиканській затоці [160].

#### 34.4. Фільтрація частинок

##### 34.4.1. Мікрофільтрація

Цей процес забезпечує вилучення забруднюючих речовин з рідини (або рідини з газом) за рахунок пропускання її через мікропористу мембрану із застосуванням тиску ( $7 \cdot 10^4$ - $7 \cdot 10^5$  Па). Типові розміри пор в мембрані становлять 0,1 – 10 мкм.

Мікропористі мембрани здатні пропускати воду, моновалентні іони ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ), розчинені органічні речовини, дрібні колоїди та віруси, але затримують частинки, седименти, водорості, великі бактерії.

##### 34.4.2. Ультрафільтрація

Цей фільтраційний процес також передбачає застосування гідростатичного тиску (близько  $10^6$  Па), прикладеного до рідини, що пропускають через мембрану. Мембранні пори розміром 0,001 – 0,1 мкм забезпечують повне вилучення вірусів, бактерій, суспендованих частинок, розчинених речовин великої молекулярної ваги, тоді як вода, іони та розчинені речовини малої молекулярної ваги проходять через мембрану.

##### 34.4.3. Нанофільтрація

Нанофільтрація затримує вибірково органічні молекули, пестициди, природні та штучні гормони, мультивалентні іони та абсолютно всі типи бактерій і вірусів. Наноматеріали знаходять все більше застосування як ефективні фільтри для очищення питної води.

Крім того, нанофільтрація забезпечує зм'якшення води: після очищення жорсткість води зменшується приблизно у 10-15 разів.

Нанофільтрація не вилучає всі речовини із води. Відфільтровуються великі за розміром шкідливі домішки (наприклад, пестициди і важкі метали), а у воді лишаються безпечні сполуки (наприклад, хлориди, йони натрію тощо).

##### 34.4.4. Зворотний осмос

*Осмоз* – це проникнення чистого розчинника через напівпроникну мембрану в розчин. Для водних розчинів осмос означає перехід води із ділянки з високою концентрацією води у ділянку з низькою концентрацією води.

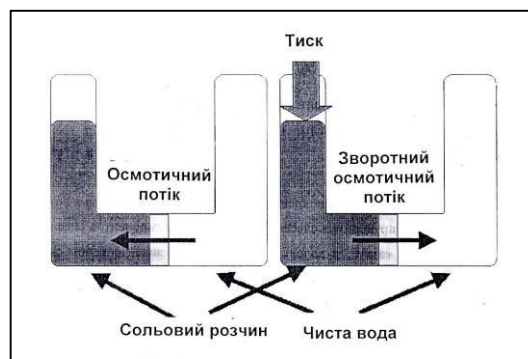


Рис. 34.13. Порівняння процесів осмосу та зворотного осмосу

Якщо з боку розчину з більшою концентрацією солей створити певний гідростатичний тиск, то відбувається зворотний процес – *зворотний осмос*: молекули води починають проникати через пори мембрани з розчину більшої концентрації солей у розчин з меншою концентрацією, причому всі розчинені у воді солі (домішки) не проходять через мембрану та концентруються (рис. 34.13).

Слід пам'ятати, що навіть кращі з побутових фільтрів не здатні повністю вилучати з води пестициди, бактерії, тригалометани та інші канцерогенні хлорорганічні сполуки, а також важкі метали і радіонукліди.

Результати порівняння різних типів мембранних фільтрів зворотного осмосу показано, що найбільшу поверхню фільтрації в одиниці об'єму мають *апарати з рулонними елементами зворотного осмосу на порожнистих волокнах*.

Принцип роботи мембранного елемента полягає в пропусканні під тиском потоку води з забрудненнями (розчин) через торець рулону, що складається з послідовно розташованих мембранних елементів та прокладок (рис. 34.14). Потік вихідної води по каналах прокладки надходить до поверхні мембрани: частина води зі зниженим вмістом солей (так званий пермеат) послідовно проходить через напівпроникні мембрани та збирається в колекторі очищеної води (траєкторія руху води являє собою спіраль), тоді як вода з забрудненнями (концентрат) виходять через другий торець рулону та подається у дренажну систему.

Як матеріали для таких елементів добре зарекомендували себе тонкоплівкові композиційні мембрани FN-MTEC FT30 (Dow Chemical, США), виконані з 1,3-бензендіаміна (мета-фенілдіаміна).

Апарати з рулонними елементами зворотного осмосу на порожнистих волокнах поєднують високі робочі характеристики з невисокою вартістю

Щоб краще зрозуміти принцип дії таких апаратів, радимо читачу продивитися анімацію на сайті

[http://www.mega-att.ru/vodopodgotovka\\_aquina/osmos/osmos\\_obratn.html](http://www.mega-att.ru/vodopodgotovka_aquina/osmos/osmos_obratn.html).

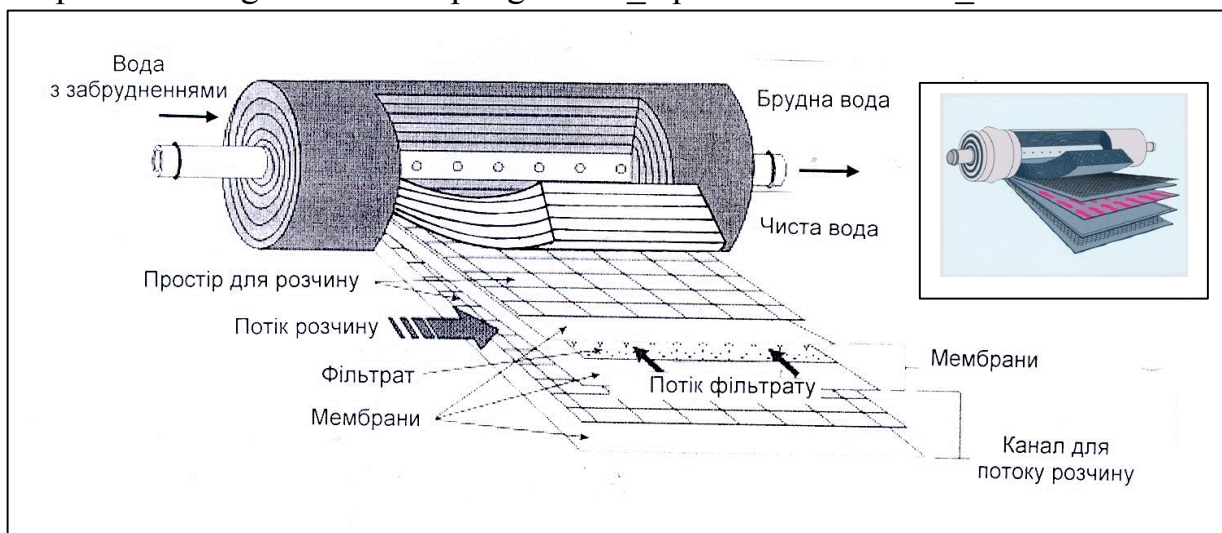


Рис. 34.14. Принцип дії апарату з рулонними елементами зворотного осмосу на пористих волокнах

Величина осмотичного тиску прямо пропорційна концентрації розчинених речовин та абсолютній температурі (температурі за шкалою Кельвіна).

Так, наприклад, для морської води із вмістом солей 35 г/л осмотичний тиск становить близько 25 ат.

