

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**О.Г. Іваненко**

# **Гідроекологія**

**ББК 28.081**

**I -18**

**УДК 504.4**

*Друкується за рішенням Вченої ради Одеського державного екологічного університету  
(протокол № 10 від 25 . 10 . 2007 р.).*

**Іваненко О.Г.**

Гідроекологія: Конспект лекцій. – Одеса: Екологія, 2008. – 88 с.

В конспекті лекцій послідовно викладено описання форм і особливостей функціонування водних екосистем, розглянуті абіотичні чинники, енергозабезпеченість та вплив динаміки водних мас на їхні властивості. Проведено аналіз впливу твердого стоку й донних відкладів на формування водних екосистем, а також сумісний вплив гідрологічних, гідрохімічних і гідробіологічних чинників на біологічну продуктивність водних екосистем.

Конспект лекцій розраховано на студентів, магістрів, аспірантів гідроекологічного напрямку.

© Одеський державний  
екологічний університет, 2008

## З М І С Т

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| П Е Р Е Д М О В А .....                                                                     | 5  |
| 1 ПРЕДМЕТ І ЗАДАЧІ ГІДРОЕКОЛОГІЇ .....                                                      | 7  |
| 1.1 Поняття про гідроекологію.....                                                          | 7  |
| 1.2 Значення гідроекології для людського суспільства .....                                  | 8  |
| 1.3 Завдання гідроекології, її зв'язок з іншими науками .....                               | 10 |
| 2 ВОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ЯК ЕКОЛОГІЧНА СИСТЕМА .....                                              | 13 |
| 2.1 Поняття про водну екосистему .....                                                      | 13 |
| 2.2 Види водних екосистем.....                                                              | 14 |
| 2.3 Принципова схема функціонування водної екосистеми .....                                 | 15 |
| 3 АБІОТИЧНІ ЧИННИКИ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ.....                                                   | 17 |
| 3.1 Фізичні і хімічні властивості води та їх екологічні аспекти .....                       | 18 |
| 3.2 Чинники формування хімічного складу природних вод .....                                 | 22 |
| 3.3 Антропогенні чинники якості вод.....                                                    | 26 |
| 4 ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЬ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ .....                                               | 30 |
| 4.1 Основні чинники теплового режиму водних об'єктів .....                                  | 30 |
| 4.2 Надходження сонячної енергії у водні маси.....                                          | 31 |
| 4.3 Залишкова сонячна радіація у водних масах .....                                         | 34 |
| 4.4 Прозорість води як чинник енергозабезпечення гідроекосистем.....                        | 35 |
| 4.5 Термічний режим водних об'єктів .....                                                   | 37 |
| 5 ДИНАМІКА ВОДНИХ МАС І ЇЇ ВПЛИВ НА ВЛАСТИВОСТІ ВОДНИХ<br>ЕКОСИСТЕМ .....                   | 40 |
| 5.1 Основні види динаміки водних мас і їх екологічне значення.....                          | 40 |
| 5.2 Методи розрахунку вітрових течій у водоймищах .....                                     | 44 |
| 5.3 Основні показники зовнішнього й внутрішнього водообміну .....                           | 51 |
| 6 БІОТИЧНІ ЧИННИКИ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ.....                                                    | 57 |
| 6.1 Трансформація речовин в гідроекосистемах .....                                          | 57 |
| 6.2 Передача речовин по трофічних ланцюгах.....                                             | 60 |
| 6.3 Передача енергії по трофічних ланцюгах .....                                            | 61 |
| 6.4 Біологічний кругообіг речовин .....                                                     | 62 |
| 6.4.1 Основні закономірності кругообігу речовин.....                                        | 62 |
| 6.4.2 Кругообіг води.....                                                                   | 63 |
| 6.4.3 Кругообіг вуглецю .....                                                               | 65 |
| 6.4.4 Кругообіг кисню .....                                                                 | 67 |
| 6.4.5 Кругообіг азоту.....                                                                  | 68 |
| 6.4.6 Кругообіг фосфору, сірки, неорганічних катіонів .....                                 | 69 |
| 6.5 Поняття про процес фотосинтезу .....                                                    | 70 |
| 7 ВПЛИВ ТВЕРДОГО СТОКУ Й ДОННИХ ВІДКЛАДІВ НА<br>ГІДРОЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН РІЧОК І ВОДОЙМИЩ..... | 72 |

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1 Твердий стік і його вплив на гідроекологічні процеси.....                                                                        | 72 |
| 7.2 Вплив механічного складу наносів на якість річкових вод.....                                                                     | 73 |
| 7.3 Розрахунок прозорості вод за даними їхньої мутності .....                                                                        | 76 |
| 7.4 Донні відклади і екосистема.....                                                                                                 | 78 |
| 8 СУМІСНИЙ ВПЛИВ ГІДРОЛОГІЧНИХ, ГІДРОХІМІЧНИХ І ГІДРО-<br>БІОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА БІОЛОГІЧНУ ПРОДУКТИВНІСТЬ<br>ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ..... | 79 |
| 8.1 Розрахунок первинної біологічної продукції водних екосистем за<br>гідрометеорологічними характеристиками.....                    | 81 |
| 8.1.1 Методи розрахунку ФАР.....                                                                                                     | 81 |
| 8.1.2 Визначення ФАР по глибині водоймища .....                                                                                      | 83 |
| 8.2 Вплив регулювання стоку на біологічну продуктивність річки.....                                                                  | 84 |
| 8.3 Гідрологічні умови «цвітіння» води у водосховищах .....                                                                          | 86 |
| 8.4 Взаємозв'язок між гідробіологічними й гідрологічними<br>характеристиками водоймищ .....                                          | 87 |
| 8.5 Про можливість регулювання функцій водних екосистем .....                                                                        | 88 |
| Бібліографічний опис.....                                                                                                            | 90 |

## ПЕРЕДМОВА

Запропонований конспект лекцій із гідроекології присвячений дуже важливій темі – вивченню стану водних екосистем з метою вирішення проблем захисту й контролю якості природних вод. Освоєння основних наукових положень гідроекологічної науки є важливим етапом підготовки гідроекологів у вищому навчальному закладі екологічного профілю для вивчення ними комплексу процесів, що формують якість води. Ці знання дадуть можливість випускникам успішно виконувати важливі функціональні роботи, які забезпечують необхідну інформацію, для прийняття відповідних науково-технічних рішень у боротьбі за підвищення якості природних вод.

У конспекті викладені теми для послідовного вивчення студентами навчального матеріалу по розділах, пов'язаних з розкриттям основних положень функціонування водних екосистем.

На початку конспекта лекційпосібника в розділі 1 **«Предмет і задачі гідроекології»** містяться початкові відомості про гідроекологію – її суть, предмет, зв'язки з іншими науками. Наведено загальний опис гідроекології, її завдань, значення гідроекологічних досліджень для сучасного періоду розвитку людського суспільства і його майбутнього.

Важливе значення для гідроекології має вивчення основних понять про водні екосистеми, які наведені в розділі 2 **“Водне середовище як екологічна система”**. Викладена принципова схема трансформації речовини й енергії у водних екосистемах. Поняття про гідробіологічні процеси і стадії розвитку гідробіонтів.

У розділі 3 **“Абіотичні чинники водних екосистем”** описані фізичні, хімічні властивості води та їх екологічні аспекти. Прямі й посередні фактори формування хімічного складу природних вод. Формування хімічного складу вод шляхом розчинення й змішування вод різного походження. Хімічний склад вод різних генетичних категорій стоку. Радіологічне забруднення водоймищ внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС. Господарське освоєння водних ресурсів і антропогенне забруднення природних вод. Водні проблеми України й шляхи їхнього подолання.

**Розділ 4 “Енергозабезпеченість водних екосистем”** присвячений вивченню впливу сонячної енергії на гідроекологічні процеси у водних екосистемах. Сумарна залишкова енергія у водній масі водосховища. Фотосинтетична активна сонячна енергія (ФАР). Чинники поширення сонячної енергії у воді. Термічний режим водних екосистем. Поняття про термогідробіологічні періоди, характерні термічні періоди.

У розділі 5 **“Динаміка водних мас і її вплив на властивості водних екосистем”** вивчається перенесення водної маси. Види течій. Зовнішній і внутрішній водообмін. Проточність водоймищ і її екологічні аспекти.

У розділі 6 **“Біотичні чинники водних екосистем”** описані водні організми, їх види й взаємозв’язки. Передача речовин і енергії трофічними ланцюгами. Гідроекологічний цикл. Природні поживні цикли гідроекосистем. Цикли речовин. Основні закономірності кругообігів речовин у біосфері. Біогенна форма міграції хімічних речовин. Вплив випаровування, транспірації на механізм кругообігу води. Процес фотосинтезу і його основні фази.

У розділі 7 **“Вплив твердого стоку й донних відкладів на гідроекологічний стан річок і водоймищ”** вивчається роль твердого стоку в транспортуванні забруднювальних речовин із поверхні водозбору у водоймища. Донні відклади, вторинні джерела забруднення.

У розділі 8 **“Сумісний вплив гідрологічних, гідрохімічних і гідробіологічних чинників на біологічну продуктивність водних екосистем”** вивчаються зміни основних гідробіологічних факторів після створення водосховищ. Вплив регулювання стоку на біологічну продуктивність річки. Розрахунки первісної біологічної продукції. Методи розрахунків первісної біологічної продукції водних екосистем за гідрометеорологічними характеристиками. Взаємозв’язок між гідробіологічними та гідрологічними характеристиками водоймищ. Гідрологічні умови “цвітіння” води у водосховищах. Управління водними екосистемами шляхом зміни гідрологічного режиму водоймищ.

Таким чином, конспект лекцій містить передмову й 8 розділів. Усі розділи завершуються контрольними запитаннями.

В основу лекційного курсу покладені наукові видання з гідроекології та інших наук у кількості 17 посилань. Конспект лекцій повністю охоплює матеріал навчальної дисципліни.

Конспект лекцій розрахований на студентів, які на перших курсах університету засвоїли курси фізики, вищої математики, фізичної гідрографії, природничі дисципліни: метеорологію, гідрологію суші, гідронімію, гідробіологію й інші. Важливе значення в підготовці студентів має вивчення ними спецкурсів із річкової гідравліки, річкового стоку, гідродинаміки й інші, які передують навчанню студентів дисципліні «Гідроекологія».

# 1 ПРЕДМЕТ І ЗАДАЧІ ГІДРОЕКОЛОГІЇ

## 1.1 Поняття про гідроекологію

Дисципліна *гідроекологія* є частиною великої дисципліни - екології. Гідроекологія - це наука про екологію водного середовища. Вона вивчає взаємозв'язки між живими й неживими компонентами середовища - людиною, рослинним і тваринним світом, літосферою, гідросферою, атмосферою та іншими.

Велике значення гідроекології як науки перспективної по-справжньому стали розуміти тільки недавно. В останні сторіччя чисельність населення земної кулі зросла в такій пропорції, а потреби населення в їжі й сировині збільшилися настільки, що люди знищили лісові масиви й перетворили значні райони в оброблені сільськогосподарські площі, зарегулювали річковий стік. Це спричинило, зокрема, виснаження природних ресурсів і забруднення зовнішнього середовища відходами господарської діяльності.

Зі всіх природних об'єктів, які сприйняли всі ці нелади, першими, виявилися водні об'єкти й, одночасно - люди. Без води людині неможливо жити й вести господарство. Вода - найбільше благо, нічим не замінний вид природних ресурсів. Дійсно, якщо вугілля як енергетичний ресурс можна замінити нафтою, нафту - гідро або сонячною енергією, то воду нічим замінити. Людина не може існувати без постійного вживання води - її біологічно обґрунтована норма 3-3,5 літрів води на добу, а на гарячих виробництвах - до 10 літрів на добу. Для кожної людини, яка мешкає в цивілізованому місті, необхідно забезпечити понад 350 літрів води за добу для пиття, підготовки їжі, умивання, купання і інших санітарно - побутових потреб. Величезна кількість води потрібна для промислового виробництва й сільськогосподарського зрошення.

Для більшої зручності в споживанні води й економії виробничих витрат практично всі виробництва створюють свої технологічні схеми на постійний протягом року водозабір. Це вимагає регулювання природного режиму річок, який, як відомо, є нестійким і залежить від сезонного режиму надходження вод від опадів, танення снігу й інших факторів. Тому стік практично всіх наших річок зарегульований штучними водосховищами, які затопили великі площі земель і нерідко справляють несприятливу дію на оточуюче середовище.

## 1.2 Значення гідроекології для людського суспільства

Майже половина забраної річкової води повертається в річки й водоймища у вигляді скидів забруднених стічних і дренажних вод, а інша частина втрачається на випаровування. Це спричиняє погіршення екологічної ситуації, вимагає вживання невідкладних заходів щодо її оздоровлення. Так виникло багато водних проблем, яких не уникнула й наша країна.

Водні проблеми виникли в зв'язку з тим, що перетворення природи людина почала, не знаючи правил взаємовідносин із нею. Це призвело до важких і непоправних наслідків. Досить уявити собі, скільки життєво важливих проблем належить вирішити людству в майбутні десятиріччя! Щоб вирішити проблему треба знати як це зробити, тому саме гідроекологія дає змогу вирішувати водні проблеми.

Інтенсивний розвиток промисловості й посилення дії на річки, водоймища без вживання спеціальних водозахисних заходів призводить до зниження їх водності й біологічної продуктивності, не кажучи вже про погіршення якості природних вод. Причиною цього є споживче ставлення людини до природних вод (як до сировини) без врахування води як біологічного середовища. Тому в першу чергу суспільство намагалося задовольняти лише потреби різних галузей або об'єктів народного господарства зі споживчої точки зору, тобто скільки ми можемо взяти від річки води, одержати електроенергії, біопродукції й інше? До теперішнього часу ще не набули належного розвитку науки еколого - природоохоронного напрямку. Скільки можна взяти з річки води без збитку для її існування як повноцінного водного об'єкта? Скільки й де можна побудувати водосховищ на річці, який ступінь зарегулювання можна допустити? Скільки можна створити на водних об'єктах нових мілководних зон і т.д.? Існує багато таких питань, на які необхідно відповідати не тільки відносно русел річок, їх гирлових ділянок, але й водозбірних басейнів, а також озер, заплав.

Для правильної відповіді на ці запитання на думку гідроекологів необхідно розробити систему об'єктивного аналізу не тільки господарської діяльності людини, але й можливих змін і еволюційних процесів у гідросфері. При цьому абсолютно недостатньо вивчити водний баланс річки. Річка - це не тільки потік води в руслі з певною витратою води й швидкістю її течії. Це інтегруючий показник багатьох інших процесів, і не в останню чергу - це носій життя, обумовленого як фізико-географічними, так і хімічними, біологіч-



ними, антропогенними чинниками водозбору й русла. Розглянемо детально основи й зміст цього аналізу.

Усякий водозбір містить у товщах ґрунтів, на їх поверхні різні хімічні речовини, які розчиняються дощовими й талими водами, виносяться поверхневим стоком у водоймища - річки, озера, ставки, водосховища. Разом із поверхневими водами виносяться частинки ґрунтів (твердий стік), адсорбовані ними хімічні речовини, наприклад, залишки агрохімікатів, а також речовини від різних джерел забруднення, які осіли з повітряних потоків.

Більшість речовин виносяться поверхневим стоком разом із біогенними речовинами, що містять сполуки азоту – це, звичайно, добрива, які вносяться в ґрунти для кращого проростання й підвищення врожайності сільськогосподарських культур. Вони потрапляють у річкову або озерну воду, у ставки, водосховища – середовище, заселене численними рослинними й тваринними організмами, які здатні перетворювати одні види речовини на інші. Завдяки цьому в кожній річці, озері, водосховищі, тобто в кожній водній екосистемі, відбуваються фізичні, хімічні, біологічні, біофізичні, фізико-хімічні процеси, здатні настільки змінювати якість і навіть властивості вод у водоймищах, що останні перестають задовольняти водокористувача.

У зв'язку із цим можна навести приклади бурхливого зростання синьо-зелених водоростей, які інтенсивно розвиваються у водоймищах і річках країни протягом останніх десятиліть. Синьо-зелені водорості - бич водоймищ. Ними уражені Дніпровські водосховища й багато інших водоймищ України. Водорості здатні виділяти токсини дна, пригніблюють розвиток тварин і рослин і навіть призводять до їхньої загибелі. Від цього страждає населення, яке проживає по берегах річок і водоймищ. Це пов'язано із гниттям водоростей і розповсюдженням неприємного запаху (наприклад, озеро Сасик на півдні Одеської області після його «опріснення»).

Синьо-зелені водорості сприяють порушенню технічних умов, необхідних для проведення меліоративних робіт при зрошуванні земель дощуванням, ними забиваються фільтри водозаборів і системи дощувальних машин.