Для прісної води, що містить солей 0,5 – 1,0 г/л, осмотичний тиск дорівнює 2 - 3 ат.

Як свідчать дослідження, проведені у Південній Африці, випробування зворотного наноосмосу по опрісненню солоної води призвели до вилучення навіть не лише солей, але й поживних субстанцій (кальцію, магнію тощо), після чого вода не відповідала вимогам Всесвітньої Організації Здоров'я (World Health Organization).

Нанофільтрація затримує вибірково органічні молекули, великі іони та абсолютно всі типи бактерій і вірусів.

Порівняльну ефективність мікро-, ультра-, нанофільтрації та зворотного осмосу наведено на рис. 34.15.

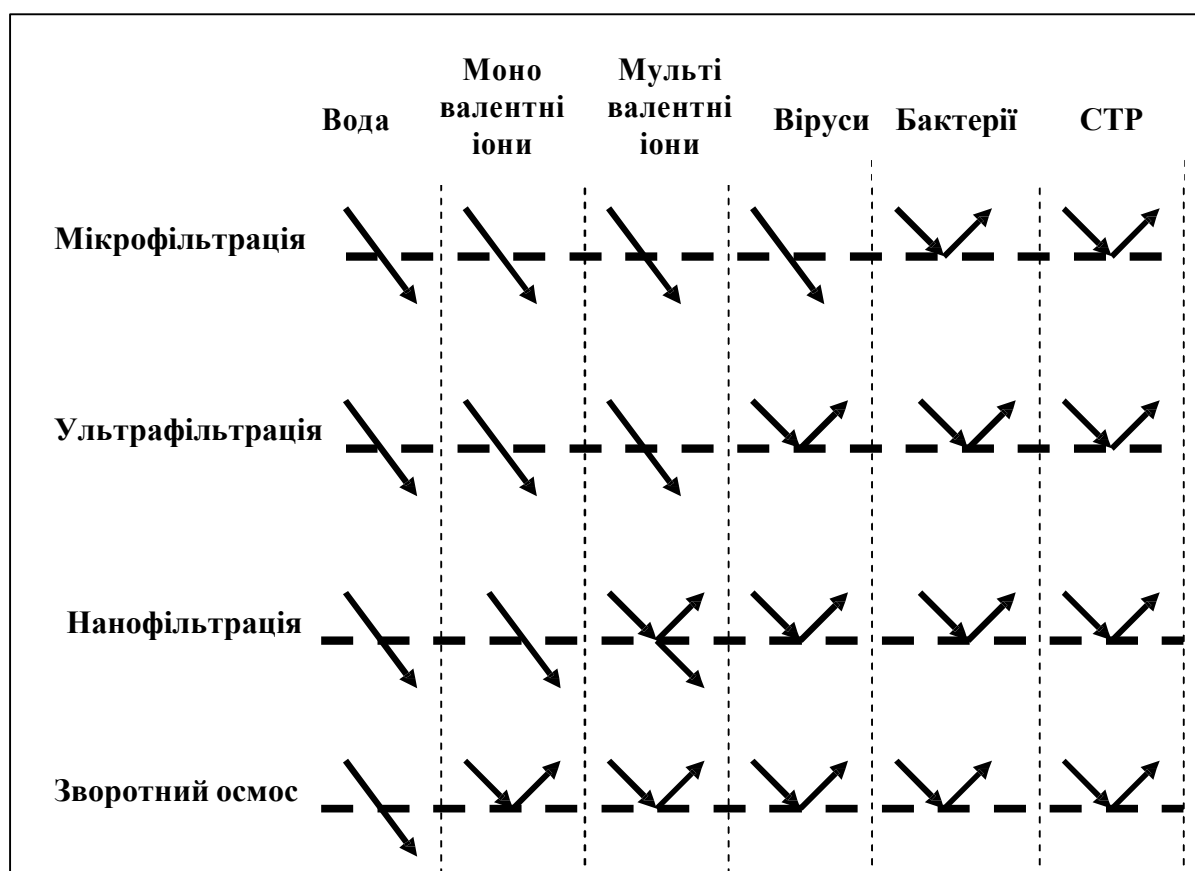


Рис. 34.15. Порівняльна ефективність мікро-, ультра-, нанофільтрації та зворотного осмосу (тут: СТР – суспендовані тверді речовини)

Цікавою є здатність певних мікроорганізмів здійснювати внутрішньоклітинний синтез наночастинок металів та їх сполук, таких як золото (бактерії *Bacillus subtilis* 168 та *Shewanella algae*, ацидофільні гриби *Verticillium* та *Fusarium*, актиноміцети *Rhodococcus*), срібло (бактерії *Pseudomonas stutzeri* AG259), магнітних наночастинок Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (магнетобактерії *Magnetospirillum magnetotacticum*), кристалів CdS (дріжджі *Schizosaccharomyces pombe*).

Так, магнітні частинки забезпечують ефективне вилучення важких металів з стічних вод за допомогою магнітної сепарації. Наприклад, дослідницька команда з США (Rice University) застосувала магнітну «наноіржу» для вилучення арсену з питної води. Велика поверхня наноіржі дозволяє захопити у кілька сот разів більше арсену, ніж при застосуванні великих частинок. Вважається, що 200–500 міліграмів наноіржі забезпечить очищення літра води.

Магнетотактичні бактерії мають фіксований ланцюг з близько 20 магнітних кристалів розмірами 35-100 нм. Ці бактерії здатні іммобілізувати важкі метали з оточуючого розчину. Прикладання низькоінтенсивного сфокусованого магнітного поля дає можливість виділити ці метали.

Застосовуються магнетотактичні бактерії для очищення стічних вод від небезпечних металів – продуктів виробництва важких металів та ядерної промисловості.

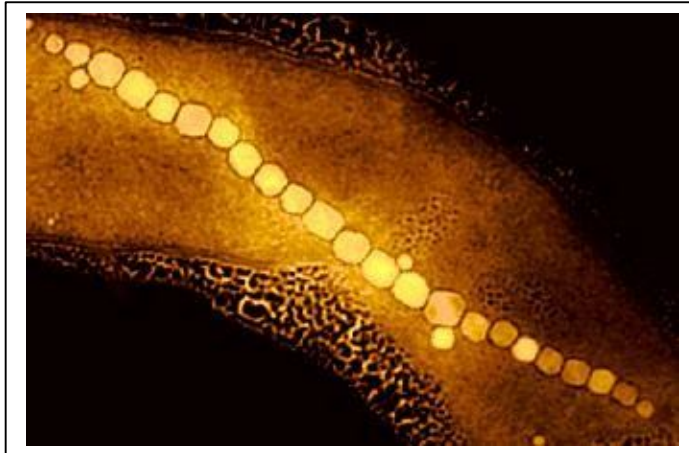


Рис. 34.16. Магнетотактична бактерія *Magnetospirillum magnetotacticum* з ланцюгом кристалів магнетиту

Ланцюжки магнетосом – мембранні органели, знайдені у деяких магнетотактичних бактерій. Вони містять від 15 до 20 кристалів магнетиту довжиною 40-60 нм, які разом діють подібно до голки компаса, орієнтуючи магнетотактичних бактерій у магнітному полі Землі

Традиційні методи вилучення важких металів достатньо дорогі та неефективні, особливо коли йдеться за їх низькі концентрації у розчинах. На відміну від інших забруднюючих речовин, метали важко вилучити з до-вкілья, оскільки вони не підлягають хімічній та біологічній деградації та неруйнівні.

Застосування наноматеріалів є альтернативою традиційним методам завдяки великій площі поверхні, високому рівню адгезії та новим властивостям наноматеріалів.

### 34.6. Нанозабруднення

Нанозабруднення викликаються наночастинками внаслідок виробництва приладів на їх основі. Наночастинки слід розглядати як забруднювачі навколишнього середовища, які через свої малі розміри характеризуються високою проникністю у людський організм.

Малі розміри наночастинок зумовлюють небезпеку для рослин, тварин та здоров'я людини.

Серед небезпечних наночастинок слід зазначити ті, що накопичуються у харчових ланцюгах: азбест; частинки дизельного палива; ультрадрібні частинки; ДДТ; свинець.

Оскільки у природному стані наночастинки відсутні, живі організми не мають засобів захисту від них.

Є суттєва прогалина у наших знаннях щодо впливу нанотехнологій на здоров'я людини та навколишнє середовище [161].

Наноматеріали, що виробляються, характеризуються токсичним ефектом, який не можна пояснити лише зменшенням розмірів. Слід брати до уваги не лише нанорозміри, але й форму, велику площу поверхні, заряд, високу реактивну здатність наноматеріалів.

Можлива участь принципово нових механізмів. Так, наприклад, є гіпотеза, що стверджує можливий вплив C<sub>60</sub> фулеренів на структуру, стабільність та біологічні функції ДНК (Zhao et al., 2005. In: [161]).

Можливо утворення побічних продуктів: так, застосування заліза нульової валентності до очищення ґрунту та ґрунтових вод від хлорованих забруднювачів (трихлороетилен, дихлороетилен) та важких металів супроводжується утворенням біфенілу та бензолу [162].

Нанотехнологія прогресує, але на сьогоднішній день даних щодо потенціальної токсичної дії наноматеріалів на живі організми (людину, рослини, тварин, мікроорганізми) замало.

Потрібні подальші дослідження на основі застосування сучасних методів та приладів.





### Контрольні запитання та завдання

1. Дати визначення нанотехнології.
2. У чому принципова різниця звичайних частинок та наночастинок?
3. Охарактеризувати залізо нульової валентності з точки зору ремедіації.
4. Що таке біметалеві наночастинки?
5. Охарактеризувати емульсифіковані наночастинки.
6. Що таке наноматеріали?
7. Охарактеризувати самоорганізуючі моношари на мезопористій підкладці.
8. Для чого використовують нанотрубки?
9. Що таке феритини? дендримери? металопорфірини?
10. Зробити порівняльний аналіз мікро-, ультра- і нанофільтрації та зворотного осмосу.
11. Пояснити застосування мікроорганізмів для потреб ремедіації.
12. Назвати проблеми, що пов'язані з нанозабрудненням.



**Хай щастить!**

## ДОДАТКИ

### Нормативні документи у сфері моніторингу довкілля, прийняті в Україні за роки незалежності

- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.91 р.
- Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.92 р.; Постанова КМУ «Про затвердження Порядку організації та проведення моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» від 09.03.99 р. №343. Стаття 43 «Моніторинг у галузі охорони атмосферного повітря» Розділу VIII «Державний облік та моніторинг у галузі охорони атмосферного повітря».
- Водний кодекс України від 06.06.95 р.; Постанова КМУ «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод» від 20.07.96 №815. Стаття 21 «Державний моніторинг вод».
- Земельний кодекс України від 13.03.92 р.; Постанова КМУ «Про затвердження Положення про моніторинг земель» від 20.08.93 р. №661. Стаття 95 «Моніторинг земель» Розділу V «Контроль за використанням і охороною земель та їх моніторинг».
- Закон України «Про гідрометеорологічну діяльність» від 18.02.99 р.; Стаття 4 «Напрями гідрометеорологічної діяльності»; Стаття 12 «Державна система гідрометеорологічних спостережень».
- Постанова КМУ № 661 «Про затвердження Положення про моніторинг земель» від 20.08.1993.
- Постанова КМУ № 815 «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод» від 20.07.1996.
- Постанова КМУ № 1198 «Про єдину державну систему запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру» від 03.08.1998.
- Постанова КМУ від 09.03.1999 № 343 «Про затвердження Порядку організації та проведення моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря».
- Постанова КМУ № 1551 «Про утворення Міжвідомчої комісії з питань моніторингу довкілля» від 17.11.2001.
- Розпорядження КМУ № 992-р «Про схвалення Концепції Державної програми проведення моніторингу навколишнього природного середовища» від 31.12.2004.
- Постанова КМУ № 1376 «Про затвердження Державної цільової екологічної програми проведення моніторингу навколишнього природного середовища» від 05.12.2007.

## Психрометричні таблиці

1. Пружність водяної пари, мм рт. ст.

Температура повітря, С	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	4,58	4,61	4,65	4,68	4,71	4,75	4,79	4,82	4,85	4,89
1	4,92	4,96	5,00	5,03	5,07	5,10	5,15	5,18	5,21	5,25
2	5,29	5,33	5,37	5,41	5,45	5,48	5,52	5,57	5,60	5,64
3	5,69	5,72	5,76	5,84	5,89	5,93	5,93	5,97	6,02	6,05
4	6,10	6,14	6,18	6,23	6,27	6,32	6,36	6,41	6,45	6,50
5	6,54	6,59	6,63	6,68	6,73	6,77	6,82	6,87	6,92	6,96
6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7,41	7,46
7	7,52	7,54	7,61	7,67	7,72	7,77	7,83	7,88	7,94	7,99
8	8,04	8,10	8,15	8,21	8,27	8,33	8,38	8,44	8,49	8,55
9	8,61	8,67	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08	9,15
10	9,21	9,27	9,33	9,40	9,46	9,53	9,59	9,65	9,71	9,78
11	9,85	9,91	9,98	10,0	10,1	10,1	10,2	10,3	10,3	10,4
12	10,5	10,5	10,6	10,7	10,8	10,8	10,9	11,0	11,0	11,1
13	11,2	11,3	11,3	11,4	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8	11,91
14	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7
15	12,7	12,8	12,9	13,0	13,1	13,2	13,2	13,3	13,4	13,5
16	13,6	13,7	13,8	13,8	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4
17	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,2	15,3
18	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16,0	16,1	16,2	16,3
19	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	17,0	17,1	17,2	17,3	17,4
20	17,5	17,6	17,7	17,8	17,9	18,0	18,1	18,3	18,4	18,5
21	18,6	18,7	18,8	18,9	19,1	19,2	19,3	19,4	19,5	19,71
22	19,8	19,9	20,0	20,2	20,3	20,4	20,5	20,6	20,8	20,9
23	21,0	21,1	21,3	21,4	21,5	21,7	21,8	21,9	22,1	22,2
24	22,3	22,5	22,6	22,7	22,9	23,0	23,2	23,3	23,4	23,6
25	23,7	23,9	24,0	24,1	24,3	24,4	24,6	24,7	24,9	25,0
26	25,2	25,3	25,5	25,6	25,8	25,9	26,1	26,2	26,4	26,5
27	26,7	26,9	27,0	27,2	27,3	27,5	27,7	27,8	28,1	28,1
28	28,3	28,5	28,6	28,8	29,0	29,1	29,3	29,5	29,7	29,8
29	30,0	30,2	30,4	30,5	30,7	30,9	31,1	31,2	31,4	31,6
30	31,8	32,0	32,2	32,3	32,5	32,7	32,9	33,1	33,3	33,5
31	33,7	33,8	34,0	34,2	34,4	34,6	34,8	35,0	35,2	35,4
32	35,6	35,8	36,0	36,2	36,4	36,6	36,8	37,1	37,3	37,5
33	37,7	37,9	38,1	38,3	38,5	38,8	39,0	39,2	39,4	39,6
34	39,9	40,1	40,3	40,5	40,8	41,0	41,2	41,4	41,7	41,9
35	42,1	42,4	42,6	42,8	43,1	43,3	43,6	43,8	44,0	44,3
36	44,5	44,8	45,0	45,3	45,5	45,8	46,0	46,3	46,5	46,8
37	47,0	47,3	47,6	47,8	48,1	48,3	48,6	48,9	49,1	49,4
38	49,7	49,9	50,2	50,5	50,8	51,0	51,3	51,6	51,0	52,1
39	52,4	52,6	53,0	53,3	53,6	53,8	54,1	54,4	54,7	55,0