У доповідях наукової конференції "Проблеми збереження біорізноманітності Середнього й Нижнього Дністра" (м. Кишинів, 1998 р.) наведена важлива інформація про зміну флори й фауни Дністра в результаті впливу Нижньо-Дністровського водосховища. Серйозно поставлено питання про необхідність забезпечити виживання природних екосистем Нижнього Дністра, які впливають на агроєкосистеми, допомагаючи зберегти стійкість землеробства.

На думку доповідачів конференції гідровузол негативно вплинув на екологічний стан нижньої течії Дністра й прилеглих ділянок. Це пов'язано в першу чергу з дією холодних мас попусків (зниження температури води,

що випускається через турбіни з водосховища, на 3-8 градусів нижче за середньомісячну за даними минулих років), збільшенням прозорості води, від чого почали інтенсивно розвиватися токсичні ниткові водорості, біологічно збагатило середовище гідробіонтів. Посилений розвиток водоростей призводить до замулення річок. Таким чином, зміни гідрологічного режиму Дністра в цьому місці створили процес фізичного забруднення вод.

Значних збитків зазнало рибне господарство. Через зниження температури води в річці змінилися терміни нересту риби. Загальний скат памолоді в 1996 році скоротився в 30 разів у порівнянні із середнім за період 1980-1987 років. Погіршали рекреаційні властивості регіону - температура води в річці нижче водосховища знизилася на 8 градусів.

Таким чином, погіршення незаселеного людиною середовища під впливом зміни гідрологічного режиму Дністра нижче Нижньо-Дністровської ГЕС стало очевидним.

Нарешті можна відзначити, що стан річок (особливо малих) однозначно погіршився за останні десятиліття. Під впливом надмірного потрапляння біогенних речовин у річки, водоймища заплавна рослинність одержує істотне додаткове живлення. Це сприяє бурхливому розвитку деяких видів рослинності на заплаві й у руслах річок. Чагарники очерету тепер займають не лише берегову частину русла, але й повністю живий переріз малих річок. Зараз часто важко виявити місцезнаходження річки та провести там усі необхідні вимірювальні роботи.

Таким чином, гідроекологічні дослідження мають важливе значення для збереження водних об'єктів і якості їхніх вод у такому стані, який забезпечує людині сприятливе для її мешкання й збереження здоров'я середовище. Вони допомагають людському суспільству вибрати правильний шлях використання вод, що не порушує співвідношень, які склалися у водних екосистемах між окремими компонентами водного середовища. Екологія та її розділ гідроекологія - науки майбутнього, тому, можливо, саме існування людини на нашій планеті залежатиме від їх прогресу.

### **1.3 Завдання гідроекології, її зв'язок з іншими науками**

Основним завданням гідроекології є ув'язка й узагальнення даних гідрологічних, гідробіологічних, гідрохімічних досліджень із метою розробки методів визначення й прогнозування можливих змін кількісних і якісних характеристик водоймищ та водотоків, знаходження шляхів найбільш раціонального й доцільного використання водних ресурсів. Будучи тісно пов'язаною в першу чергу з гідрологією, гідроекологія поступово узяла на себе частину її завдань. Для забезпечення промисловості, що розвивається, енерге-

тики, народногосподарського водокористування гідрологічна наука розробила методи дослідження річкового стоку та його фізико-географічних чинників, термічного режиму річок, твердого стоку, донних відкладів, фізичних, хімічних, біологічних компонентів водного стоку.

На сучасному етапі окрім перерахованих вище завдань додатково включаються такі: забезпечення людства водою - не тільки в певних кількостях і необхідної якості, але й із необхідною біологічною продуктивністю. Це зажадало вивчення питань з оптимальних умов функціонування водоймищ або річок і встановлення допустимих критеріїв дії людини на водні об'єкти, водозбори річок. Так виникла необхідність нормувати об'єми промислових і побутових скидів у річки й озера, встановлювати допустимі концентрації скидів забруднювальних речовин. Це потребувало детального вивчення фізико-хімічних та екологічних чинників. У сучасний період необхідним є вивчення водоймищ і водотоків як компонентів біосфери або окремої екосистеми. Виникла необхідність розвитку досліджень екологічних взаємозв'язків гідрологічних та екологічних характеристик, явищ, процесів. Це ж зумовило появу нової науки - гідроекології, яка має на меті наступне:

- знаходження шляхів узгодженої взаємодії між людською діяльністю на водні об'єкти й законами їхнього функціонування;
- встановлення взаємозв'язку між гідрологічними, гідробіологічними й гідрохімічними чинниками з метою направленої дії на функціонування екосистем, водоймищ, водотоків.

Перераховані вище цілі досягаються шляхом виконання наступних завдань гідроекології:

1. Розробка наукових основ природокористування з урахуванням збереження й відновлення водних ресурсів необхідної якості та біологічної продуктивності.
2. Забезпечення необхідних людині екологічних умов у басейнах річок та озер.
3. Розробка критеріїв і норм допустимого антропогенного навантаження на водоймища й водотоки, а також на їхні водозбори.
4. Розробка математичних моделей водних екосистем з урахуванням впливу на них антропогенного чинника для розрахунку й прогнозу необхідних гідролого-екологічних характеристик річок і водоймищ.
5. Запобігання можливим негативним наслідкам антропогенної дії на водні об'єкти та їхні водозбори й інше.

У нашій країні гідроекологічні дослідження почали розвиватися в 70-х роках. У цей час вони ведуться у всіх наукових, навчальних, науково-виробничих установах, які займаються дослідженнями вод та їх використан-

ням. Вирішуються загальні проблеми гідро-біохімічного значення, які замінили вузько гідрологічні, хімічні або біологічні питання.

На жаль, багато положень цієї нової науки ще не сформульовані чітко. Ще не досягнута організованість у проведенні досліджень, немає ще ув'язки проблематики науки й господарської діяльності об'єктів вивчення.

Сьогодні гідроекологічні дослідження вимагають додаткового вивчення гідробіологічних, гідрохімічних і великого числа гідрологічних чинників.

Вивченням фізичних, хімічних, біологічних процесів, що відбуваються в річках, озерах, болотах, до теперішнього часу займалися окремо такі науки як метеорологія й гідрологія, які вивчають фізичні явища та процеси в атмосфері й водних об'єктах. Гідробіологія вивчає біологічні процеси, гідрохімія - хімічні процеси. Кожна із цих наук самостійно розвивалися й досягли значних результатів.

У сучасний період якість вод суші, відтворення водних ресурсів і їх біологічна продуктивність під впливом господарської діяльності людини настільки погіршали, що це зумовило необхідність комплексного використання водоймищ і водотоків. До них необхідно ставитись як до компонентів біосфери, яка повинна забезпечити людину необхідною кількістю води з належною якістю й біологічною продуктивністю, при цьому необхідно звести до мінімуму негативні наслідки дії людини на річки, озера, болота.

Таке комплексне й всебічне вивчення водних об'єктів з урахуванням узгодженої із природою дії людини на водоймища й водотоки покликана виконати гідроекологія. У сучасній екології водних систем тісно переплелися метеорологія, гідрологія, гідробіологія, гідрохімія, географія, геоморфологія, математика й інші науки.

## Питання для самоперевірки

1. Гідроекологія як розділ екології.
2. Значення гідроекології для вирішення водних проблем країни.
3. Задачі гідроекології. Її зв'язок з іншими науками.

## 2 ВОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ЯК ЕКОЛОГІЧНА СИСТЕМА

### 2.1 Поняття про водну екосистему

Живі організми (біота) і їх неживе (абіотичне) оточення, тобто незаселене середовище, нерозривно пов'язані один з одним і знаходяться в постійній взаємодії, спільно утворюючи екологічну систему (екосистему).

Численними авторами пропонувалися різні поняття про екосистему. Найбільш сталим і типовим слід uważати таке визначення:

Екосистема - єдиний природний комплекс, створений живою біотою й середовищем, у якому вона існує, і де всі компоненти тісно пов'язані обміном речовин, енергією, інформацією.

Гідроекологія вивчає водні екосистеми (гідроекосистеми) - озерні, річкові, водосховищ і ставків, тобто - прісноводні екосистеми. Надалі ми будемо вивчати екосистеми водосховищ, озер, річок, гирлових областей річок і лиманів.

Розглянемо декілька прикладів екосистем, наприклад, ставок і водозбірний басейн. Як тільки ми візьмемо пробу води зі ставка, у першу чергу, стає очевидним невіддільність живих організмів від їхнього неживого середовища. Рослини, тварини, мікроорганізми не тільки живуть у ставку й на лузі, але й змінюють хімічний склад води, ґрунту й повітря, які, власне, і складають фізичне середовище. Так, ємність зі ставковою водою, проба донного мулу або лугового ґрунту містять суміш живих організмів (рослин і тварин), органічних і неорганічних компонентів. Деякі крупніші тварини й рослини можуть бути виділені із проби для вивчення, підрахунку, але міріади дрібних живих істот важко повністю відокремити від їхнього неживого середовища так, щоб не змінилися його властивості. Звичайно, можна обробити пробу води, донного мулу або ґрунту в автоклаві, після чого залишаться тільки неживі компоненти, але цей залишок уже не можна назвати ставковою водою або ґрунтом. Це буде речовина із зовсім іншим зовнішнім виглядом і властивостями.

Біологічні компоненти ставка здаються автономними, проте насправді це в дуже великому ступені відкрита система, яка входить складовою частиною в крупнішу систему водозбірного басейну. Функціонування й відносна стабільність екосистеми ставка значною мірою визначаються швидкістю припливу й відтоку води, речовин, організмів із різних частин водозбірного басейну. У невеликому водоймищі, де винесення води обмежене, нерідко накопичуються речовини. Якщо, наприклад, органічні речовини побутових або промислових стічних вод не асимілюються, то їхнє швидке накопичення може загубити систему. Ерозія ґрунту й втрата біогенних елементів із поруше-

ного лісу або з неправильно оброблюваного поля, що вдобрюється, не тільки обідняє ці екосистеми, але часто викликає евтрофікацію або інші неприємні наслідки в екосистемах «нижче за течією». Отже, враховуючи інтереси людини, мінімальною одиницею екосистеми слід уважати не одне водоймище або клаптик землі, покритий рослинністю, а весь водозбірний басейн. Така одиниця як об'єкт регулювання людиною повинна включати на кожен квадратний метр водної поверхні щонайменше в 20 разів більшу поверхню суші водозбірного басейну. Іншими словами, поля, ліси, водоймища й міста, зв'язані між собою річкою або системою річок (або іноді мережею підземних вод), взаємодіючи, утворюють одиницю екосистемного рівня.

Концепція водозбірного басейну допомагає правильно сформулювати багато проблем і конфліктів, які чекають нас у майбутньому. Наприклад, причини забруднення вод і способи боротьби з ними не вдається виявити, якщо вивчати тільки воду; наші водні ресурси страждають, звичайно, через погане господарювання на всій площі водозбірного басейну, який і повинен розглядатися як керована одиниця.

## **2.2 Види водних екосистем**

Французький еколог Філіп Дрьо вважає, що прісноводні екосистеми не містять багато видів. У порівнянні з морем у них входить значно менше ніж у морській екосистемі, число систематичних груп біоти. Філіп Дрьо виділяє всього 2 групи - стоячі води й текучі води, які значно відрізняються формацією живих організмів. Стоячі води представлені екосистемами боліт, ставків, озер. Прикладом екосистем типу «стоячі води» може служити вже відмічена раніше система озера зі всіма її структурними особливостями.

Екосистеми текучих вод - джерела, потоки. Залежно від властивостей цих систем, характеристик температури води, кисню, розподілу їжі, вони заселені групою флори й фауни, що відповідає їм. Естуарії - області, які створюють перехід річки до моря.

Цей поділ на види водних екосистем, виконаний Дрьо, дуже спрощений. Однією з найважливіших властивостей екосистем є не тільки наявність чітких меж розташування водних систем, але й заселення їх такими видами флори й фауни, які не здатні жити на сусідній суші. Рідко буває так, щоб між водною системою й тим, що оточує її, або іншою водною системою, не було ніякого зв'язку й обміну. Крім того, навіть в одній екосистемі можливо виділити достатнє число місць проживання, що розрізняються між собою, мають дещо різне населення. Таку екосистему можна умовно представити як сукупність окремих екосистем. Процеси, що відбуваються в кожному із цих місць проживання - побудова трофічних ланцюгів, потік матерії й енергії, а також ха-

рактар абіотичних процесів, може настільки відрізнятися для різних місць проживання, що одна велика екосистема може виявитися недостатньо сталою й розпадеться на декілька самостійних систем.

Прикладом викладеного може служити водна система крупної річки. Вона включає у свій склад систему наповнених текучою водою русел, заплавлених озер, з якими річка пов'язана протоками, водосховищами, і проточних озер, через які протікають річкові води, гирлові ділянки річок при впаданні їх у водоприймачі й т.п.

Кожний із перерахованих вище об'єктів має свої індивідуальні структурно функціональні особливості взаємостосунків між абіотичними компонентами водних екосистем та їх біотикою. Тому виділення видів екосистем у гідроекології слід проводити з погляду однорідності головних гідрологічних чинників, що визначають структурно-функціональні особливості конкретних водних екосистем.

Проводячи еколого-гідрологічні дослідження водоймищ різних регіонів України, В.М. Тимченко виділяє характерні групи водних об'єктів, що відрізняються за гідрологічним режимом, морфометрією, положенням в мережі, гідрографією, інтенсивністю й структурою господарського використання, за антропогенним навантаженням, іншими абіотичними показниками. Це крупні рівнинні водосховища, озера Полісся, заплавні водоймища крупних енергетичних комплексів, малі водосховища й ставки, крупні річки та їхні гирлові ділянки, малі річки, канали й інше.

Для виділення діючих зв'язків і чинників взаємодії між окремими елементами гідроекосистеми розглянемо принципову схему функціонування екосистеми водоймища.

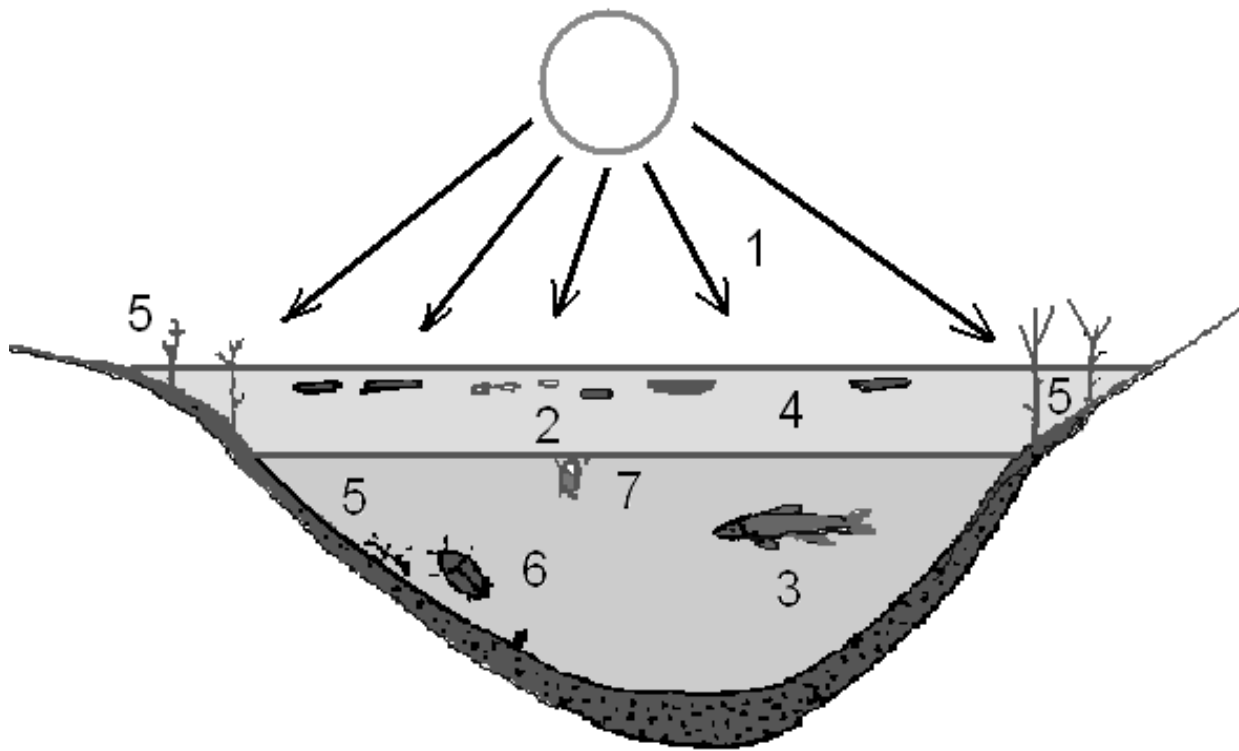
### **2.3 Принципова схема функціонування водної екосистеми**

На рисунку 2.1 показана схема будови гідроекосистеми на прикладі водоймища з виділенням окремих її елементів для аналізу зв'язків між ними й виділенням головних чинників функціонування екосистеми..