## 2. Пружність водяної пари, Па

Температура повітря, °С	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	611	615	620	624	629	633	638	642	647	652
1	656	661	666	671	676	680	686	690	695	700
2	705	710	716	721	726	731	736	742	747	752
3	758	763	768	779	785	790	790	796	802	807
4	813	819	824	830	836	842	848	854	860	866
5	872	878	884	891	897	903	909	916	922	928
6	935	941	948	954	961	968	974	981	988	995
7	1002	1008	1015	1022	1029	1036	1044	1051	1058	1065
8	1072	1080	1087	1095	1102	1110	1117	1125	1132	1140
9	1148	1156	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1220
10	1228	1236	1244	1253	1261	1270	1278	1287	1295	1304
11	1313	1321	1330	1339	1348	1357	1366	1375	1384	1393
12	1403	1412	1421	1431	1440	1450	1459	1469	1478	1488
13	1498	1508	1518	1528	1538	1548	1558	1568	1578	1588
14	1599	1609	1620	1630	1641	1651	1662	1673	1684	1695
15	1704	1715	1726	1737	1749	1760	1771	1783	1794	1806
16	1817	1829	1840	1852	1864	1876	1888	1900	1912	1924
17	1937	1949	1961	1974	1986	2000	2011	2024	2036	2050
18	2063	2076	2089	2102	2115	2129	2142	2155	2169	2183
19	2196	2210	2224	2238	2252	2266	2280	2294	2308	2323
20	2337	2352	2366	2381	2396	2410	2425	2440	2455	2471
21	2486	2501	2517	2532	2548	2563	2579	2595	2611	2627
22	2643	2659	2675	2692	2708	2724	2741	2758	2775	2791
23	2808	2825	2843	2860	2877	2894	2912	2930	2947	2965
24	2983	3001	3019	3037	3055	3074	3092	3110	3129	3148
25	3167	3186	3205	3224	3243	3262	3282	3301	3321	3341
26	3361	3381	3401	3421	3441	3461	3482	3502	3523	3544
27	3565	3586	3607	3628	3649	3671	3692	3714	3735	3757
28	3779	3801	3824	3846	3868	3891	3913	3936	3959	3982
29	4005	4028	4052	4075	4099	4122	4146	4170	419	4218
30	4243	4267	4292	4316	4341	4366	4391	4416	4441	4467
31	4492	4518	4544	4570	4596	4622	4648	4675	4701	4728
32	4755	4782	4809	4836	4863	4891	4918	4946	4974	5002
33	5030	5059	5087	5116	5144	5173	5202	5231	5261	5290
34	5320	5349	5379	5409	5439	5470	5500	5531	5561	5592
35	5623	5654	5686	5717	5749	5781	5813	5845	5877	5909
36	5942	5975	6007	6040	6074	6107	6140	6174	6208	6242
37	6276	6310	6345	6379	6414	6449	6484	6519	6555	6590
38	6626	6662	6698	6734	6771	6807	6844	6881	6918	6955
39	6993	7031	7068	7106	7145	7183	7221	7260	7299	7338

## ЛІТЕРАТУРА

1. Герасимов И.П. Мониторинг окружающей среды. Современные проблемы географии/И.П. Герасимов. — М.: Наука, 1976. — С.19-29.
2. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. Ю.А. Израэль — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 534 с.
3. Израэль Ю.А. Проблемы мониторинга и охраны окружающей среды / Израэль Ю.А. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 398 с.
4. Боголюбов В.М. Моніторинг довкілля/ Боголюбов В.М., Клименко М.О., Мокін В.Б. та ін. Підручник (скорочений варіант). —К.: НУБіПУ, 2010.
5. Боголюбов В.М. Моніторинг довкілля/ Боголюбов В.М., Клименко М.О., Мокін В.Б. та ін. Підручник. — Херсон: Гринь, 2011-530 с..
6. Клименко М.О. Моніторинг довкілля/ Клименко М.О., Прищепа А.М., Вознюк Н.М. К. —Академія, 2006.-359 с.
7. Полетаева Л.М. Моніторинг навколишнього природного середовища/ Полетаева Л.М., Сафранов Т.А. — К.: КНТ, 2007. — 172 с.
8. Дуднікова І.І. Моніторинг довкілля/ Дуднікова І.І., Пушкін С.П. К.: Вид-во Європейського ун-ту, 2007.Ч.1. —272 с. Ч.2. —312 с.
9. Постанова Кабінету Міністрів України № 391 від 30 березня 1998 р. «Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля» зі змінами та доповненнями.
10. Постанова КМУ від 05.12.2007 № 1376 «Про затвердження Державної цільової екологічної програми проведення моніторингу навколишнього природного середовища».
11. «Єдине міжвідомче керівництво з організації та здійснення державного моніторингу вод» Наказ Мінекоресурсів від 24.12.2001 р. № 485. <http://zakon.nau.ua/doc/?uid=1041.14957.0>
12. Центральна Геофізична Обсерваторія <http://www.cgo.kiev.ua/>
13. Клименко М.О. Метрологія, стандартизація і сертифікація в екології/ Клименко М.О., Скрипчук П.М. К.: Академія, 2006. — 366 с.
14. Ауров В.В. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища / Ауров В.В. Одеса, ТЕС, 2002. —284 с.
15. Посудін Ю.І. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища/ Посудін Ю.І. К.; Світ, 2003. —286 с.
16. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища/ Масікевич Ю.Г., Гринь С.О., Герещун Г.М. та ін. Чернівці, Зелена Буковина, 2005. — 341 с.
17. Посудін Ю.І. Практикум з методів вимірювання параметрів навколишнього середовища/ Посудін Ю.І. К.: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2007. — 226 с.
18. Посудін Ю.І. Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища/ Посудін Ю.І.К.: 2011. —296 с.
19. Vaisala Weather Radar WRM200 - Vaisala <http://www.vaisala.fi/weather/products/wrm200.html>