Сонячна енергія (1) проникає в деякий шар водної товщі (2) і, впливаючи на певні абіотичні речовини, викликає до дії складні біохімічні процеси, що приводять до утворення первинної біологічної продукції - це маса мікроскопічних водоростей (діатомові, зелені і т.п.), а також продукцію вищих водних рослин (очерети та ін.) - (5).

Уся ця маса речовин, головним чином, мікроскопічні водорості фітопланктон (від грецького *phiton* - рослина й *plankton* - блукаючий), складає основну частину розрахункової маси водоймища. Вони називаються первинними продуцентами (4) (від латинського *producens* - що створює). Зі всього на-

селення водоймищ тільки вони під впливом сонячної енергії створюють органічну речовину за рахунок неорганічної, присутньої у водоймищі у формі розчинених у воді хімічних сполук (біогенні речовини). Фітопланктон (4) і вищі водні рослини (5) є їжею для дрібних водних організмів (зоопланктону) (6 і 7) і деяких риб. Усі вони складають первинний консумент (від латинського слова *consumo* - споживаю).



(позначення описані в тексті)

Рис.2.1 Принципова схема функціонування екосистеми водоймища.

У свою чергу первинний консумент служить їжею для крупніших тварин - це вже вторинний консумент (6, 7). Усі вони, відмираючи або гинучи, стають здобиччю бактерій, які розкладають їх до мінеральних складових, що знов використовуються для утворення первинної продукції або відкладаються на дно водоймища (3).

Ця схема екосистеми водоймища свідчить про наявність дуже складного ланцюга взаємозв'язаних явищ і процесів. Особливо слід звернути увагу на трансформацію речовини у водоймищі. Частина органічних і міне-



ральних речовин під впливом сонячної енергії бере участь у своєрідному кругообігу:

*сонячна енергія + абіотичні чинники (мінеральні речовини) → первинна біологічна продукція й консументи → бактерійне розкладання відмерлої продукції й консументів → мінеральні речовини.*

На основі вищевикладеного можна судити про те, що функціонування екосистем здійснюється під впливом груп чинників - абіотичних і біотичних. До них слід додати форми всюдисущого впливу людини на водні екосистеми, об'єднані поняттям антропогенні чинники.

Абіотичні чинники - це чинники неживої природи, перш за все кліматичні: сонячне світло, температура, вологість, рН, солоність, швидкість течії, концентрація забруднювальних речовин. Сюди ж деякі дослідники відносять і такі чинники, як рельєф, напрям вітрів, властивості ґрунтів, мінеральних солей, осадових порід. Усі абіотичні чинники діють на організм прямо або побічно.

Біотичні чинники - це всілякі форми впливу живих організмів один на одного (наприклад, запилення рослин комахами, конкуренція, поїдання один одного - паразитизм) і на середовище.

Антропогенні чинники - це ті форми діяльності людини, які впливають на природне середовище, змінюючи умови існування живих організмів або безпосередньо впливаючи на окремі види рослин і тварин.

Розглянемо окремо ці види чинників з урахуванням їх впливу на функціонування водних екосистем.

#### Питання для самоперевірки.

1. Поняття про водну екосистему.
2. Види водних екосистем.
3. Схема функціонування водної екосистеми.
4. Основні групи чинників функціонування водних екосистем.
5. Кругообіг органічних і мінеральних речовин у водній екосистемі.

## 3 АБІОТИЧНІ ЧИННИКИ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

### 3.1 Фізичні й хімічні властивості води та їх екологічні аспекти

Основними абіотичними компонентами водних екосистем є неорганічні й органічні сполуки, а також і окремі елементи, наприклад, вода, двоокис вуглецю, кисень, солі кальцію, азоту, сірки, фосфору, амінокислоти, гумінові кислоти та інші. Невелика частина життєво важливих елементів живлення знаходиться в розчині й безпосередньо доступна організмам, але значна їх кількість міститься у вигляді нерозчинених частинок речовини, а також у самих організмах. Іншими словами, ставок або озеро - це не водна маса, що містить елементи живлення, як можна було б думати, а рівноважна система з води й твердої фази, причому, за звичайних умов майже всі елементи живлення знаходяться у твердій фазі. Так, у комплексі ґрунт – вода – біомаса, що існує в наземній екосистемі в лісі, може знаходитися азоту приблизно 90% в органічній речовині ґрунту, 9,5 % - у біомасі (деревина, коріння, листя) і лише близько 0,5 % - у розчиненій формі в ґрунтовій воді.

Швидкість вивільнення елементів живлення в розчин, надходження сонячної енергії, а також температурний цикл, довгота дня й інші кліматичні умови - такі найважливіші змінні, щодня регулюють інтенсивність функціонування всієї екосистеми.

Щоб повністю вивчити хімію середовища, необхідно провести докладний лабораторний аналіз проб, але достатньо багато інформації можна одержати шляхом простого вимірювання за допомогою широко поширених приладів для аналізу води й ґрунту.

Води прісноводних екосистем складають незначну частину глобальних водних запасів - усього 3,5% (від загальних запасів вод, та й то 86% прісних вод утримується в льодовиках). Континентальні води в основному прісні. Їхня солоність не перевищує 1-2 г солей на 1 л води. Прісні води містяться у водоймищах - річках, озерах, водосховищах, підземних водах. У річки із суші стікає менше половини тієї кількості води, яка випадає на сушу у вигляді дощу й снігу. Загальний річковий стік, сформований на території України, складає 49,4 км<sup>3</sup> в рік. Трансграничний стік, що поступає ззовні (р. Дунай, Верхній Дніпро та інші) доповнює водні ресурси країни до 87 км<sup>3</sup>.

До фізичних чинників водних екосистем відносять багато з тих, що мають екологічне значення, впливають на властивості води. Не дивлячись на те, що рух води описується за такими ж гідравлічними законами, як і інші рідини, вода має специфічну, дуже високу теплоємність в порівнянні з іншими рідинами. Теплоємність води в 3300 разів вище за теплоємність повітря - це робить поверхневі води головним збирачем і розповсюджувачем сонячної енер-

гії. По відношенню до температури повітря величезні маси води, особливо океанів, відіграють важливу теплорегулюючу роль. Спільно з атмосферою вони утворюють високе стабільне середовище, яке дуже поволі й поступово змінює свою температуру, що впливає на температуру повітряних мас.

Інша важлива властивість - лід легше за саму воду і утворюється на поверхні водоймища. Шар льоду, таким чином, ізолює від атмосфери товщу води, у якій продовжується життя. Одна з особливостей води - її температура замерзання ( $0^{\circ}\text{C}$ ) - нижче за температуру максимальної густини ( $4^{\circ}\text{C}$ ). Це сприяє обміну води між її шарами після розкриття від льоду озера або водоймища.

В'язкість води з пониженням температури дещо знижується, але дуже мало. Це робить зміну температури води маловпливовою на падіння суспензій із води на дно. В'язкість води значно вище в'язкості нафти, а питома вага води більша, ніж нафти - це буквально рятує водоймища від деградації в разі попадання нафтопродуктів, синтетичних поверхнево - активних речовин у водоймища. Нафта, потрапляючи у водоймище, розтікається по його поверхні (маючи знижену в порівнянні з водою в'язкість) якнайтоншою плівкою - її можна зібрати, що й робиться на практиці при її розливі. Інакше нафта покрила б дно й згубила життя у водоймищі.

Глибина проникнення сонячної енергії (випромінювання) під рівень води залежить від солоності води й довжини хвиль випромінювання. Характерна для прісних вод глибина проникнення сонячної радіації видимого діапазону спектру випромінювання залежить від висоти сонця й прозорості води. Наприклад, для Дніпровських водосховищ глибина проникнення сонячних променів - від 2 м у середині дня до 20 см у кінці дня.

Надходження тепла від сонячного випромінювання викликає активізацію біологічного життя у водоймищі, виробництво його біологічної продукції. Той факт, що глибина проникнення випромінювання залежить від прозорості води, а остання залежить від швидкості течії (зменшується при збільшенні швидкості, що приводить до підвищення мутності води), свідчить про вплив гідрологічних чинників на біологічну продуктивність річкових вод.

Деякі фізичні властивості води значно впливають на вміст у воді тих або інших хімічних елементів. У природних умовах вода ніколи не зустрічається в хімічно чистому стані. Здатність води розчиняти різні речовини, з якими вона стикається, є однією з найважливіших її властивостей, які визначають особливу роль води в перетворенні зовнішності Землі й існуванні життя на Землі. Природна вода являє собою розчин, часто дуже складного складу, який до того ж схильний до значних змін. Усіма питаннями вивчення режиму розчинених речовин у воді й формування її хімічного складу займається наука гідрохімія.

Розглянемо питання про окремі хімічні елементи і їхні сполуки, що надійшли у воду і відіграли важливу роль у функціонуванні водних екосистем, і в першу чергу - прісноводних.

Розчинність кисню у воді, як і будь-якого іншого газу, підпорядковується закону Генрі: вона обернено пропорційна температурі й припиняється після досягнення точки кипіння. У прісних водах при 0°C міститься 10,2 см<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, а при 30°C всього 5,5 см<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Таким чином, у водах південних водоймищ при нагріванні води до 30°C міститься кисню майже в 2 рази менше, ніж у холодних північних морях, і його може не вистачати для дихання водних тварин. Тому, форель, маючи потребу у великій кількості кисню, може жити тільки в холодних водах (гірські річки), а короп, задовольняючись для дихання всього лише 1 см<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, чудово відчуває себе в теплих водоймищах. Із цієї ж причини в полярних морях спостерігається більше планктону, а тому більше риб і птахів.

Вуглекислий газ, добре розчиняється у воді з атмосфери й часто з'єднується з іонами інших речовин (наприклад, лужними), утворюючи карбонати. Розчинений у воді вуглекислий газ уживається планктонними водоростями та іншими водними рослинами у процесі фотосинтезу. Решта газів, окрім азоту, міститься у воді в невеликих концентраціях.

У водах, багатих органічними залишками, скупчується сірководень, що має токсичні властивості. Так глибинні води Чорного моря заражені цим газом і абсолютно позбавлені життя.

У річковій воді більше карбонатів, а в морській - хлоридів. Їх використовують живі істоти, що мешкають у воді, для побудови своїх раковин і скелетів.

У воді міститься значна кількість розчиненої органіки (органічного вуглецю в них близько 50%), азоту, фосфору. Основними розчиненими органічними речовинами є вуглеводи, пігменти, амінокислоти, білки, ферменти. Вони складають так званий «водний гумус» (близько 90%), який утворюється в основному при розкладанні органічних залишків. Водний гумус є найважливішим видом живлення для планктону й інших рослинних організмів.

Слід зазначити, що різні завислі речовини розмірами від 0.01 мкм до 1 мм, які потрапили у воду, здатні змінювати хімічний склад ділянок водоймищ, оскільки суспензія збирає на своїй поверхні (завдяки властивостям абсорбції) багато різних елементів - як мінеральних, так і органічних.

У процесі техногенезу сильно зросло надходження в екосистеми забруднювальних речовин, які утворюють хімічне, бактерійне, радіоактивне й теплове забруднення поверхневих вод. Стічні води сучасних хімічних виробництв (підприємств нафтохімії, пластмас, штучного волокна, целюлози, міне-

ральних добрив, сірчаної кислоти, соди та ін.) містять органічні й неорганічні сполуки.

Відведення термальних вод енергосистем дає різницю температури в окремих водоймищах до 20-30°C, що зменшує вміст кисню, стимулює розвиток шкідливих водоростей.

Побутові стічні води, відходи медичних установ, наукових лабораторій є джерелами бактерійного забруднення. Найбільшими джерелами забруднення водних екосистем є нафтопродукти, пестициди, синтетичні поверхнево-активні речовини, феноли.

Таким чином, у результаті надходження у водні екосистеми значної кількості хімічних речовин, хімічний склад природних вод різко змінився. Тут доречно вказати, що в такому разі порушується так званий закон мінімуму, одержаний уперше Лібіхом. Згідно з цим законом для життя й процвітання рослин в екосистемі необхідна наявність певної сукупності умов і складу хімічних речовин. Лібіх на прикладі вирощування рослин у синтетичних середовищах із заміною певного набору хімічних елементів іншими довів, що одні елементи не можуть бути замінені - тільки повний набір потрібних для рослин хімічних речовин повинен бути присутнім у живильному середовищі. Якщо хоч один з елементів цього набору буде відсутній, то зростання рослин обмежуватиметься.

Обмеження розвитку біоти у водній екосистемі також спостерігається, якщо у водному середовищі з'являються хімічні елементи, які сприяють зниженню активності фотосинтезу. Саме така ситуація була виявлена після вивчення наслідків широкого застосування пестицидів - хімічної речовини з токсичними властивостями. Цілий ряд років воно широко застосовувалося в сільському господарстві, а також для боротьби зі шкідливими комарами на болотах, озерах, заплавах, поки не виявили, що рослини й тварини накопичують ці речовини у своїй масі, але в них стала знижуватися на 50% інтенсивність фотосинтезу.

Вище дано короткий виклад фізичних і хімічних чинників водних екосистем, їхній вплив на протікання гідроекологічних процесів у водному середовищі.

Зміна хімічного складу вод може значно вплинути на процес розчинення речовини у воді та її накопичення, перетворення в інші види й т.п. Розглянемо детальніше питання формування хімічного складу вод природних річок і головні чинники цього процесу.

### 3.2 Чинники формування хімічного складу природних вод

У своєму природному стані вода на Землі представляє достатньо складний розчин різних мінеральних і органічних речовин, які називають чистою водою на відміну від хімічно чистої речовини  $\text{H}_2\text{O}$ .

З гідрохімії відомо, що в хімічному складі природних вод виділяють наступні групи іонів і катіонів.

Головні іони, що визначають в основному величину мінералізації води:

| Аніони:                            | Катіони:                   |
|------------------------------------|----------------------------|
| $\text{Cl}^-$ - хлоридні           | $\text{Na}^+$ - натрію     |
| $\text{SO}_4^{2-}$ - сульфатні     | $\text{K}^+$ - калія       |
| $\text{HCO}_3^-$ - гідрокарбонатні | $\text{Mg}^{2+}$ - магнію  |
| $\text{CO}_3^{2-}$ - карбонатні    | $\text{Ca}^{2+}$ - кальцію |

Біогенні речовини беруть активну участь у життєдіяльності водних організмів: нітрати ( $\text{NO}_3^-$ ), нітрит ( $\text{NO}_2^-$ ), амоній ( $\text{NH}_4^+$ ), фосфорна кислота ( $\text{HPO}_4^-$ ), кремній ( $\text{SiO}_3^{2-}$ ) і інші.

Органічні речовини - розчинені (істинні або колоїдні розчини), загальний вміст яких визначається по органічному вуглецю або по непрямим характеристиках: кольоровості й окисленню (біохроматне й перманентне). Це результат посмертних або прижиттєвих виділень гідробіонтів і ін. Змив органічних частинок стоком із поверхні суші й ґрунту.

Розчинені гази (кисень, вуглекислий газ, сірководень і ін.)

Іони водню, концентрація яких визначається через показник  $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$ , визначає киснево-лужна рівновага водних розчинів.

Мікроелементи - містяться в природних водах у дуже малих концентраціях - мікрограмах на літр. Розрізняють їх підгрупи:

Типові катіони ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Pb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Be}^+$ ,  $\text{Sr}^+$ ,  $\text{Ba}^+$ , і ін.)

Алефтерні комплексоутворювачі ( $\text{Cr}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Mn}$ )

Типові аніони ( $\text{Br}$ ,  $\text{I}$ ,  $\text{Fr}$ ,  $\text{Br}$ )

Радіоактивні елементи.

Оцінка хімічного складу природних вод встановлюється за рядом характеристик, з яких у гідрохімії відомі:

жорсткість (за солями лужноземельних металів)

лужність (за аніонами слабких кислот)

агресивність (властивість руйнувати метали, бетон, вапняні матеріали).

Є ряд додаткових показників властивості природних вод - показник біохімічного споживання кисню - БСК ( $\text{мг O}_2/\text{дм}^3$ ). Він указує на кількість кисню у воді, яка витрачається на окислення органічних речовин, що містяться в ній, - нестійких, легкозасвоюваних. Повне споживання кисню на біохімічне

окислення БСК<sub>п</sub> визначити важко через тривалість цього процесу (більше 20 діб). Тому в лабораторії визначають це споживання за 5-добовий період інкубації проб води й встановлюють БСК<sub>5</sub>. А потім розрахунковим шляхом, уводячи експериментальний поправочний множник, обчислюють  $\text{БСК}_п = (1,4 \div 1,6) \times \text{БСК}_5$ .

Природні води містять у своєму складі окрім перерахованих вище форм забруднювальні речовини: нафтопродукти, феноли, синтетичні поверхнево-активні речовини, пестициди й інші техногенні відходи різних галузей промисловості. Про них ітиметься далі.