20. Radio acoustic sounding system  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Radio\\_acoustic\\_sounding\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_acoustic_sounding_system)
21. Doppler Radar Images <http://www.wrh.noaa.gov/hnx/doppler.php>
22. AMeDAS <http://en.wikipedia.org/wiki/AMeDAS>
23. Державна гідрометеорологічна служба – МНС України.  
<http://www.mns.gov.ua/content/derjgidrometvstrukturi.html>
24. Центральна Геофізична Обсерваторія — Київ <http://www.cgo.kiev.ua>  
 401 Відділ кліматології  
<http://www.cgo.kiev.ua/index.php?fn=klim&f=structure>
25. Постанова Кабінету Міністрів України від 28 червня 1997 р. N 650, Київ. *Про Кліматичну програму України.* <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=650-97-%EF>
26. Проект Концепції державної цільової економічної програми технічного та технологічного розвитку гідрометеорологічної служби  
[www.mns.gov](http://www.mns.gov).
27. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности/ Будыко М. И. Л.: 1956.
28. Meijninger W.M.L. Surface fluxes over natural landscapes using scintillometry/ Meijninger W.M.L Wageningen Universiteit, 2003 p. 164.
29. Large Aperture Scintillometer Intercomparison Study Boundary Layer/ Kleissl J, Gomez J., Hong S.-H. et al. Meteorology manuscript No. 335 August 7. — 2007.
30. L. Prandtl, Theory of lifting surfaces, NACA TN 9, Jul 1920.
31. Bell, G.D., Halpert, M.S., Schnell, R.C., Higgins, R.W., Lawrimore, J., Kousky, V.E., Tinker, R., Thiaw, W., Chelliah, M. and Artusa, A. 2000. Climate assessment for 1999. Bulletin of the American Meteorology Society 81: S1-S50.
32. Tverskoy P.N. Meteorology curse/ Tverskoy P.N. —L.: Hydrometizdat, 1962. — 692 p.
33. Global Humidity Zones  
<http://ag.arizona.edu/OALS/soils/surveys/global.html>
34. The Water Cycle:  
 Precipitation <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleprecipitation.html>
35. Climate Zones and Types: The Köppen System // Physical Geography: A Landscape Appreciation. — Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000. — P. pp. 200-1
36. Ehleringer J.R. Stable Isotopes/ Ehleringer J.R., Cerling T.E. Vol. 2, The Earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change, pp 544-550, Ed.H.A. Mooney and J.G. Canadell. In: Encyclopedia of Global Environmental Change. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester. —2002.
- 37 Mook W. G. Introduction to Isotope Hydrology. Stable and Radioactive Isotopes of Hydrogen, Oxygen and Carbon/ Mook W. G. Taylor & Francis. London/Lieden/New York/Philadelphia/Singapore. —2006. —226 p.
38. Clouds from a Different Angle.  
[http://nasadaacs.eos.nasa.gov/articles/images/2004\\_clouds\\_trmm.jpg](http://nasadaacs.eos.nasa.gov/articles/images/2004_clouds_trmm.jpg)

- 39 Shimizu T. Practical applicability of high frequency correction theories to CO<sub>2</sub> flux measured by a closed-path system/ Shimizu T. //Boundary-Layer Meteorol, 2007. —122. —P. 417-438.
40. Guenther A. Trace Gas Emission Measurements/ Guenther A. In: Environmental Monitoring Handbook, F.R. Burden, I.McKelvie, U. Forstner, A. Guenther, eds. McGraw-Hill, N.Y. . —2002.
41. Hutley L.B. Evapotranspiration from Eucalypt open-forest savanna of Northern Australia/ Hutley L.B., A. P. O'Grady, D. Eamus // Functional Ecology, Volume 14, Issue 2, pages 183–194, April 2000
42. Desjardins R. A study of carbon dioxide and sensible heat fluxes using the eddy correlation technique/ Desjardins R. PhD thesis, Cornell University.1972.
43. Hicks, B. B. A Simulation of the Eddy Accumulation Method for Measuring Pollutant Fluxes/ Hicks, B. B.; McMillen, R. Journal of Applied Meteorology,1984. —23. — N4. —P.637-643
44. «Organization». Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/organization/organization.htm>. Retrieved 2010-01-15.
45. GCOS Surface Network (1040 Stations) GCOS Secretariat, 1 March 2011 [http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/images/GSN\\_Map\\_2011.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/images/GSN_Map_2011.pdf)
46. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (eds. Solomon, S.D., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and Miller, H.L.). 996 pp. Cambridge University Press.
47. Sustainable Low-Carbon Society. F. Yoshida and Motoyoshi Ikeda, eds. Hokkaido University Press, 2010.-201 p.
48. Carbon Dioxide Emissions Scenarios [http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Carbon\\_Dioxide\\_Emissions\\_Scenarios\\_png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Carbon_Dioxide_Emissions_Scenarios_png)
49. Зміна клімату, 2007, четверта доповідь Міжурядової групи експертів зі зміни клімату. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 [http://en.wikipedia.org/wiki/Intergovernmental\\_Panel\\_on\\_Climate\\_Change](http://en.wikipedia.org/wiki/Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change)
50. Artic ice melting ... melting ... melting ... gone? Posted on April 30, 2007 by A Siegel| 42 Comments
51. Ikeda M. Introduction to Environmental Earth Science (Lectures in Hokkaido University) Ikeda M. et al. . —2008.
52. The Arctic Sea Ice Retreat of 2007 <http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NasaNews/2007/2007121225985.html>
53. Оцінка виконання Плану дій Україна-ЄС: довілля та сталий розвиток / Під ред.Н.Андрусевич. Львів. 2009. 104 с
54. Міжнародні переговори ООН зі зміни клімату у Копенгагені 7 грудня 2009 р. <http://www.nesu.org.ua/peregovory-cop-rozpochaty/>
55. Степаненко О. «Захистіть клімат! Не гальмуйте міжнародні переговори!»/ Степаненко О. <http://www.helsinki.org.ua/index.php?print=1259873496>