Розглянемо сукупність процесів, що приводять до утворення того або іншого складу розчинених у природній воді мінеральних, органічних речовин. Чинники, які визначають склад природних вод, поділяються на прямі, що безпосередньо діють на воду (доставляють розчинені речовини) і непрямі, такі, що визначають взаємодію води з речовинами (комплекс фізико-географічних умов - ґрунтових, кліматичних, геоморфологічних, гідравлічних і інших).

#### **Прямі чинники:**

а) Гірські породи й мінерали є першоджерелом складу природних вод. У результаті процесів хімічного вивітрювання (вимивання) водою останні збагачуються солями.

б) Ґрунтовий покрив збагачує водні розчини, що фільтруються крізь нього, мінеральними й органічними компонентами, які утворюються в ґрунті в результаті життєдіяльності рослинних і тваринних організмів. Винесення цих речовин із ґрунтів водою залежить від типу ґрунтів і ступеня їхнього зволоження. Чорноземи, каштанові ґрунти й особливо солончакові ґрунти істотно підвищують мінералізацію води, що фільтрується. У процесі просочування води крізь ґрунт її хімічний склад змінюється також під впливом обмінних реакцій між іонами води й іонами ґрунтового поглинаючого комплексу (ПК). ПК - це негативно заряджені колоїдні частинки в ґрунті, які здатні поглинути із ґрунтового розчину катіони, або ж віддати частину з них у розчин для досягнення рівноваги.

в) Біологічний чинник діє на хімічний склад води через життєдіяльність рослинних і тваринних організмів. Наприклад, фотосинтетична діяльність рослин збагачує воду органічною речовиною (первинна продукція), киснем (при цьому зменшується CO<sub>2</sub> у воді). Мікроорганізми розкладають органічні сполуки аж до простих мінеральних речовин (Ca, CH<sub>4</sub> і ін.) і відіграють велику роль при відновленні багатьох хімічних елементів.

г) До прямих чинників також відноситься господарська діяльність людини, що створює технічні потоки міграції багатьох хімічних елементів. Детально цей процес буде розглянуто далі.

### **Непрямі чинники:**

Непрямі чинники визначають інтенсивність дії на природні води перерахованих вище прямих чинників. Це - клімат, рельєф, водний режим. Вони визначають умови середовища, у якому формується її хімічний склад. Клімат визначає загальний фон розподілу вологи й тепла, який впливає на протікання гідрохімічних процесів. Рельєф визначає особливості стікання атмосферних вод, їх швидкості, ерозійні дії на ґрунти - усе це впливає на утворення сольового складу. Водний режим визначає міграцію хімічних елементів, процеси змішення й розчинення генетично різних водних мас.

У загальному процесі формування річкових вод П.П. Воронков розрізняє два основні напрями:

а) формування хімічного складу вод шляхом розчинення водою гірських порід, ґрунтів і мінералів, газів атмосфери та ін.;

б) шляхом змішування вод різного генезису, де вони раніше сформували хімічний склад своїх вод.

Для аналізу П.П. Воронков виділяє води місцевого стоку, які формуються на дрібних водозборах. Хімічний склад цих вод, що стікають зі схилів і витікають із верхнього шару ґрунтів, сформований шляхом розчинення мінеральних і органічних речовин. Для великих і середніх річок переважаючим процесом формування хімічного складу є процес змішування.

У міру стікання вод по водозбору й переходу її зі схилів у русла змінюється характер живлення водотоків - до них починають надходити ґрунтові води із глибших шарів, це змінює їх хімічний склад. П.П. Воронков запропонував досліджувати характер і тип формування водного живлення річок за зміною хімічного складу її вод.

Вивчивши відповідність хімічного складу й водного режиму річок, П.П. Воронков запропонував наступні генетичні категорії стоку води:

поверхнево-схилове стікання - по поверхні схилу в мікрострумках;  
ґрунтово-поверхневе - ґрунтове стікання по схилу із дренаванням вод із ґрунтового шару на глибині ерозійного врізу мікрострумків;  
ґрунтовий стік (верховодка) - стік із ґрунтової товщі, з тимчасових водних горизонтів (сюди ж відносяться води так званого «берегового регулювання»);

ґрунтові - води складаються з останніх водних горизонтів, що живлять річки.

На думку П.П. Воронкова всі ці 4 види стоку можна виділити на гідрографі, виходячи з хімічного складу вод у різні періоди, коли через створ проходить вода різного походження. Перераховані вище генетичні категорії стоку можна виділити на гідрографі (рис.3.1), враховуючи часові коливання концентрації речовин для різних фаз стоку. Ґрунтовий стік спостерігається про-



тягом усього року - загальна мінералізація досягає  $100 \text{ мг/дм}^3$  при добре вираженому переважанні іонів  $\text{HCO}_3^-$  і  $\text{Ca}^{2+}$ .

Після надходження в річку талих вод і їхнього змішування з водами ґрунтового стоку мінералізація вод загального стоку зменшується. При завершенні повені мінералізація знову збільшується, у зв'язку зі зростанням частки ґрунтових вод у річковому стоці. Іони  $\text{Cl}$  вимиваються ґрунтовим стоком із поверхневого шару ґрунту, тому вони пов'язуються із цим генетичним видом стоку.

Таким чином, за наявності частих вимірювань концентрації різних хімічних елементів у річковій воді протягом року можна встановити, звідки змиваються різні речовини. При мерзлом ґрунті вони змиваються з поверхні водозбору, при талому ґрунті й інтенсивних дощах - із шару ґрунтів ґрунтово-поверхневим стоком. Протягом усього року діє ґрунтовий стік.

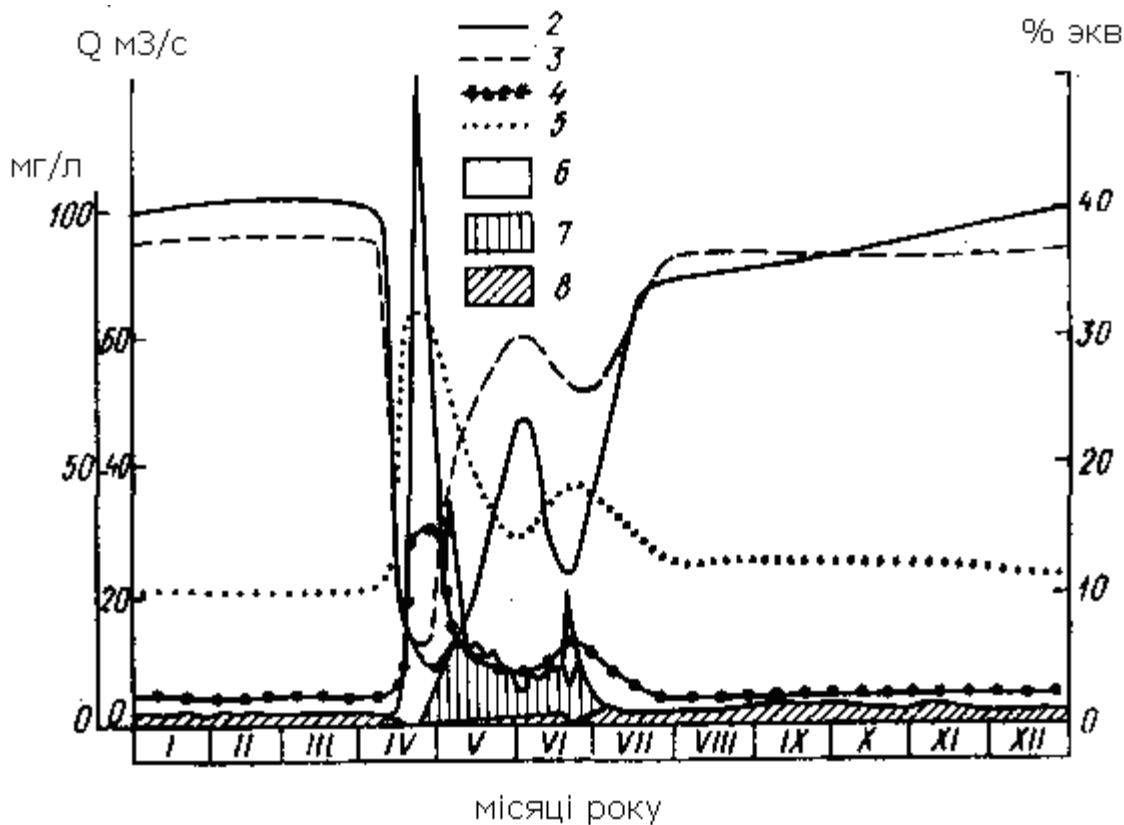


Рис. 3.1 - Гідрохімічний режим р. П'яліца - с. П'яліца ( $F=946 \text{ км}^2$ , 1960 р.) як відображення зміни типів водного режиму.

1- витрата води  $Q \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 - мінералізація; 3 гідрокарбонати -  $\text{HCO}_3^-$ ; 4 - сульфати  $\text{SO}_4$ ; 5 хлориди -  $\text{Cl}$ ; 6 - води поверхневого походження (поверхнево-схилові й ґрунтово-поверхневі); 7 - води берегового регулювання; 8 - води ґрунтового походження

Оскільки води місцевого стоку залежать від зональних умов - опадів, природних зон, то гідрохімічні характеристики місцевих вод мають зональний розподіл. Мінералізація вод закономірно збільшується з півночі на південь, оскільки зменшується в цьому напрямку ступінь промивки ґрунтової товщі опадами. Окрім цього в міру віддалення на південь змінюються особливості ґрунтів - північніше, де є ліси - вони легші, такі, що промиваються, на півдні ж - щільніші, особливо в степовій зоні.

У цьому розділі були розглянуті тільки природні компоненти хімічного складу води річок і водоймищ.

### **3.3 Антропогенні чинники якості вод**

Вище були розглянуті головні показники процесу формування хімічного складу природних вод під впливом природних чинників. Оскільки річкові води є продуктом географічних ландшафтів, з ними генетично зв'язаний і хімічний склад вод річок. Сюди відноситься більшість із прямих чинників формування хімічного складу - гірські породи й мінерали при хімічному вивітрюванні, ґрунтовий покрив, обмінні реакції в ґрунтах, результат життєдіяльності живих організмів - століттями вони поставляли хімічні речовини в природні води й сформували їхній хімічний склад, який по території змінюється відповідно до зміни ландшафтів. Проте в сучасних умовах - у період розвитку науково-технічної революції науково-технічний прогрес перетворив не тільки режим водних об'єктів, але і якість їхніх вод.

Пояснюється це багатьма чинниками. Головним із них є те, що більшість річок і озер одночасно знаходяться в положенні як джерел водопостачання, так і приймачів господарських вод - побутових, промислових і сільськогосподарських стоків. Тому в найбільш обжитих районах у даний час не залишилося річкових систем із непорушеним водним режимом і хімічним складом вод.

При аналізі змін якості вод необхідно враховувати сумісну дію як гідрологічних (водозабір води з річок), так і чинників надходження забруднюючих речовин разом зі скидними водами.

Розглянемо стисло зміну показників якості природних вод різними галузями народного господарства й зміну хімічного складу вод під впливом промислових скидів.

Одним з основних показників використання вод промисловістю є значні величини скидання підприємствами відпрацьованих забруднених вод - 95-

90% від водозабору. Стічні води від промисловості складають 70-80% від загального скидання. Склад стічних вод промисловості дуже різноманітний залежно від виду виробництва, початкової сировини, різних додаткових продуктів, технологічних процесів. Причому, з появою нових галузей промисловості - нафтохімічної, органічного синтезу й інших, збільшується об'єм скидних вод, ускладнюється їхній хімічний склад.

Найінтенсивніше забруднюють поверхневі води такі галузі промисловості, як металургійна, хімічна, целюлозно-паперова, нафтопереробна, від яких надходять основні забруднювальні речовини - нафта, феноли, кольорові метали, складні хімічні сполуки. Зі всіх відібраних за останні десятиліття проб води в 80% випадків води виявилися забрудненими нафтопродуктами, в 60% - фенолами, в 50% - металами. Ці продукти не є природними компонентами, тому вони розглядаються як джерела забруднення поверхневих вод.

Нафтопродукти у воді негативно впливають на розвиток ікри й мальків, видовий склад корморесурсів, придатність до їжі риби. Нафтова плівка перешкоджає процесу аерації й самоочищенню водних об'єктів. Поволі йде процес біохімічного розкладання нафтопродуктів (розпад нафтопродуктів у воді і її видалення вимагає 100-150 днів).

Феноли - токсичні речовини, вони приводять до порушення біологічних процесів, що протікають у водних об'єктах. Так, при вмісті в стічних водах 0.02-0.03 мг/дм<sup>3</sup> фенолу відбувається втрата смакових і товарних якостей риби. Шкідливі ж властивості фенолів для водних бактерій виявляються при концентраціях приблизно в 10 разів менше, ніж для риб.

Органічні сполуки. Хімічні підприємства скидають у річки багато речовин, зокрема, частина яких у природі не існувала. Вони біологічно активні й вода насилу піддається біологічному очищенню від них. Наприклад, детерогени, які збільшують уміст фосфатів у річках. Від них інтенсивно розвивається водна рослинність, цвітуть водоймища й річки, не очищається кисень у водній масі.

Метали в стічних водах. Особливо несприятливу дію на води річок і водоймищ надає стік із великою концентрацією цинку, міді. При концентрації міді більше 1-10 мкг/дм<sup>3</sup> води, а цинку 1-30 мкг/дм<sup>3</sup> - сповільнюються процеси самоочищення вод від органічних сполук, що приводить до вповільнення процесів самоочищення вод від органічних сполук, пригнічується біологічне життя у водоймищах. Тому стічні води необхідно багато разів розбавляти чистими водами.

Теплове забруднення в основному дають енергетичні установки. Це приводить до порушення нересту риб, загибелі зоопланктону, зараження риб теплолюбними видами паразитів. Спостереження показали, що при  $T < 26^{\circ}\text{C}$  - немає шкідливої дії теплового забруднення; при  $T = 26^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$  - пригнічення

життєдіяльності риб; при температурі води  $> 30^{\circ}\text{C}$  - шкідлива дія на біоценози; при  $T = 34^{\circ}\text{C} - 36^{\circ}\text{C}$  - загибель риби.

Зміна якості води під впливом скидання комунально-побутових стічних вод. Скиди комунально-побутових вод складають не менше 20% всіх скидних об'ємів інших галузей. Інші види стоку можна зменшити (упровадити зворотне водопостачання, змінити технологію виробництва на безводну і т.д.), а комунально-побутові скидання можуть за об'ємом тільки збільшитися - поліпшуються комунально-побутові умови - в населених пунктах розширюється каналізаційна мережа.

Зі стічними водами в річки надходять завислі речовини. Їхні частинки є головними чинниками органічного середовища й впливають на якість вод, біологічну продуктивність водоймищ. Вони зменшують режим освітленості водної маси, на їхні поверхні адсорбують мікроелементи, самі частинки можуть бути біогенного походження, забезпечувати формування комплексу донних відкладі.

Кількість забруднювальних речовин у господарчо-побутових стоках відносно стабільна в розрахунку об'єму забруднень на 1 людину (табл.4.1).

Основна небезпека комунальних стоків полягає в розповсюдженні у воді хвороботворних бактерій і передачі через них інфекційних захворювань. Тому відшукуються шляхи вдосконалення методів очищення стоків і скорочення об'ємів їхнього скидання (наприклад, шляхом використання їх як добрива на землеробських полях зрошування (так званих фільтраційних полях), що повинно скоротити бактерійне забруднення водоймищ

Таблиця 4.1 Склад і кількість забруднювальних речовин в побутових стічних водах на 1 жителя за добу.

| Найменування інгредієнтів забруднювальних речовин на 1 жителя, г/д |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| Зважені речовини                                                   | 65  |
| БСК <sub>5</sub> в освітленій рідині                               | 35  |
| БСК <sub>п</sub> - " - " - " - "                                   | 40  |
| Азот амонійних солей (N)                                           | 8   |
| Фосфати (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )                           | 3,3 |
| Хлориди                                                            | 9   |
| Окислюваність (по Кубелю)                                          | 5-7 |

Пояснення до таблиці 4.1 : БСК<sub>5</sub>-біохімічне споживання кисню протягом 5 діб, мг/дм<sup>3</sup>; БСК<sub>п</sub> - повне біохімічне споживання кисню.

Окрім побутових і промислових стоків велика кількість забруднюючих речовин поступає в річки, водоймища з поверхневим стоком із міської території (поливальні води), а також зі зливовим стоком і стоком талих вод. Ці води містять велику кількість мінеральних й органічних речовин.

У результаті сумісний вплив промислових, господарчо-побутових, зливових і мийних вод призводить до таких змін складу природних вод на урбанізованій території:

- збільшується концентрація розчинених органічних і біогенних речовин;
- різко знижується вміст розчиненого кисню;
- характерним джерелом забруднення стають синтетичні поверхнево-активні речовини, які інтенсивно використовуються в промисловості й у побуті;
- збільшується бактерійне забруднення вод.