56. Кліматична ситуація України, 14 декаб­ря 2009 г. Захистіть клімат! Не гальмуйте переговори! <http://klimatofukrain.blogspot.com/>
57. Pantle R., Buck H. (1955): Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. Gas - und Wasserfach 96 (18): 604.
58. Test method: generic diatom indices Revised: 30 May 2007. [http://www.deltaenvironmental.com.au/management/Lab\\_methods/Generic\\_indices.htm](http://www.deltaenvironmental.com.au/management/Lab_methods/Generic_indices.htm)
59. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование/ Мелехова О.П., Евсеева Т.И., Сарапульцева Е.И. и др. Издательский центр «Академия», 2007.-288 с.
60. Посудін Ю.І. Вимірювання гравітаксиса водоростей як засіб біомоніторингу водних середовищ // Наук.вісник НАУ, 1998.- №3.-С.15-21.
61. Посудін Ю.І. Фізика і біофізика навколишнього середовища/ Посудін Ю.І. К.: Світ, 2000. —300 с.
62. Artiola J.F. Environmental Monitoring and Characterization/ Artiola J.F., Pepper I.L., Brusseau M.L. Elsevier Academic Press, San Diego, 2004.—410 p.
63. Білявський Г.О. Основи екології/ Білявський Г.О. К.: Либідь, 2006.—408 с.
64. Білявський Г.О. Основи екологічних знань/ Білявський Г.О., Фурдуй Р.С. К.: Либідь, 1997
65. Vallero D.2008. Fundamentals of Air Pollution, Fourth Edition  
Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.92 р.; <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=2707-12>
66. Air Quality Index. A Guide to Air Quality and Your Health, 2009. [http://www.epa.gov/airnow/aqi\\_brochure\\_08-09.pdf](http://www.epa.gov/airnow/aqi_brochure_08-09.pdf)
67. Locations for Global Ozone Passive Monitoring Project <http://www.thesalmons.org/ozone/countries.html>
68. Poehler, D. Tomographic DOAS measurements of the 2D trace gas distribution above the city centre of Heidelberg/ Poehler, D., B. Rippel, A. Stelzer, K. Mettendorf , A. Hartl, U. Platt, and I. Pundt. Germany.—2005. <http://www.cosis.net/abstracts/EGU05/08790/EGU05-J-08790.pdf>
69. Liu S. Liquid Droplet. A Renewable Gas Sampling Interface/ Liu S., Dasgupta P.K. Anal Chemistry, 1995.— 67(13) .—P. 2042-2049
70. Liu H. A Renewable Liquid Droplet as a Sampler and a Windowless Optical Cell/ Liu H., Dasgupta P.K. Automated Sensor for Gaseous Chlorine. Anal Chemistry, 1995.— 67.—P.4221-4228.
71. Cardoso A.A. Analytical Chemistry in a Liquid Film/Droplet/ A.A. Cardoso and P. K. Dasgupta //Anal. Chemistry. 1995.— 67(15) .—P.2562-2566
72. Toda K. Measurement of Atmospheric Hydrogen Sulfide by Continuous Flow Flowmetry/ Toda K., Dasrupta P.K., Li J., Tarver G.A., Zarus G.M., Ohira S. Anal. Sciences, 2001.— 17.— Suppl. .—P. 1407-1410.
73. Ohira S.-I. Micro gas analysis system for measurement of atmospheric hydrogen sulfide and sulfur dioxide/. Ohira S.-I., Toda K. 2005.— Lab Chip.— 5.—P. 1374-1379.

74. Micro-gas analysis system for measurement of nitric oxide and nitrogen dioxide: Respiratory treatment and environmental mobile monitoring/ Toda K., Hato Y., Ohira S.-I., Namihira T. *Anal.Chem.Acta*, 2007.—P. 603:60-66.
75. Toda K. New Applications of Chemiluminescence for selective Gas Analysis/ Toda K., Dasrupta P.K. *Chem. Eng. Comm.* 2008.— 195.—P.82-97.
76. Azad M.A.K. Single Column Trapping/Separation Chemiluminescence Detection for On-Site Measurement of Methyl Mercaptan and Dimethyl Sulfide/ Azad M.A.K., Ohira S.-I. Toda K. *Anal. Chem.* 2006.— 78.—P. 6252-6259.
77. Can Breath Isoprene Be Measured by Ozone Chemiluminescence? / Ohira S.-I. Li J., Lonneman W.A., Dasrupta P.K. Toda K. *Anal. Chem.* 2007.—79.— 2641-2649.
78. Ioana I. Methods for online monitoring of air pollution concentration/ Ioana I. and Popescu F. In: *Air Quality*, A. Kumar, ed. 2010.
79. *Indoor air quality. A comprehensive reference book.* M. Maroni, B. Seifert, T. Lindvall, eds. Amsterdam-Laussane-New York-Oxford-Shannon-Tokyo, 1995.—1049 p.
80. WHO's Programme on Indoor Air Pollution. 2002. 30.06.2010. [www.who.int/indoorair/contact/en/index.html](http://www.who.int/indoorair/contact/en/index.html).
81. 2009 United Nations Climate Change Conference/ [http://en.wikipedia.org/wiki/2009\\_United\\_Nations\\_Climate\\_Change\\_Conference](http://en.wikipedia.org/wiki/2009_United_Nations_Climate_Change_Conference)
82. Godish Thad. *Indoor Environmental Quality/* Godish Thad. Lewis Publishers, Boca Raton – London-New York-Washington.—2001.—461 p.
83. Hess-Kosa K. *Indoor Air Quality. Sampling Methodologies/* Hess-Kosa K. Lewis Publishers. Boca Raton-London-New York- Washington.—2002.
84. Posudin, Yuriy. *Volatile Organic Compounds in Indoor Air: Scientific, Medical and Instrumental Aspects/* Posudin, Yuriy. eKMAIR.University Library, National University of «Kyiv-Mohyla Academy» <http://www.ekmair.ukma.kiev.ua/handle/123456789/885>
85. Посудін Юрій. Вплив летких органічних сполук у повітрі приміщень на здоров'я людини///Довкілля та здоров'я, 2011.—N4.
86. Посудін Ю.І. Моніторинг якості повітря приміщень/ Посудін Ю.І. Наукові доповіді НУБіП України, 2011-3 (25) [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2011\\_3/11pyi.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2011_3/11pyi.pdf)
87. *Indoor air quality. A comprehensive reference book.* M. Maroni, B. Seifert, T. Lindvall, eds. Amsterdam-Laussane-New York-Oxford-Shannon-Tokyo, 1995.—1049 p.
88. Hunter R. *Control of Volatile Organic Compound Emissions. Conventional and Emerging Technologies/* Hunter R. and Oyama S.T. John Willey & Sons, Inc. 2000.
89. Godish, T. *Sick Building: Definition, Diagnosis, and Mitigation/* Godish, T. Lewis Publishers, Boca Raton, Fl. —1995.
90. Takeda M *Relationship between sick building syndrome and indoor environmental factors in newly built Japanese dwellings/* Takeda M., Saijo Y., Yuasa M. et al.// *Int Arch Occup Environ Health* .— 2009.— 82(5) .—P. 583-593.

91. Saijo Y. Symptoms in relation to chemicals and dampness in newly built dwellings/ Saijo Y., Kishi R., Sata F. et al.//Int Arch Occup Environ Health .— 2004.— 77.—P.461-470.
92. Saijo Y. Relation of dampness to sick building syndrome in Japanese public apartment houses/ Saijo Y., Nagaki Y., Ito T. et al.//Environ Health Prev Med .— 2009.— 14.—P. 26-35.
93. Dong Sik Yang. Volatile Organic Compounds Emanating from Indoor Ornamental Plants/ Dong Sik Yang, Ki-Cheol Son and Stanley J. Kays. *HortScience*.—2009.— 44.— 396-400.
94. Masucci J.A. Techniques for Gas Chromatography/Mass Spectrometry/ Masucci J.A. and Caldwell G.W. In: Modern Practice of Gas Chromatography. 4<sup>th</sup> edition. R.L. Grob and E. F. Barry, eds. Wiley Interscience, 2004.— 1064 p.
95. Photoacoustic sensor for VOCs: First step towards a lung cancer breath test/ Wolff, M., Groninga, H.G., Dressler, M., Harde, H. . Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 5862(Diagnostic Optical Spectroscopy in Biomedicine III), 58620G/1-58620G/7.—2005.
96. Hansel A. Proton transfer mass spectrometer/ Hansel A. Europhysics News .— 2004.— 35(6) .—P.197-199.
97. Lindinger, C. Unambiguous Identification of Volatile Organic Compounds by Proton-Transfer Reaction Mass Spectrometry Coupled with GC/MS/ Lindinger, C., Pollien, P., Ali, S. et al. *Analytical Chemistry*.—2005.— 77(13) .— 4117-4124.
98. Kato, S. Measurement of volatile organic compounds by proton transfer reaction mass spectrometry/Kato, S., Kajii, Y. *Shinku*, 2004.—V.47(8).—P.600-605.
99. Посудін Ю.І. Методи неруйнівної оцінки якості та безпеки сільськогосподарських і харчових продуктів. Київ: Арістей, 2005.-407 с.
100. Soil Pollution. <http://www.pollutionissues.com/Re-Sy/Soil-Pollution.html>
101. Doran, J.W. Defining and assessing soil quality. In: Defining Soil Quality for a Sustainable Environment/ Doran, J.W., and T.B. Parkin., J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdick, and B.A. Stewart (Eds.). Soil Sci. Soc. Am. Special Publication No. 35, Madison, Wisconsin, USA.—1994.— P. 3-21.
102. Andrews S. Soil Quality for Environmental/ Andrews S., Wander M., Kuykendall H. Health. <http://soilquality.org/home.html>
103. Soil Biology Guide. Dindal (ed.) 1990 John Wiley & Sons; Soil Microbial Ecology, F. Blaine Metting Jr. (ed.) .— 1993.
104. Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy [http://en.wikipedia.org/wiki/Inductively\\_coupled\\_plasma\\_atomic\\_emission\\_spectroscopy](http://en.wikipedia.org/wiki/Inductively_coupled_plasma_atomic_emission_spectroscopy)
105. Method 6020A. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) <http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/6020a.pdf>
106. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health CCME SOIL QUALITY INDEX 1.0 Technical Report [http://www.ccme.ca/assets/pdf/soqi\\_tech\\_report\\_e\\_1.1.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/soqi_tech_report_e_1.1.pdf)



107. Земельний кодекс України. Документ 2768-14, остання редакція від 20.06.2007 на підставі 997-16, чинний.  
[http://www.zemelnyy.org.ua/rozdil\\_7/g33/](http://www.zemelnyy.org.ua/rozdil_7/g33/)
108. Мірошниченко М.М. Якість ґрунтів – запорука продовольчої безпеки країни/ Мірошниченко М.М. <http://pervoistoki.kharkov.ua/text/kachestvo-gruntov.html>
109. Ahuja S. Overview. In: Handbook of Water Purity and Quality/ Ahuja S. Elsevier Inc. 2009.
110. U.S. EPA. National Recommended Water Quality Criteria-Correction. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Water 4304. EPA822-Z-99-001. April 1999.—1999.
111. U.S. EPA. Drinking Water Standards and Health Advisories. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Water 4304 EPA 822-B-00-001. Summer 2000.—2000.
112. Secondary Drinking Water Standards (US EPA):  
[www.epa.gov/safewater/ncl.html](http://www.epa.gov/safewater/ncl.html)
113. EU's drinking water standards  
<http://www.lenntech.com/applications/drinking/standards/eu-s-drinking-water-standards.htm>
114. WHO/EU drinking water standards comparative table.
115. WHO's drinking water standards 1993.  
<http://www.lenntech.com/applications/drinking/standards/who-s-drinking-water-standards.htm>
116. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10).  
<http://omegaltd.com.ua/article/179.php>
117. Environmental applications of membrane introduction mass spectrometry/ Ketola R.A., Kotiaho T., Cisneros M.E., Allen T.M. J. Mass Spectrometry. 2002.— 37.—P. 457-476.
118. Посудін Ю.І. Спектроскопічний моніторинг агросфери/ Посудін Ю.І. К.: Урожай, 1998. —127 с.
119. Посудін Ю.І. Біофізика рослин/ Посудін Ю.І. Вінниця, Нова книга, 2004.—252 с.
120. Kautsky H., Hirsch A. Neue Versuche zur Kohlenstoffassimilation// *Naturwissenschaften*, 1931.V.19.-P. 964.
121. Schreiber U., Schliva U., Bilger W. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer// *Photosynthetic Research*, 1986.-V.10.-P.51-62.
122. Measures RM, Houston W, Bristow M. Development and field-tests of a laser fluorosensor for environmental monitoring. *Canadian Aeronautics and Space Journal* 1973;19:501-506.
123. Posudin Yu.I. Lasers in Agriculture. Science Publishers, Inc. Enfield: New Hampshire, 1998.-188 p.



124. Posudin Yuriy. *Practical Spectroscopy in Agriculture and Food Science*. Science Publishers, Enfield, 2007.-196 p.
125. Kolber Z, Klimov D, Ananyev G, Rascher U, Berry J, Osmond B. Measuring photosynthetic parameters at a distance: laser induced fluorescence transient (LIFT) method for remote measurements of photosynthesis in terrestrial vegetation. *Photosynthesis Research* 2005;84:121-129.
126. Ananyev G, Kolber ZS, Klimov D, Falkowski PG, Berry JA, Rascher U, Martin R, Osmond B. Remote sensing of heterogeneity in photosynthetic efficiency, electron transport and dissipation of excess light in *Populus deltoides* stands under ambient and elevated CO<sub>2</sub> concentrations, and in a tropical forest canopy, using a new laser-induced fluorescence transient device. *Global Change Biology* 2005;11:1195-1206.
127. Якименко І.Л., Сидорчик Є.П. Мобільний телефон і здоров'я людини. К.: Знання, 2010-94 с.
128. Барановський В.А., Бобильова О.А., Омелянець М.І., Табачний Л.Я. Україна. Радіаційна безпека, масштаб 1:3 000 000. Київ, Всеукраїнська Екологічна Ліга, 2004.
129. Henry J.G., Heike G.W. (1996) *Environmental Science and Engineering*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey. –778 p.
130. Virkutyte J. Electrokinetic soil remediation – critical overview/ Virkutyte J., Sillanpää M. *Sci Total Environ*. 2002.— Apr 22.— 289(1-3).—P.:97-121.
131. Applied bioremediation and phytoremediation. Ajay Singh, Owen P. Ward, eds. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004.
132. Phytoremediation of contaminated soil and water/Eds. N.Terry, G. Bañuelos. 2000.
133. Phytoremediation of soil and water contaminants / Eds. E. L. Kruger, T. A. Anderson, J. R. Coats, 1997.
134. Phytoremediation. Transformation and Control of Contaminants. (2003) S.C.McCutcheon, J.L. Schnoor, eds. Wiley-Interscience.
135. Efficacy of indoor plants for the removal of single and mixed volatile organic pollutants and physiological effects of the volatiles on the plants/ Yoo, Mung Hwa; Kwon, Youn Jung; Son, Ki-Cheol; Kays, Stanley J. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2006.—131(4).—P. 452-458.
136. Environmental Bioremediation Technologies. Singh S.N. and Tripathi R.D., eds. Springer Berlin Heidelberg New York, 2007. 518 pp.
137. Kvesitadze G. Biochemical Mechanisms of Detoxification in Higher Plants/ Kvesitadze G., Khatisashvili G., Sadunishvili T., Ramsder J.J. *Basis of Phytoremediation*. Berlin, N.Y., Springer. 2006.
138. Degradation of Low Molecular Weight Volatile Organic Compounds by Plants Genetically Modified with Mammalian Cytochrome P450 2E1/ James, C. A.; Xin, G.; Doty, S. L.; Strand, S. E. *Environmental Science & Technology* (008.— 42(1).— P. 289-293.
139. Negri, C. M. The use of plants for the treatment of radionuclides/ Negri, C. M., and R. R. Hinchman. Chapter 8 of *Phytoremediation of toxic metals: Using*

plants to clean up the environment, ed. I. Raskin and B. D. Ensley. New York: Wiley-Interscience Publication, 2000.