Вплив меліоративних заходів на якість природних вод. Вони сприяють підвищенню винесення солей зі зрошуваних масивів, що приводить до підвищення мінералізації води в річках, з яких здійснюється водозабір. Характер і інтенсивність зміни мінералізації вод залежить від фізико - географічних, гідрологічних, гідрохімічних і навіть технічних причин (метод зрошування, технічний стан зрошувальних систем та ін.).

Вплив зрошування на характеристики річкового стоку різний для малих річок, які не дренують повну норму ґрунтового стоку, і великих, де ґрунтовий стік складає велику частку. Тому на малих річках велика частина води, яка пішла на зрошування, не повертається в річки й випаровується рослинністю. На басейнах великих річок тільки частина стоку повертається в річки, а інша також випаровується.

Зміна хімічного складу і якості вод у річках районів зрошуваного землеробства обумовлена винесенням солей зі зрошуваних масивів. Причому, підвищення мінералізації пропорційно підвищенню площ зрошування, змінюється іонний склад води. Наприклад, через уміст гідрокарбонатно-кальцієвої води вона стає сульфатно-натрієва, у воді збільшується вміст хлору.

При осушенні також змінюється якісний склад стоку з осушуваних масивів. Винесення речовин дренажним стоком залежить від типу боліт, типу добрив, уживаних при вдобрюванні осушених масивів, та інших чинників.

### Питання для самоперевірки.

1. Поняття про абіотичні чинники водних екосистем.
2. Впливи на стан гідроекосистем фізичних властивостей води - теплоємності, густини води й щільності льоду, в'язкості.
3. Вплив на розвиток водних організмів умісту у воді органічних речовин і газів.
4. Природні чинники формування хімічного складу природних вод.
5. Залежність хімічного складу вод від форм стоку.
6. Антропогенні чинники формування хімічного складу природних вод, види забруднювальних речовин.
7. Вплив продуктів антропогенного забруднення природних вод на розвиток біоти.
8. Вплив побутових і промислових стоків на склад природних вод.
9. Вплив меліоративних заходів на якість природних вод.

## **4 ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕНІСТЬ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ**

### **4.1 Основні чинники теплового режиму водних об'єктів**

Тепловий режим водоймищ - важливий і універсальний екологічний чинник, який визначає граничні умови діяльності гідробіонтів, їхній розподіл по вертикалі й по горизонталі водоймища, а також міграцію по його акваторії.

Температура водоймищ визначає наявність життєво необхідних для біоти умов - концентрації газів  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , і інших. Вона управляє швидкістю протікання фізико-хімічних процесів у клітках гідробіонтів, впливає на швидкість розвитку організмів. З підвищенням температури води розвиток майже всіх гідробіонтів прискорюється. Проте гідробіонти можуть існувати тільки в певному температурному інтервалі, теоретично: між  $0^\circ$  і  $70^\circ \text{C}$ . При  $0^\circ \text{C}$  - точка замерзання води, коли вона перетворюється на тверде тіло й усі основні фізіологічні функції в гідробіонтах припиняються. Друга межа  $70^\circ \text{C}$  - при такій температурі згущуються деякі білки й ферменти.

Завдяки високій теплоємності води коливання її температури мають значно менші межі, ніж температури атмосфери. Так у Дніпровських водосховищах вона коливається в межах від  $0^\circ \text{C}$  до  $+32^\circ \text{C}$ , а в прилеглому шарі ат-

мосфери від  $-35^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ . Тому гідробіонти в порівнянні з організмами інших середовищ менш пристосовані до різких змін температури. Проте вплив температури на біоту водоймищ не може бути однозначним - її дія на гідробіонти виявляється у взаємодії з іншими чинниками - мутністю води, хімічним складом і ін. Тому виділяють декілька груп чинників теплового режиму водоймищ.

Перша група чинників, які управляють процесами надходження й втрачання тепла водоймищем, така: сонячна енергія, теплообмін водної маси з навколишнім середовищем, тепло джерел пароутворення, танення льоду, внутрішнє тертя, біологічні процеси, антропогенні чинники.

Друга група чинників впливає на перерозподіл тепла усередині водної товщі: турбулентне, конвективне й дифузійне перемішування. Морфометричні характеристики водоймищ також впливають на тепловий режим водоймищ. Розміри водних поверхонь визначають ступінь впливу вітру на хвилювання й течії, а останні викликають перемішування вод. Температурний режим мілководій знаходиться під впливом рослинності, що затінює водну поверхню, а також інших антропогенних чинників - скидання теплих вод від електростанцій (ТЕС), промислові й побутові скидання, що мають вищу температуру.

У нижніх б'єфах водосховищ при ГЕС у теплий період року температура води завжди нижче, ніж у верхніх шарах водосховищ, оскільки при роботі турбін скидання води здійснюється з нижніх його шарів перед греблею. У зимовий період - навпаки - при зворотній термічній стратифікації в нижніх шарах водосховища температура води вище, ніж у нижньому б'єфі, тому в нижній б'єф скидається тепліша вода, а після дамби завжди утворюється незамерзаюча взимку ополонка.

Розглянемо окремо вплив перерахованих чинників, що визначають енергетичний стан гідроекосистеми. Найголовнішою з них є та величезна кількість променистої енергії, яка від сонця безперервно поступає в атмосферу й на земну поверхню. По кількості сонячної енергії, що поступає у воду, можна судити про величину біологічної продуктивності того або іншого водоймища. Термічний режим, залежний від режиму сонячної енергії, визначає умови існування гідробіонтів. Особливо велике значення має ця енергія для фотосинтезуючих рослин. З енергетичної точки зору у водних екосистемах промениста енергія сонця трансформується в потенційну енергію хімічних зв'язків при утворенні білків, вуглеводів та інших органічних речовин

## **4.2 Надходження сонячної енергії у водні маси**

Земля й атмосфера одержують від сонця в рік  $1.3 \cdot 10^{24}$  кал тепла. Внутрішнє тепло Землі, що надходить з її глибин до поверхні, складає в середньому всього 1/100 000 000 частку величини сонячної радіації.

Інтенсивність сонячної променистої енергії - це її кількість, яка надходить в одну хвилину на площину  $1 \text{ см}^2$ , перпендикулярну до променів. На верхню межу атмосфери безперервно надходить сонячна енергія з інтенсивністю  $1,98 \text{ кал/см}^2$  за хвилину ( $1380 \text{ Вт/м}^2$ ) - це сонячна стала. Кількість сонячної радіації, що надходить на поверхню землі (води), вимірюється на метеорологічних станціях актинометричними приладами - *піргеліометрами*.

Величина сонячної енергії може вимірюватися в різних одиницях при такому співвідношенні між ними:  $1 \text{ Вт/м}^2 = 10^{-3} \text{ кВт/м}^2 = 0.00143 \text{ кал/см}^2 = 698 \text{ Дж/м}^2$ .

Проходячи через атмосферу, сонячна енергія розсіюється й поглинається. В наслідок розсіювання на рівні земної поверхні енергія сонця спостерігається не тільки у вигляді *прямої* радіації (паралельного пучка променів), але й з усіх боків - у вигляді розсіяної радіації - від усіх точок небозводу.

*Надходження сонячної енергії на поверхню води.*

Кількість сонячної енергії, що поступає на горизонтальну площину землі (поверхню води) можна обчислити аналітичним шляхом для будь-якої географічної широти при відомій сонячній сталій, залежно від кута падіння променів, висоти сонця, прозорості атмосфери, хмарності й ін. Якщо позначити  $\varphi$  - широта місцевості, а  $\delta$  - схилення сонця на місцевості, то висота сонця визначиться зенітним кутом  $h_0$  :

$$h_0 = 90^\circ - (\varphi - \delta), \quad (4.1)$$

від якого залежить частка відбитої водною поверхнею радіації.

Відношення відбитої від поверхні води променистої енергії до сумарної, такої, що приходить до неї, називається в метеорології *альбедо*.

Альбедо, звичайно, виражається у відсотках і обчислюється за формулою:

$$A_0 = \frac{E_{\downarrow(+0)} - E_{\downarrow(-0)}}{E_{\downarrow(+0)}}. \quad (4.2)$$

Тут  $A_0$  - альбедо;  $E_{\downarrow(-0)}$  - сумарна пряма й розсіяна радіація, що поступає на  $1 \text{ см}^2$  горизонтальної площини в одиницю часу;  $E_{\downarrow(+0)}$  поглинута водою радіація. Складові рівняння (4.2) виражаються в одних одиницях, наприклад,



кал/(см<sup>2</sup> ·хв). Довжина світлової хвилі вимірюється в нанометрах (нм), причому, 1 нм = 10<sup>-9</sup> м.

Сонячна радіація надходить в широкому діапазоні спектра хвиль від 10 нм до 3000 нм (ультрафіолетова - 10-380 нм, видима 380-770 нм, інфрачервона 700 - 3000 нм). В ясний день сонячна енергія на рівні поверхні землі складається із частин - 10% - ультрафіолетової, 45% - видимої, 45% - інфрачервоної.

*Фотосинтетично активна радіація - ФАР.*

У процесі фотосинтезу бере участь тільки частина сонячної енергії - її спектр знаходиться в межах хвиль випромінювання 350 – 700 нм. Із загальної кількості поглиненої водою сонячної радіації велика частина її (до 70%) перетворюється на тепло, а та, що залишилася, використовується в процесі фотосинтезу (близько 30%). Будучи енергетичним джерелом більшості біологічних процесів, сонячна радіація визначає виникнення й розвиток цих процесів, служить основою біологічної продуктивності водоймищ.

Відбивна здатність водної поверхні залежить від багатьох чинників - від хмарності, співвідношення прямої й розсіяної радіації, глибини водоймищ, прозорості води, стану водної поверхні, інших характеристик. Особливо сильно альbedo залежить від висоти сонця. Тому альbedo змінюється в широких межах - 2-8% в обідні години, 25-30% вранці і ввечері. Оскільки значення альbedo залежать від висоти сонця, то їх можна представити таблицями для певної доби.

Фотосинтетично активна радіація, проникаюча у водні маси, обчислюється за формулою:

$$E_{\downarrow \text{фар}(-0)} = E_{\downarrow \text{фар}(+0)} (1-A_{0,\text{фар}}), \quad (4.3)$$

в якій альbedo для ФАР за наявності прямих вимірювань може бути встановлено по емпіричному зв'язку його з альbedo для інтегральної сонячної радіації.

Емпірично встановлені коефіцієнти переходу від повної радіації до ФАР для різних місяців і середньої широти Дніпровських водосховищ:

| Квітень | Травень | Червень | Липень | Серпень | Вересень | Жовтень |
|---------|---------|---------|--------|---------|----------|---------|
| 0.491   | 0,493   | 0,498   | 0,495  | 0,493   | 0,491    | 0,490   |

Слід зазначити, що Міжнародною біологічною програмою рекомендується брати середнє значення цього перевідного коефіцієнта, рівного 0,46. Проте, враховуючи встановлений діапазон його змін від 0.38 до 0.62 за різних

умов поглинання і розсіювання радіації різними речовинами в атмосфері (водяної пари, озону, пилу і ін.), вважається більш виправданим ухвалення просто середнього значення 0,5 для перехідного коефіцієнта.

У процесі фотосинтезу може брати участь значна кількість сонячної енергії. Підраховано, що в Каховському водосховищі кількість енергії, яка надійшла від ФАР, в 473 рази вище від всієї енергії від ГЕС за річний період, у Київському водосховищі - в 369 разів, у Кременчуцькому - в 385.

#### 4.3 Залишкова сонячна радіація у водних масах

Установлення кількості сонячної енергії, яка поглинається водою і йде на підтримку біологічних процесів у водних екосистемах - одне з важливих завдань гідроекологічних досліджень. Це завдання можна вирішити, використовуючи актинометричні вимірювання в натурних умовах, або застосовуючи розрахункові методи для встановлення параметрів процесу поглинання сонячної енергії водою й гідробіонтами. Найбільший ефект виходить при поєднанні цих двох шляхів аналізу.

Інтенсивність сонячної радіації  $E_{\downarrow}(-0)$ , що проникла у водну масу, звичайно, визначається по співвідношенню (4.3). У цьому виразі  $A_0$  - альbedo (відбивна здатність водної поверхні). Разом із потоками прямої й розсіяної сонячної радіації, атмосферу пронизують потоки невидимої радіації, які безперервно випромінюються як водною поверхнею, так і атмосферою назустріч один одному. Різниця цих зустрічних випромінювань називається *ефективним випромінюванням*. Проте відбита радіація багато разів перевищує розсіяння радіації водною товщею вгору, то, звичайно, враховується як ефективне випромінювання.

##### *Фотичний шар*

Слід зазначити, що фотосинтез з утворенням основної маси первинної біологічної продукції відбувається в достатньо освітленому верхньому шарі води, куди проникає сонячна енергія у фотосинтетичному активному діапазоні. Цей шар називається фотичним. Окрім цього, у водоймищі виділяється так звана *евфотна зона*, нижня межа якої досягає глибини, до якої доходить 1% сонячної радіації, що проникла у воду. Уважається, що потужність евфотної зони в 1,5 разу більша фотичного шару.

Для оцінки цих шарів необхідно знати закономірності ослаблення світлового потоку у водному середовищі конкретного водоймища. У загальному випадку ослаблення світла у воді відбувається за експоненціальним законом поглинання енергії:

$$E_{\downarrow(z)} = E_{\downarrow(-0)} e^{-az}, \quad (4.4)$$

де  $E_{\downarrow(z)}$  - висвітлення водних мас на глибині  $z$ ;  $a$ - коефіцієнт ослаблення потоку сонячного випромінювання;  $E_{\downarrow(-0)}$  - поглинута водною масою коротковильова радіація. Значення  $E_{\downarrow(z)}$  і  $E_{\downarrow(-0)}$  вимірюються приладами в натурних умовах.

Параметр  $a$  визначається багатьма зовнішніми й внутрішніми чинниками водоймища. Зовнішні чинники - висота сонця, хмарність змінюють на 10% його величини. Внутрішньоводні чинники більш діючі - це вміст розчиненої речовини. Особливо на значення параметру  $a$  впливає планктон.

Проте нас цікавить, у першу чергу, ослаблення сонячного світла в діапазоні ФАР, тобто значення  $\alpha_{\downarrow \text{фар}}$ . Якщо відома фотосинтетично активна частина сонячної радіації на глибині  $z$ , тобто  $E_{\downarrow \text{фар}(z)}$  (за даними вимірювань спеціальними приладами, встановленими на глибині  $z$ ), а також та, що поступила в масу водоймища через її поверхню радіація  $E_{\downarrow \text{фар}(-0)}$ , то параметр  $\alpha_{\downarrow \text{фар}}$  легко встановити з формули (4.5) після її логарифмування:

$$\alpha_{\downarrow \text{фар}} = \frac{1}{z} \ln \frac{E_{\downarrow \text{фар}(z)}}{E_{\downarrow \text{фар}(-0)}}. \quad (4.5)$$

#### 4.4 Прозорість води як чинник енергозабезпечення гідроекосистем

*Прозорість* води - найважливіший чинник надходження сонячної енергії у водні маси. Вона визначає розміри фотичного шару, а значить біологічну продуктивність водоймища і його біологічні ресурси. Існує два способи оцінки прозорості: *фізичний* і *гідрологічний*.

##### 1. Фізичний спосіб визначення прозорості.

Ступінь ослаблення потоку сонячного світла водною масою оцінюється за допомогою показника підводної освітленості на глибині 1 м від поверхні. Його ще називають *коефіцієнтом пропускання сонячного світла*:

$$\eta_{\downarrow(-1)} = \frac{E_{\downarrow(-1)}}{E_{\downarrow(-0)}}, \quad (4.6)$$

де  $\eta_{\downarrow(-1)}$  - коефіцієнт пропускання сонячного світла;  $E_{\downarrow(-1)}$  - надходження сонячного світла на глибину 1м;  $E_{\downarrow(-0)}$  - сонячна освітленість поверхні.

2. У гідрології широко відомий спосіб оцінки відносної прозорості води за допомогою білого диска (диск Секкі) діаметром 30 см, який опускається з тіньової сторони судна. Прозорість береться чисельно рівною середньому значенню між глибиною зникнення з видимості диска при його опусканні й виникнення потім при підйомі. За даними Інституту Гідробіології НАНУ застосування диска Секкі для визначення прозорості вод є цілком прийнятним способом, доступним для широкого використання. Його можна використовувати для визначення потужності фотичного шару. Проте цей спосіб має певну суб'єктивність. Результат залежить від погодних умов, режиму освітленості, індивідуальних особливостей зору спостерігача, висоти ока спостерігача від поверхні води та ін. Відліки глибини звичайно проводяться з точністю 5 см, що й визначає точність цього методу визначення прозорості вод.

Наведені вище залежності дозволяють обчислити величину сонячної енергії на будь-якій глибині з достатньо високою мірою достовірності при вимірюванні прозорості й мутності водних мас. За даними досліджень В.М.Тімченко коефіцієнт ослаблення сонячного випромінювання у фотичному шарі  $\alpha_{\downarrow \text{фар}}$  можна обчислити залежно від показника прозорості води  $P$  по наступній залежності:

$$\alpha_{\downarrow \text{фар}} = 1.7/P. \quad (4.7)$$

По залежності (4.4) при відомому  $\alpha_{\downarrow \text{фар}}$  встановлюється потік сонячної енергії ФАР у фотичний шар, де відбуваються основні процеси утворення біологічної продукції.

Спостереження показують, що основна частина сонячної енергії поглинається верхнім шаром води до глибини 1 м. Так, при прозорості

0,7 м і  $h_0=120$  - 92% її поглинається в 1 м;

1,1 м і  $h_0=320$  - 75% її поглинається в 1 м;

1,5 м і  $h_0=450$  - 42% її поглинається в 1 м.

Тому значні зміни температури води відбуваються у верхньому її шарі. Розповсюдження тепла у водній товщі можливо за наявності динамічних або гідрофізичних явищ у водоймищах

Кольоровість води - стійкіша характеристика, проте її вплив на прозорість води не враховується в розрахунках, у зв'язку з незначною її роллю в порівнянні з іншими чинниками.

#### 4.5 Термічний режим водних об'єктів

Здатність водних мас водоймищ акумулювати тепло збільшує їхню термостабільність, зменшує межі коливання температур і цим самим чинить позитивний вплив на розвиток гідробіологічних процесів.

Теплозапаси води у водосховищі можна визначити на задані дати за формулою:

$$Q = c\rho WT, \quad (4.8)$$

Тут  $Q$  - кількість теплоти (внутрішня енергія, Дж), яку має водне тіло водоймища об'ємом  $W$ , а  $\rho W$  - маса цього тіла ( $\rho$ - густина води);  $c$  - питома теплоємність води (кількість тепла, яке витрачається на нагрівання 1 дм<sup>3</sup> води на 1°C в межах 14, 5°C до 15,5°C);  $T$  - температура води (°C) на заданий момент часу.

Теплозапаси водосховищ змінюються в широких межах залежно від режиму надходження сонячної енергії, так і від водності періоду. Гидроєкологи встановили значення характерних температур, що визначають терміни термогідробіологічних періодів. Вони вибираються з урахуванням інтенсивності розвитку гідробіологічних процесів. Це може мати місце після розкриття водоймищ, коли температура води перевищує 0°C. Тому дати утворення льодоставу й розкриття річки є датами кінця й початку певних гідробіологічних процесів. Зі звільненням водоймищ від льоду ці процеси інтенсифікуються. У рослинництві за початок і кінець періоду вегетації береться дата переходу періоду температур через +5°C. Стосовно гідробіологічних процесів фізично більш обґрунтованою є температура води +4°C, при якій вода має найбільшу щільність. У цей час у воді встановлюється гомотермія - весною й восени гранична й зворотна стратифікація температури в перехідний період. Інші характерні температури - межі періодів по аналогії з ботанікою, приймаються через 5°C: 10°C, 20°C, 25°C..і  $T^{\circ}_{\max}, C$ . Період від +4°C і до +4°C восени називається періодом вегетації. Із цього періоду можна виділити період початкової й кінцевої вегетації в межах дат температур від 4°C до 10°C весною й від 10°C до 4°C осінню. Періоди в межах 10°C -15°C і 15°C-10°C – мають назву періодів помірної вегетації, а при 15°C-20°C і 20°C-15°C - періоди інтенсивної вегетації.

Періоди з температурою вище 20°C до  $T^{\circ}_{\max}, C$  - період вельми інтенсивної вегетації. Крім того, період від розкриття до дати настання максимальної температури - період прогрівання, а від  $T^{\circ}_{\max}, C$  до замерзання (ЛДСТ) - період охолодження. Період зимової стабілізації - від ЛДСТ до розкриття річки. В окремі роки (теплі) період зимової стабілізації може бути відсутнім.

Таблиця 4.1 - Терміни настання термічних періодів

| №<br>п/<br>п | Термогідробіологічний період (довжина періодів з характерними температурами) | Загальне число діб у періоді для водосховища |           | Характеристика періода | Число діб періода для водосховища |           |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------|------------------------|-----------------------------------|-----------|
|              |                                                                              | Київське                                     | Каховське |                        | Київське                          | Каховське |
| 1            | Перехідний                                                                   |                                              |           |                        |                                   |           |
|              | Весна - від скресання до +4°C                                                | 15                                           | 34        | > 0°C                  | 265                               | 306       |
|              | Осінь - від +4°C до льодоставу                                               | 31                                           | 24        |                        |                                   |           |
|              | В с ь о г о                                                                  | 46                                           | 58        |                        |                                   |           |
| 2            | Початкової (кінцевої) вегетації:                                             |                                              |           | > 4°C                  | 219                               | 248       |
|              | Весна - від +4°C до +10°C                                                    | 17                                           | 22        |                        |                                   |           |
|              | Осінь - від +10°C до +4°C                                                    | 30                                           | 37        |                        |                                   |           |
|              | В с ь о г о                                                                  | 47                                           | 59        |                        |                                   |           |
| 3            | Помірної вегетації:                                                          |                                              |           | > 10°C                 | 172                               | 189       |
|              | Весна - від +10°C до +15°C                                                   | 16                                           | 18        |                        |                                   |           |
|              | Осінь - від +15°C до +10°C                                                   | 23                                           | 26        |                        |                                   |           |
|              | В с ь о г о                                                                  | 39                                           | 44        |                        |                                   |           |
| 4            | Інтенсивної вегетації:                                                       |                                              |           | > 15°C                 | 133                               | 145       |
|              | Весна - від +15°C до +20°C                                                   | 40                                           | 28        |                        |                                   |           |
|              | Осінь - від +20°C до +15°C                                                   | 28                                           | 26        |                        |                                   |           |
|              | В с ь о г о                                                                  | 68                                           | 54        |                        |                                   |           |
| 5            | Вельми інтенсивної вегетації:                                                |                                              |           | > 20°C                 | 65                                | 92        |
|              | Весна - від +20°C до T°C макс                                                | 30                                           | 44        |                        |                                   |           |

| Продовження таблиці 4.1 |                                                                        |     |     |  |  |  |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----|-----|--|--|--|
|                         | Осінь - від $T^{\circ}\text{C}_{\text{макс}}$ до $+20^{\circ}\text{C}$ | 38  | 48  |  |  |  |
|                         | В с ь о г о                                                            | 68  | 92  |  |  |  |
|                         |                                                                        |     |     |  |  |  |
|                         | Прогрівання<br>від скресання до $T_{\text{макс}}^{\circ}\text{C}$      | 117 | 146 |  |  |  |
|                         | Охолодження<br>від $T_{\text{макс}}$ до льодоставу                     | 148 | 160 |  |  |  |

У зв'язку з тим, що температура води в порівнянні з іншими елементами гідрологічного, гідрохімічного й гідробіологічного режимів є найбільш мінливою характеристикою, її зміну оцінюють за допомогою періодів значень температур ув характерних межах їх зміни.

У кожному із цих періодів проходять специфічні фізичні процеси, що визначають розподіл температури води за глибиною, по поверхні і тому впливають на біологічні і гідрологічні процеси. Терміни настання термічних періодів для Дністровських водосховищ - Київського й Каховського - наведені в таблиці 4.1.

Питання для самоперевірки:

1. Особливості впливу теплового режиму водних об'єктів на біоту.
2. Групи чинників, що впливають на надходження тепла у водоймища і його перерозподіл.
3. Надходження сонячної радіації на водну поверхню.
4. Фотосинтетична активна радіація і її розрахунок.
5. Залишкова сонячна радіація у водних масах.
6. Фотичний шар і його визначення.
7. Вплив прозорості води на енергозабезпеченість водних екосистем.
8. Термогідрологічні періоди, вибір їхніх меж.

## 5 ДИНАМІКА ВОДНИХ МАС І ЇЇ ВПЛИВ НА ВЛАСТИВОСТІ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

### 5.1 Основні види динаміки водних мас, їх екологічне значення

Динаміка водних мас чинить величезний вплив на формування якісного складу вод річок і водоймищ, на розвиток біологічних процесів у їхніх водах. При цьому, під поняттям «водні маси» вважають не тільки «фізичне тіло», яке заповнює ложе річки, озера або водосховища. В результаті фізичних, хімічних і біологічних процесів у різний час і різних частинах водоймищ можуть формуватися різні водні маси - вони розрізняються за стійкими значеннями чинників - фізичних (температура води, прозорість, кольоровість і т.д.), хімічних (солоність, газонасиченість та ін.), біологічних (фіто-, зоо, планктон, бентос і ін.). Бентос - сукупність організмів, що мешкають на дні водоймищ. У процесі переміщення водних мас у результаті течій і вітро-хвильових дій відбувається зміщення різних водних мас, їхнє самоочищення, забруднення. Одночасно в них спостерігається перетворення енергії й речовин, формується певна якість води, біологічна продуктивність. Усі ці процеси взаємозв'язані між собою й навколишнім середовищем.

Для гідробіонтів переміщення водних мас має як пряме, так і непряме значення:

- по-перше, самі організми переносяться як у горизонтальному напрямі й по глибині, бентос може виноситися з водоймища через скидний отвір у дамбі або через канал, переноситися в інше місце;

- по-друге, - у результаті динаміки водних мас відбувається перенесення їжі, кисню, винесення метаболітів (проміжні речовини обміну в клітці), вирівнювання температури, прозорості води, які дуже важливі для формування гідробіоценозів, їх розвитку.

Сукупність усіх гідродинамічних процесів у водоймищах діляться, звичайно, на 2 класи:

- процеси перенесення,
- процеси перемішування.

*Процеси перенесення* включають усілякі види течій і циркуляцій. *Течія* - один із найбільш важливих екологічних чинників, що впливають на формування середовища незаселеного рослинного й тваринного світу. Течії у водних об'єктах спричинюються багатьма чинниками, головним з яких є дія гравітаційних



сил на водну масу з вільною поверхнею й різними гідрометеорологічними умовами, у яких знаходяться водні об'єкти.

У межах водоймищ і водотоків існує класифікація течій, яка виділяє дві основні їхні групи:

- течії по всій акваторії водоймищ, у тому числі в прибережній зоні: *стічні, вітрові, хвильові, густинні, сейшові, інерційні*;
- течії, що розвиваються тільки в прибережній зоні: *вздовжберегові, компенсаційні*.

Розглянемо особливості впливу перерахованих видів течії на функціонування гідроекологічних систем.

*Стічні течії* спричиняються додатковими ухилами водної поверхні в зв'язку з надходженням у водоймище нових об'ємів води від річкової притоки, що живить водоймище, або зміною ухилу за рахунок стоку води через скидні отвори, що загороджують дамби, або просто русловим стоком із водоймища. Найбільшого значення цей вид течій досягає весною, коли надходить зовнішня повінь і стік із басейну. У верхньому б'єфі водосховищ при ГЕС можливі періодичні течії, пов'язані з періодичними скидами води через турбіни з урахуванням двохпікового графіка електронавантаження в електромережі протягом доби. При переході від мінімального нічного навантаження до підвищеного вранці й увечері двічі на добу формуються хвильові коливання рівня - вони спричиняють зворотну хвилю, яка розповсюджується по довжині водосховища зі швидкістю до 50 км за годину.

*Вітрові течії* генеруються дотичною напругою повітряного потоку на водну поверхню, проте вони захоплюють не тільки поверхневі шари (дрейфові течії), але й глибші шари водної товщі. У замкнутих водоймищах посилення вітру приводить до формування протилежно направленої *градієнтної течії*, обумовленої виникненням зворотних ухилів при нахилі води до навітряного берега. Градієнтні течії можуть діяти в нижніх горизонтах водної товщі або локалізуватися в певних зонах, захоплюючи всю водну товщу (компенсаційні течії). Зрештою, формуються так звані *циркуляції*, які грають велику роль у водообміні всередині водоймища. У результаті інтенсивно перемішуються водні маси, розподіляється тепло, суспензії, розчини й гідробіоти по акваторії водного басейну.

З вітрами пов'язане *вітрове хвилювання*. Вітрові хвилі характеризуються наступними елементами: *гребінь хвилі* - вища точка, нижча - *підощва*; *крутизна хвилі* - кут дотичної до профілю хвилі з горизонтальною лінією; відстань між двома гребенями - *довжина хвилі*; проміжок часу, за який хвиля пробігає відстань, рівну її довжині, - це *період хвилі*.

Для визначення висоти хвилі використовуються різні емпіричні формули, наприклад, формула В.Г.Андреянова

$$h = 0.028 W^{\frac{5}{4}} D^{\frac{1}{3}}, \quad (5.1)$$

де  $h$  - висота хвилі,  $D$  - довжина розгону вітру,  $W$  - швидкість руху хвилі.

Хвилювання буває *наростаюче, стає й згасаюче*. Наростаючі пов'язані зі збільшенням хвилювання при збільшенні швидкості вітру, сталі - якщо встановилася різниця між швидкістю вітру й рухом хвилі. При продовженні вітру протягом 6 годин зростання висоти хвилі припиняється. Вплив розгону вітру на збільшення висоти хвилі спостерігається до відстані 16 км. Вітрові течії відрізняються складною структурою - їхня швидкість різко зменшується до глибини 0,5 м.

Особливим видом руху води у водоймищах при вітрах є так звані *вихори Ленгмюра* (циркуляція Ленгмюра). Їхнім індикатором на поверхні води є смуги з піни, водоростей, дрібних плаваючих предметів, майже паралельні напрямку вітру. Відстань між смугами приблизно дорівнює глибині води у водоймищі.

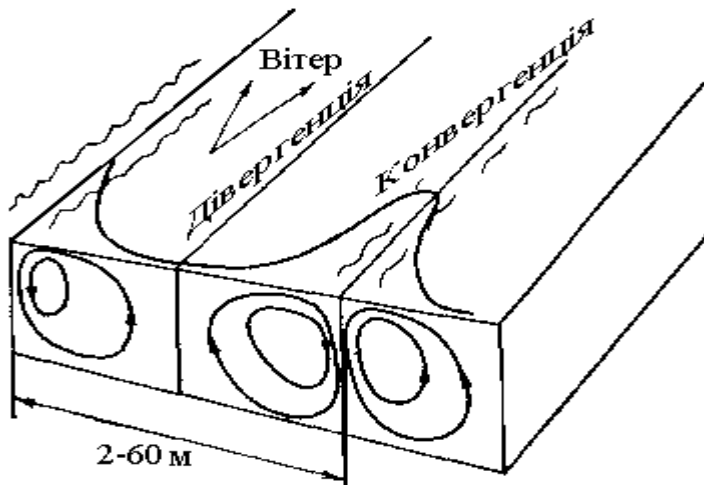


Рис. 5.1 - Схема циркуляції Ленгмюра.

Процес утворення вихорів Ленгмюра поки неясний, проте припускають, що їхня поява тісно пов'язана з дією вітру на поверхню водоймища при певному співвідношенні температури повітря й води. Звичайно, циркуляція Ленгмюра спостерігається при температурах повітря близьких або нижчих за температуру водної маси.

Перемішування води по вертикалі в смугах Ленгмюра по інтенсивності може в декілька разів перевищити звичайне перемішування при інших формах вітрових течій. Поява вихорів Ленгмюра істотно впливає на біотичні елементи екосистеми. Вихори впливають на розвиток планктонних організмів - у смугах конвергенції (піни) скупчуються не тільки фітопланктон, бактерії та інші гідробіоти, що пасивно пересуваються, але й живильні речовини. Ці вихори сприяють посиленню процесу фотосинтезу фітопланктону через те, що транспортують із глибоких шарів у фотичну зону живильні солі. Фотосинтез («синтез на світлі») - засвоєння вуглекислого газу рослинними співтовариствами, відновлення вуглецю з утворенням органічних речовин за участю поглинутої енергії світла.

Описані нижче 3 фази процесу фотосинтезу - *фотофізична* (поглинання фотона світла й перехід його енергії в збуджений стан електронів), *фотохімічна* (перехід енергії збудженого стану електронів в енергію хімічних зв'язків) і *біохімічна* (перетворення органічних речовин аж до утворення кінцевих продуктів фотосинтезу). Перші 2 фази (*світлові*) та біохімічна (*“темнова”*) мають найбільшу ефективність за наявності циркуляції Ленгмюра. Перемішування води у великому шарі (до дна) з певною періодичністю. Поява води із частинками біоти на світлі й біля дна сприяє активізації загального процесу фотосинтезу й нарощуванню біологічної маси у водоймищі.

Течії в прибережній зоні - *вздовжберегові вітрові течії* або близькі до них за напрямом - функціонують у зоні контакту 3-х середовищ - вони відіграють виключно велику роль у формуванні багатьох показників гідрохімічного й гідробіологічного режимів водоймищ. завдяки їм, здійснюється водообмін між основною акваторією й мілководдям, надходження живильних біогенних речовин й інших елементів до рослинності, яка, звичайно, росте на мілководді.