140. Entry J.A. Strontium-90 uptake by *Pinus ponderosa* and *Pinus radiata* seedlings inoculated with ectomycorrhizal fungi/ Entry J.A., Rygielwicz P.T., Emmingham W.H. Environmental Pollution 1994.— 86.— P.201-206.

141. Richard Feynman «There's Plenty of Room at the Bottom», a talk given by physicist at an American Physical Society  
[http://en.wikipedia.org/wiki/There's\\_Plenty\\_of\\_Room\\_at\\_the\\_Bottom](http://en.wikipedia.org/wiki/There's_Plenty_of_Room_at_the_Bottom)

142. Taniguchi N., «On the Basic Concept of 'Nano-Technology',» Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering, 1974.

143. Pariera N. Nanotechnology for Environmental Remediation/ Pariera N. 2007. Pearl Books, New Dehli.—248 p.

144. Sung Hee Joo. Nanotechnology for Environmental Remediation/ Sung Hee Joo, I.F. Cheng. Springer. 2010.—165 p.

145. Zhang, W-X. 2003. Nanoscale Iron Particles for Environmental Remediation: An Overview/ Zhang, W-X. Journal of Nanoparticle Research. 2003.—5.—P.323-332.

146. 2008. Ionic Strength and Composition Affect the Mobility of Surface-Modified Fe<sup>0</sup> Nanoparticles in Water-Saturated Sand Columns/ Saleh, N., H-J. Kim, T. Phenrat et al. Environmental Science & Technology. 2008.— 42.— P.3349-3355.

147. Matheson, L.J. 1994. Reductive Dehalogenation of Chlorinated Methanes by Iron Metal/Matheson, L.J., and P.G. Tratnyek. Environmental Science & Technology.1994.—28(12).—P.2045-2053.

148. Li X. ZeroValent Iron Nanoparticles for Abatement of Environmental Pollutants: Materials and Engineering Aspects/ Li X., Elliott D.W., Zhang W.-X. Critical Reviews in Solid State and Material Science. 2006.— 31.—P. 111-122.

149. Zhang, W-X. Applications of iron nanoparticles for groundwater remediation/ Zhang, W-X., and D.W. Remediation. 2006.— 16(2).

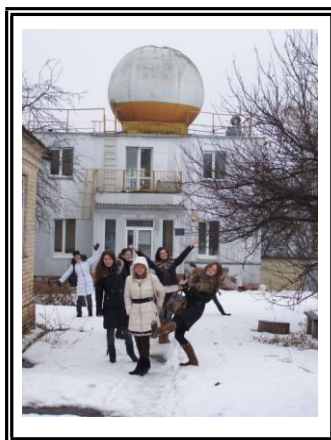
150. Zhang, W-X. Catalytic reduction of chlorinated hydrocarbons by bimetallic particles/ Zhang, W-X., Wang C., Lien H. Catal. Today. 1998.— 40(4).—P. 387-395.

151. Field and Laboratory Evaluation of the Treatment of DNAPL Source Zones Using Emulsified Zero-Valent Iron/. O'Hara, S., T. Krug, J. Quinn et al. Remediation Journal. Spring 2006.

152. Design and Synthesis of Self Assembled Monolayers on Mesoporous Supports (SAMMS™): The Importance of Ligand Posture in Functional Nanomaterials/ Fryxell G, S. Mattigod, L. Yuehe et al. Journal of Materials Chemistry. 2007.— 17.—P. 2863-2874.

153. Konstantinou, I.K. Photocatalytic Transformations of Pesticides in Aqueous Titanium Dioxide Suspensions Using Artificial and Solar Light: Intermediates and Degradation Pathways/ Konstantinou, I.K., and T. A. Albanis. Applied Catalysis B: Environmental. 2003.— 42.—P.319-335.

154. Preparation of a Novel TiO<sub>2</sub>-Based P-N Junction Nanotube Photocatalyst/ Chen, Y., J.C. Crittenden, S. Hackney, L. Sutter, and D.W. Hand. *Environmental Science & Technology*. 2005.—39(5) .—P.1201-1208.
155. Casiday R. Iron Use and Storage in the Body: Ferritin and Molecular Representations/ Casiday R. and Frey R. 1999.  
<http://www.chemistry.wustl.edu/~edudev/LabTutorials/Ferritin/Ferritin.html>
156. Diallo, M. Fe(0)/FeS Dendrimer Nanocomposites for Reductive Dehalogenation of Chlorinated Haliphatic Compounds: Synthesis, Characterization and Bench Scale Laboratory Evaluation of Materials Performance/ Diallo, M., P. Hudrlik, and A. Hudrlik. Power Point Presentation.2006.  
 Available at: [http://www.howard.edu/CEACS/news/HBCU\\_MI/Howard%20-Diallo.ppt](http://www.howard.edu/CEACS/news/HBCU_MI/Howard%20-Diallo.ppt). Accessed September 25, 2008.
157. Xu Y. Removal of Lead From Contaminated Soils Using Poly(amidoamine) Dendrimers/ Xu Y. and D. Zhao. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2006.—45.—P.1758-1765.
158. Dror,I. Use of Nanosized Catalysts for Transformation of Chloroorganic Pollutants/ Dror,I., D. Baram, and B. Berkowit. *Environmental Science & Technology*. 2005.—39(5) .—P. 1283-1290.
159. Edmiston, P.L. Pilot Scale Testing of Swellable Organosilica-Nanoparticle Composite Materials for the In Situ and Ex Situ Remediation of Groundwater Contaminated with Chlorinated Organics/ Edmiston, P.L. May 13, 2010. Available at: [www.frtr.gov/meetings1.htm](http://www.frtr.gov/meetings1.htm).
160. Boccieri, J. 2010. Boccieri Announces \$200,000 To Abs Materials Company, LLC. Available at:  
[http://boccieri.house.gov/index.php?option=com\\_content&view=article&id=366:boccieri-announces-200000-to-abs-materials-company-llc&catid=39:press-releases&Itemid=64](http://boccieri.house.gov/index.php?option=com_content&view=article&id=366:boccieri-announces-200000-to-abs-materials-company-llc&catid=39:press-releases&Itemid=64). Accessed August 19, 2010.
- 161 U.S. Environmental Protection Agency.Nanotechnology White Paper .EPA 100/B-07/001 | February 2007.[www.epa.gov/osa](http://www.epa.gov/osa)
162. Elliot, D. W. Novel products from the degradation of lindane by nanoscale zero valent iron (abstract)/ Elliot, D. W., Spear, S. T., and Zhang, W. Available online at: <http://oasys2.confex.com/acs/229nm/techprogram/P838313.HTM>. Accessed July 26, 2005.



ПОСУДІН Ю.І.

# МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ З ОСНОВАМИ МЕТРОЛОГІЇ

Підручник для підготовки студентів вищих  
навчальних закладів III - IV рівнів акредитації  
за напрямом 6.040106 *“Екологія, охорона  
навколишнього середовища та збалансоване  
природокористування”*

Київ 2012