Натурні вимірювання характеристик течій, звичайно, проводяться із застосуванням млиноків БПВ-2Р, ГР-42, іншими способами - із застосуванням поверхневих і глибинних поплавців, пневматичного методу вимірювання швидкостей із повітряними бульбашками.

Останнім часом при оцінці характеристик вітрових течій у водоймищах набули застосування *гідродинамічні моделі* розрахунку циркуляції води у водоймищах під впливом вітру. Більшість із них заснована на положеннях теорій Штокмана В.Б., Свердрупа Р. та інших авторів. Ці моделі (звичайно, 2-вимірні) дозволяють встановити поля швидкостей для всієї акваторії водоймищ, різні зони замкнутих циркуляцій з урахуванням форми водоймища в плані й морфометрії його підводної частини.

Окрім вітрових течій у водоймищах спостерігаються інші течії – *густинні, бароградієнтні й сейшові*.

*Густинні* течії виникають у результаті нерівномірного розподілу води, що спричинено просторовою зміною температури й мінералізації; при щільнісних течіях утворюються компенсаційні рухи води.

*Сейшові* течії розвиваються при сейшових коливаннях водних мас - при періодичній дії на водні маси метеорологічних чинників (вітер, тиск), які потрапляють у резонанс із коливаннями водної маси водоймища. При цьому утворюються коливальні рухи всієї водної маси з періодичними змінами ухилу водної поверхні.

## 5.2 Методи розрахунку вітрових течій у водоймищах

Найбільш результативними в цьому випадку є методи математичного моделювання циркуляції вод у внутрішніх водоймищах. Математичні моделі вітрових течій відносяться до різних типів. В.Лік ділить їх на *інтегральні, стаціонарні й нестаціонарні*, а І. Шек - на *екманівські* (на ім'я шведського гідродинаміка Екмана), *інтегральні, багатощарові й багаторівневі*. У практиці гідродинамічних розрахунків найбільше застосування одержували моделі течій - двовимірні в горизонтальній площині.

В.М. Тімченко для моделювання течій у водоймищах Північно-західного Причорномор'я описав результати розрахунків водних течій на основі обліку впливу дна, берегів, проточності водоймища, періодичності вітрової дії на водну поверхню в різних частинах водоймища. Метод, розроблений А.І. Фельзенбаумом, відноситься до класу стаціонарних моделей для вирішення завдань гідроекологічної оцінки й прогнозу абіотичних компонентів досліджуваних лиманів.

Метод А.І. Фельзенбаума - гідродинамічна модель розрахунку стаціонарної вітрової циркуляції при змінному значенні коефіцієнта вертикального турбулентного обміну. Вона заснована на моделі Екмана для мілкого моря. Це означає, що глибина водоймища настільки мала в порівнянні з його мінімальними розмірами, що можна нехтувати горизонтальним турбулентним обміном і нелінійними членами рівняння. У цих моделях для вітрових течій вплив вітру у вигляді дотичного напрямку на поверхню водоймища враховується розподілом швидкості течії по вертикалі. Вважаючи рідину у водоймищі однорідною площиною, можна записати рівняння нерозривності й руху водоймища:

(5.2)

(5.3)

Оскільки тиск  $P$  пропорційний висоті поверхні води, можна записати:

(5.4)

булентного обміну. Тому система рівнянь (5.2-5.3) запишеться так:

(5.5)

(5.6)

Позначимо для поверхні озера

$$\rho K z \frac{\partial u}{\partial z} = -\tau_x$$

$$\rho K_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y$$

Далі в розгляд уводиться поняття *повного потоку* - сумарне перенесення води по вертикалі.

$$M = \int_0^H \nu dz \quad (5.7)$$

По суті  $M$  - відомий із гідрометрії елемент під назвою елементарна витрата - тобто, витрата води через вертикаль, чисельно рівна витраті через смугу перетину одиничної ширини (при її ширині  $db=1$   $M=V_{cp}$ ). Його використання пов'язане з можливістю введення обмежень на межах водоймища - саме там нормальна складова потоку рівна нулю, тому для повного потоку рівняння нерозривності записується так

$$\frac{\partial M_x}{\partial y} + -\frac{\partial M_y}{\partial x} = 0, \text{ тобто } \operatorname{div} M = 0, \quad (5.8)$$

а значення  $M_x$  і  $M_y$  можна представити через функцію потоку  $\Psi$ , тобто

$$\begin{aligned} M_x &= -\frac{\partial \Psi_x}{\partial y}; \\ M_y &= \frac{\partial \Psi_y}{\partial x} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Таким чином, ізолінія цієї функції  $\Psi$  є лінія струму для повного потоку  $M$  (тобто для заданої елементарної витрати), а різниця в двох точках значення  $\Psi$  визначає часткову витрату води, що видно з рівнянь (5.9). Дійсно, якщо  $\partial \Psi / \partial x$  або  $\partial \Psi / \partial y$  - це елементарна витрата, середня за інтервали  $dx$  або  $dy$ , то чисельник  $d\Psi$  - це витрата води через перетин шириною  $dx$  або між вертикалями.

З урахуванням викладеного, А.І.Фельзенбаум перетворив гідродинамічну модель (5.2) - (5.3) для розрахунку стаціонарної вітрової циркуляції при змінному значенні коефіцієнта вертикального турбулентного обміну. Рівняння для функції повного потоку записується в такій формі:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K_z}{H^3} \times \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K_z}{H^3} \times \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{rot} \frac{T}{H}. \quad (5.10)$$

де -  $H$  - глибина водоймища,  $K_z$  - коефіцієнт вертикального турбулентного обміну, який є функцією швидкості вітру й глибини в заданій точці водоймища, може бути розрахований за формулою [15]:

$$K_z = \frac{\gamma_B WH}{4\rho a}, \quad (5.11)$$

де  $\rho$  - густина води,  $\gamma_B$  - стала, рівна  $3,25 \times 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup>;  $a$  - вітровий коефіцієнт, що приблизно береться Фельзенбаумом рівним 0,0125 для водоймищ обмежених розмірів;

$$\text{rot} T = \frac{\partial T_y}{\partial x} - \frac{\partial T_x}{\partial y}. \quad (5.12)$$

Це рівняння описує вихор, тобто векторну характеристику обертальної складової векторного поля  $T$ , а  $T$  обчислюється за формулами ( $T_x = \gamma_B W_x^2 \cos \alpha$  ;  $\gamma_B = 1,3(3+10h) \times 10^{-8}$  ;  $h$  - висота хвилі в метрах):

$$T_x = \gamma_B W_x |W_x| ; \quad T_y = \gamma_B W_y |W_y|, \quad (5.13)$$

де  $\gamma_B$  - параметр тертя вітру, що береться над морем рівним  $3,25 \times 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup>;  $|W|$  - модуль швидкості вітру,  $W_x$  і  $W_y$  - компоненти швидкості вітру на висоті 2 метра.

Фельзенбаум одержав наступні вирази для ухилів водної поверхні, яка піддається дії вітру:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial y} &= -\frac{3K_z}{g\rho H^3} \times \frac{\partial \Psi}{\partial y} - \frac{3\tau_x}{2\rho g H} \\ \frac{\partial \xi}{\partial x} &= -\frac{3K_z}{g\rho H^3} \times \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \frac{3\tau_y}{2\rho g H} \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

Тут  $\partial \xi / \partial x$  і  $\partial \xi / \partial y$  - ухили водної поверхні по осях  $X$  і  $Y$  ( $\xi$  - відмітка водної поверхні);  $\rho$  - густина води;  $g$  - прискорення сили тяжіння.

Горизонтальні складові швидкості течії по осях  $X$  і  $Y$  (тобто  $u$  і  $v$ ) визначаються через динамічні ухили, тобто

$$u = \frac{T_x}{K_z}(H - Z) + \frac{\rho g(H^2 - Z^2)}{2K_z} * \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad (5.15)$$

$$u = \frac{T_y}{K_z}(H - Z) + \frac{\rho g(H^2 - Z^2)}{2K_z} * \frac{\partial \xi}{\partial y}, \quad (5.16)$$

**Z**- глибина розрахункового горизонту.

*Схема обчислення  $\Psi$ ,  $\xi$ ,  $u$ ,  $v$ .*

1. Розрахунок поля повних потоків зводиться до розв'язання рівняння (5.10), записаного в скінченнорізницевій формі методом релаксації. Граничні умови приймаються (по контурах водоймища) як значення функції поля рівного нулю. На рідких межах, тобто на ділянках, де здійснюється водообмін (річки, канали, протоки) величини функції  $\Psi$  відповідають значенням припливу або відтоку.

2. По рівняннях (5.15) і (5.16) обчислюють значення горизонтальних складових швидкостей перебігу  $u$  і  $v$  на заданій глибині по осях  $X$  і  $Y$ .

3. По рівняннях (5.14) обчислюють значення ухилу водної поверхні  $\partial \xi / \partial y$  і  $\partial \xi / \partial x$

Розрахунки полів циркуляції під впливом вітру показані в роботах В.М.Тімченко для лиманів Причорномор'я. Найбільш докладні дослідження проведені для Сасикського лиману в зв'язку з його відділенням від моря, перетворенням у водосховище й опрісненням. Граничним контуром, що апроксимує водоймище, приймалася ізобата 0,25 метрів. На карті лиману розбивалася сітка через 5 км для кожного осередку. Глибини у вузлах сітки встановлювалися за статиметричними картами при постійному положенні рівня, усередненому за останні 10 років. При розрахунку течій по методу повних потоків одержана задовільна збіжність розрахованих і таких, що спостерігалися за даними в 212 точках вимірюваних течій. Аналіз результатів збіжності показав задовільну їх схожість за швидкостями течії - розбіжність складала не більше 1-2 см/с. Обчислені напрями течії не зовсім співпадають із фактичними - розбіжність в 20-40% і більше. Проте, положення основних циркуляційних зон, їх розміри й характер достатньо точно підтверджувалися матеріалами натурних вимірювань. Одержані карти течій для цього озера при різних напрямках вітру - північного, південного, західного й східного показані на рис.5.2. Застосовувався розрахунок для двох випадків - наявності скидання води з водосховища і її надходження по каналу з Дунаю. На схемах показані ізолінії функцій повних потоків - вони показують інтегральні (сумарні по глибині) напрями переміщення водних мас.



Наприклад, при північному напрямі вітру - уздовж водосховища - у південній його частині формуються дві основні циркуляційні зони. Їхнє виникнення й функціонування обумовлені взаємодією дрейфових і компенсаційних течій. Прибережні смуги по 3 км завширшки кожна зайнята дрейфовою течією, а центральна частина - компенсаційною течією. Західна циркуляція має форму циклональної, а східна - антициклональної. Уздовж берегів на південь іде однонаправлена дрейфова течія - воно займає повну глибину. Підрахована повна витрата цієї течії -  $160-180 \text{ м}^3/\text{с}$ .

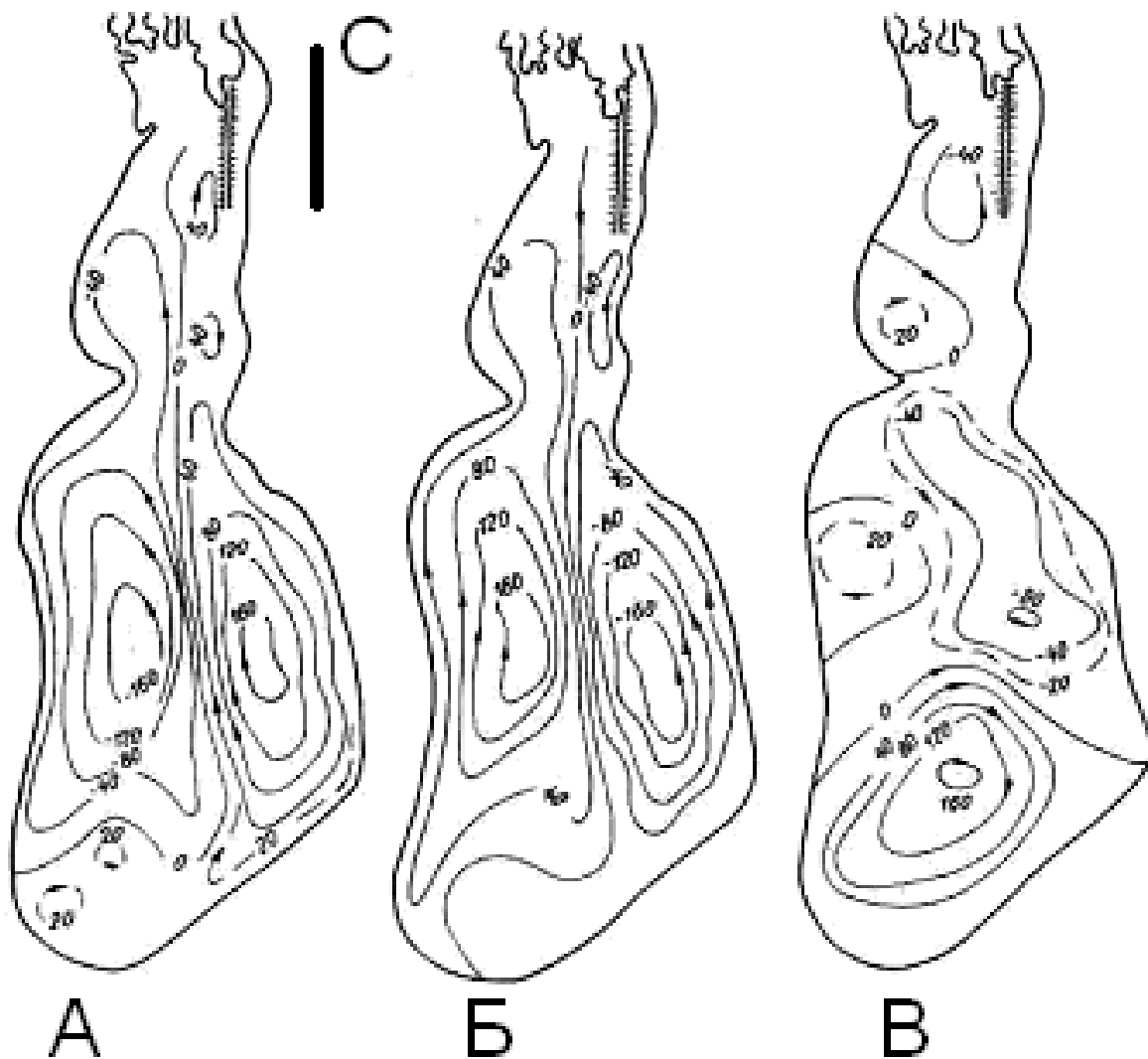


Рис.5.3. Інтегральна циркуляція (функція витрат,  $\text{м}^3/\text{с}$ ) Сасикського водосховища при північному(А), південному(Б) і східному(В) напрямках вітрів середньої інтенсивності (за даними В.М.Тімченко)

Швидкості течії виявилися тут досить високими - від 0,5 до 3-3,5 см/с. Поверхневі ж шари дрейфової течії переміщуються зі швидкістю 30-34 см/с. Проте наганяння води дрейфовими течіями вздовж берега в нижню частину водосховища створює зворотні по відношенню до напрямку вітру ухили водної поверхні, тому тут формується компенсаційна течія на північ. До цього потоку залучається майже вся водна маса найбільш глибоководної центральної частини водоймища, за винятком верхнього шару води 20-30 см, де завдяки зусиллям дотичних напрямів вітру на водну поверхню. Ілюстрацією цьому може служити діаграма течій, показана на рис. 5.2. Загальну витрату компенсуючої течії складає більше 300 м<sup>3</sup>/с води. Найбільші швидкості цієї течії - 6-7,5 см/с спостерігаються на глибині 1,0 - 1,5 м.

Аналіз карт циркуляційних течій на Сасику показує, що при північних і південних вітрах в озері спостерігається досить інтенсивний водообмін між північною й південною частиною озера. Компенсаційні потоки можуть переносити з південного району в північний витрати до 80 м<sup>3</sup>/с - це стік середньої річки. Враховуючи, що переважаючими тут є вітри північних напрямів, в озері повинна спостерігатися інтенсивна зміна вод окремих частин озера.

При вітрах широтного напрямку формуються самостійні циркуляційні зони. При східному вітрі дрейфова течія направлена зі сходу на захід, а компенсаційне - підводне - у зворотному напрямі. Це створює відчутну циркуляцію в широкій південній частині озера з витратою 160 м<sup>3</sup>/с і швидкостями до 20 см/с.

Застосування методу повних потоків відкриває широкі можливості дослідження закономірностей формування гідродинамічних, гідрохімічних і гідробіологічних полів у водоймищах при різних формах циркуляції в умовах найбільш частих тут вітрів. По-перше, можна уточнити місце розташування насосних станцій для опріснення лиману. Саме цього не було зроблено при проектуванні. По-друге, швидкість течії у водоймищі є одним із вирішальних чинників процесу аеробного самоочищення. Установлено, що вплив динамічної частини режиму на показник біохімічного окислення забруднюючих речовин пропорційний швидкості течії. Тому, за даними циркуляції можна встановити розташування зон підвищеного біохімічного окислення й зниженого. Тобто можна виділити зони, що сприяють очищенню вод від забруднень. Це дозволить встановити якнайкращі місця раціонального розташування водопостів і інших об'єктів. По-третє, за допомогою аналізу карт циркуляцій течій можна встановити найбільш ефективні схеми розпріснення озера, чого не було зроблено на стадії проектування. У результаті допущені значні економічні збитки.

У роботі Тімченко В.М. були проведені чисельні експерименти для напрямів по 8-ми румбам вітрів - підрахований сольовий баланс різних частин водосховищ. Для північної частини водосховища, які використовуються в основному для зрошування, обчислювалася мінералізація. У результаті розрахунків вийшла та ж цифра стабілізації мінералізації - на рівні  $1,32-1,33 \text{ г/дм}^3$ , що й у реальних умовах зараз вимірюється, тобто, на рівні дещо більше гранично допустимої. Авторами дослідження було допущено, що солоність у північній частині лиману можна понизити за рахунок зміни гідродинамічних умов у водоймищі. Для цього необхідно підвищити рівень НПГ Сасика на 2,5 м, при цьому солоність тут стане  $1 \text{ г/дм}^3$  і стабілізується. А якщо відвести забруднений стік річок Когильника й Сарати, то мінералізація тут знизиться до  $0,8-0,85 \text{ г/дм}^3$ .

Характер циркуляції у водоймищі визначає розподіл по водоймищу молоді риби. Інші гідроекологічні показники також залежать від характеру вітрових циркуляцій і течій у водоймищах.

### **5.3 Основні показники зовнішнього і внутрішнього водообміну**

Водообмін у водоймищах підрозділяється на *зовнішній* і *внутрішній*.

*Зовнішній* водообмін - заміна вод, що знаходяться у водоймищі, на нові, такі, що надходять іззовні. *Внутрішній* водообмін здійснюється в самому водоймищі різними видами руху (*течія, хвилювання, перемішування*) шляхом переміщення об'ємів води з однієї ділянки або шару водоймища в іншій.

#### *Зовнішній водообмін.*

Зовнішній водообмін спостерігається в стічних озерах, що живляться річкою, водосховищах на річках, у лиманах і т.д. З тими водами, що надходять у водоймища, або витікають із них, переміщуються наноси, розчинені речовини, а часто й планктон. Тому чим активніший водообмін, тим швидше можуть змінюватися фізико - хімічні властивості водоймища.

Проте не всі води водоймища мають однакову інтенсивність водообміну. Наприклад, глибокі частини водосховищ обмінюватимуть свої води швидше, ніж вода застійних ділянок - плесо й затоки. Води верхніх шарів озер частіше обмінюються, ніж води глибоких шарів.

Існує поняття *коефіцієнта водообміну*. Він визначає інтенсивність зміни маси води водосховищ за певний проміжок часу. Для багаторічного періоду коефіцієнт водообміну водосховища запишеться так:

$$\bar{k} = \frac{W_C}{W_B} \quad (5.17)$$

де  $\bar{k}$  - коефіцієнт річкового водообміну,  $W_C$  и  $W_B$  - відповідно середні за рік об'єми стоку води з водосховища і об'єм водосховища.

Наприклад, у Каховському водосховищі середній коефіцієнт водообміну  $\bar{k}$  складає 2,5, що означає - води всього об'єму водосховища змінювалися повністю 2,5 разу на 1 рік, а для максимальної водності року цей коефіцієнт вище - 4,6 разу на 1 рік. Тому, для повної характеристики водообміну необхідно його розраховувати окремо для років різної водності.

При інтенсивному водообміні зі значним транзитом через малі водосховища й озера разом із транзитом проходять завислі й розчинені речовини, а при сповільненому водообміні для крупних водоймищ переважає акумуляція вод із речовинами, що містяться в них.

Таким чином, по інтенсивності водообміну розрізняються групи водних об'єктів:

1. *Транзитна група* (річки й значна частина малих водосховищ добового регулювання) з інтенсивним водообміном. Їхній коефіцієнт водообміну складає більше 100.

2. *Транзитно-акумулятивна група* - проточні озера, крупні й середні водосховища добового й тижневого регулювання (Київське, Канівське, Дніпродзержинське, Запорізьке водосховища),  $\bar{k}$  змінюється від 100 до 4. Транзит тут відіграє основну роль, але дає себе знати акумуляція.

3. *Акумулятивно-транзитна група* - стічні озера зі сповільненим водообміном, водосховища сезонного, річного регулювання мають  $\bar{k}$  від 0,1 до 4 (Кременчуцьке і Каховське водосховища). Тут спостерігається акумуляція води й речовин, а транзит має другорядне значення.

4. *Акумулятивне водоймище* - Світовий океан. Його повний водообмін 2500 років.

Характеристики водообміну змінюються по довжині водосховищ - максимальний водообмін спостерігається в зоні виклинювання підпору, найменший - у найширшій частині водосховища.

У гідроекологічних процесах певну роль відіграє чинник *проточності водоймищ*. Під проточністю розуміють середню швидкість перебігу води у водосховищі за певний проміжок часу. Коефіцієнт водообміну не може врахувати швидкості течії, оскільки він не враховує морфологічні особливості чаші озера або водосховища. Так, якщо ширину водосховища збільшити в декілька разів (не змінюючи його загального об'єму), то при одному й тому ж коефіцієнті водообміну це водосховище перетвориться на об'єкт акумулятив-

ний, але швидкість течії його вод зменшиться, а активізується осад зважених наносів. Це приведе до збільшенні прозорості води і зросте біологічна продуктивність в водоймищі.

Установимо критерії проточності. Середня річна швидкість течії обчислюється по формулі:

$$V = \frac{Q}{F} \quad , \quad (5.18)$$

де  $V$ ,  $Q$  і  $F$  - середньорічні значення для всього водосховища, - відповідно швидкості течії води, витрати води, площі поперечного перерізу. Остання обчислюється для всього водосховища з урахуванням його довжини  $L$  і середньорічного об'єму вод  $W_{\text{с}}$  у ньому, а саме:

$$F = \frac{W_B}{L} \quad . \quad (5.19)$$

Средньобагаторічний об'єм водосховища можна пов'язати зі середньобагаторічним об'ємом сезонного регулювання стоку  $W_{\text{с}}$ :

$$Q = \frac{W_{\text{с}}}{31,5 \cdot 10^6} \quad , \quad (5.20)$$

де  $31,5 \cdot 10^6$  - середньорічна тривалість року, с.

Після підстави формул (5.19) і (5.20) в формулу (5.18) одержимо вираз для середньої швидкості перебігу води у водосховищі в такому вигляді:

$$V = \frac{W_{\text{с}} L}{31,5 \cdot 10^6 \cdot W_B} = \bar{k} \alpha \quad (5.21)$$

де  $\bar{k}$  - коефіцієнт водообміну згідно з формулою (5.17), а  $\alpha$  □ - постійний для даного водосховища множник, рівний  $L \cdot 31,5 \cdot 10^6$ , який залежить від морфометричної характеристики водоймища ( $L$ ) і характеристики часу (кількість секунд в році).

Цей коефіцієнт проточності показує середню швидкість течії води у водосховищі від його вершини до дамби протягом розрахункового періоду.

### *Внутрішній водообмін*

Внутрішній водообмін пов'язаний із переміщенням і змішуванням водних мас в самому водоймищі. Він може бути пов'язаний як із зовнішнім водообміном і водним балансом, так і з перемішуванням (горизонтальним і вертикальним турбулентним обміном).

Переміщення об'ємів пов'язане зі стічними течіями, надходженням води від попусків і т.д. Турбулентне перемішування виникає за рахунок вітрохвильових явищ і течій (стічних і вітрових). За інтенсивністю внутрішнього водообміну визначають коефіцієнти горизонтального й вертикального турбулентного обміну, які розраховуються по характеристиках хвиль, течій.

Коефіцієнт горизонтального обміну у верхньому шарі водосховищ змінюється від  $0,14 \cdot 10^6$  до  $1,9 \cdot 10^6$  г/(см·с), а вертикального (в поверхневому шарі) від 30-35 г/(см·с) при вітрі 5 м/с, до 200-250 г/(см·с) при вітрі 20 м/с. Турбулентне перемішування зменшується із глибиною.

### *Перемішування вод.*

Перемішування вод відноситься до одного з найважливіших із екологічного погляду елементів внутрішньоводоемної динаміки. Виділяють 2 види перемішування - молекулярне й молярне.

*Молекулярне* відбувається за рахунок неоднорідності нагріву водної товщі. Воно має мале значення для вирівнювання полів течій, температур, розчинених речовин, інших компонентів.

*Молярне* перемішування грає основну роль у цих процесах на річках і водоймищах. Цей вид перемішування відбувається під дією нерегульованого турбулентного руху води, яких може з'явитися під дією термічних причин (*конвективне перемішування*) або динамічними (*вимушена конвекція*).

*Конвективне перемішування* виникає при нестійкій температурній стратифікації у водоймищах у другій половині літа при охолодженні води. У зонах водоймищ, де рух води сповільнений, цей вид перемішування є вирішальним для вирівнювання фізичних і хімічних характеристик вод у просторі водоймища. Особливо велике значення має це для глибоких ділянок водоймищ і зон мілководдя, що не мають активного водообміну з основною частиною водосховища, або захищених від вітру.

*Динамічне (турбулентне) перемішування* (турбулентна дифузія) пов'язане з наявністю при різних видах руху води вертикальних і горизонтальних градієнтів швидкості. Це найбільш дієвий чинник впливу на водні маси, суспензії, розчин, газ, біологічні об'єкти водоймища й водотоків.

Можна виділити такі головні напрями впливу турбулентної дифузії на процеси фотосинтезу:

1. Посилюється обмін між зоною живлення клітини організмів і навколишнім середовищем - під впливом турбулентності вони більш рівномірно розсіваються у воді, ослаблюється їхня конкуренція, посилюється фотосинтез.

2. Посилення фотосинтезу планктону за рахунок його переміщення під впливом турбулентних струмів у вертикальному напрямі із зон із великою кількістю живильних речовин, де ними запасаються початкові продукти біосинтезу, у бік поверхневих освітлених шарів води, що мають світлову енергію.

3. Посилюється біосинтез за рахунок зміни світлових і “темнових” реакцій при перенесенні клітини у глибоких водоймищах поперемінно з освітленої в затемнену зону. Правда, ослаблення продукційних процесів може спостерігатися при переміщенні кліток у шари з несприятливими для фотосинтезу умовами.

Для водоймищ перемішування вод - один із найважливіших в екологічному відношенні чинник внутрішньоводної динаміки. Перемішування буває *термічним* (конвективним) і *динамічним* (вимушена конвекція). Конвективне перемішування виникає при нестійкій температурній стратифікації. Найсильніше воно виражене в другій половині літа - при охолодженні водних мас із поверхні. Це приводить до вирівнювання хімічних, біологічних, фізичних характеристик вод у просторі - для ділянок різких змін глибини. Динамічне перемішування пов'язане з наявністю вертикальних і горизонтальних градієнтів швидкості. При цьому слід пам'ятати про походження турбулентності рухів. Вони походять від нестійких великомасштабних течій у водоймищі (великомасштабна турбулентність) або генеруються поверхневими хвилями, вихорами Ленгмюра й ін.

Важливим показником турбулентності служать коефіцієнти горизонтальної  $K_l$  і вертикальної  $K_z$  турбулентної дифузії (перемішування). Нижче представлено напівемпіричне рівняння турбулентної дифузії якої - небудь домішки:

$$\frac{\partial \bar{S}_i}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{S}_i}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{S}_i}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{S}_i}{\partial z} = K_L \left( \frac{\partial^2 \bar{S}_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{S}_i}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial \bar{S}_i}{\partial z} \right) \quad (5.22)$$

де  $u, v, w$  - усереднені значення компонентів швидкості течії по ординатах  $x, y, z$ ;  $S_i$  - концентрація домішки.

Розв'язання цього рівняння щодо  $S = f(x, y, z, t)$  виконується для деяких умов - морфометрії чаші водоймища, гідравлічних умов, поля певних швидкостей і ін.

Проте найбільшою трудністю для розрахунків є визначення коефіцієнтів  $K_L$  і  $K_z$ , які не постійні й залежать від багатьох чинників. Закриті водой-

мища, зокрема, лимани Північно-західного Причорномор'я, мають обмежені розміри, як за шириною, так і за глибиною, тому можна прийняти ці коефіцієнти по вертикалі постійними, оскільки масштаб турбулентності при розмірах потоку, відповідного глибині.

Тому розраховують коефіцієнт вертикального турбулентного обміну  $A_z = cK_z$  (де  $c$  - густина води), а  $A_z$  обчислюють за формулою Караушева:

$$A_z = \frac{gH\nu}{C(0,7C + 6)}, \quad (5.23)$$

де  $C$  - коефіцієнт Шезі, а  $H$  – глибина водойми.

Коефіцієнт горизонтальної турбулентної дифузії можна встановлювати шляхом спостереження над розсіюванням у водному просторі штучно введеної домішки фарбника (флуоресцеїн, уранін й ін.). Фіксують зміну концентрації фарбника або розміри "хмари" зафарбованої води. Дрібномаштабна турбулентна дифузія досліджується за допомогою дифундуючих індикаторів - розчину калія або фураніна.

У кожному досліді визначався час розсіювання зафарбованого потоку до максимального розміру, видимого візуально –  $t_{max}$  і  $r_{max}$  – радіус закрашеного об'єму при максимальному його розмірі:

$$K_L = \frac{r_{max}}{4t_{max}}. \quad (5.24)$$

Досліди на лиманах (Сасик, Тілігульській, Хаджібей) показали, що помітний вплив на  $K_L$  роблять морфометричні характеристики водоймищ, і їх глибини, а також метеорологічні – вітер і водна рослинність.

За даними вимірювань із застосуванням середніх трасерів (поплавці з парашутами) одержані наближені залежності

$$K_L = \frac{\Delta l^2}{2\Delta t}, \quad (5.25)$$

де  $\Delta l$  - відстань між індикаторами через інтервал часу  $\Delta t$ .

Таким чином, наведене вище диференціальне рівняння дифузії при встановлених коефіцієнтах турбулентної дифузії може бути вирішено - для різних точок водоймища можна встановити значення концентрації заданого елемента на заданий момент часу.



### Питання для самоперевірки.

1. Основні види динаміки водних мас, їхнє екологічне значення
2. Циркуляція Ленгмюра, її вплив на біологічну продуктивність водної екосистеми.
3. Особливості полів вітрової циркуляції у водоймищах.
4. Основні показники зовнішнього й внутрішнього водообміну у водоймах.
5. Класифікація водоймищ по інтенсивності водообміну.
6. Види перемішування природних вод, їхнє гідроекологічне значення.
7. Визначення коефіцієнтів турбулентного перемішування вод у водоймах.

## 6 БІОТИЧНІ ЧИННИКИ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

### 6.1 Трансформація речовин в гідроекосистемах

Біотичні чинники функціонування водних екосистем розглянемо на прикладі схеми екосистеми озера на рис.6.1.

Сонячна енергія надходить у верхній шар водної товщі (фотичний шар) і обумовлює складні біохімічні процеси за участю фотосинтезу з утворенням первинної біологічної продукції - так звані *продуценти*. Їхня основна маса включає дрібні плаваючі рослини, як правило, водорості, звані *фіто-планктоном* (від грец. phyton - рослина, plankton - блукаючий), які поширені в товщі води на глибину проникнення світла. При достатку фітопланктону вода стає зеленуватою, в інших випадках продуценти не помітні випадковому спостерігачу, а неспеціаліст не підозрює про їхню присутність. Проте у великих глибоких ставках, озерах фітопланктон грає набагато більшу роль у виробництві їжі для всієї екосистеми, ніж укорінена рослинність, яку також відносять до продуцентів – це вища водна рослинність (макрофіти) - очерет, рогоз, рдест та інші.

Усі ці водорості й рослини використовують поживні речовини - звичайно, це з'єднання певних хімічних речовин у воді й донних відкладеннях, а також променеву енергію сонця, розмножуються, ростуть, накопичують у со-

бі, тобто синтезують шляхом фотосинтезу власну речовину. *Фотосинтез* - перетворення зеленими рослинами й фотосинтезуючими мікроорганізмами променевої енергії в енергію хімічних зв'язків органічних речовин. Це відбувається за участю поглинаючих світло пігментів (хлорофілів та ін.).

Інший вид водних організмів - *консументи*. Вони мають декілька видів.

*Первинні консументи* або *рослиноїдні тварини* харчуються безпосередньо живими рослинами або їхніми частинами. У ставку є два типи первинних консументів: *зоопланктон* (тваринний планктон) і *бентос* (донні форми), відповідні двом типам продуцентів.

*Вторинні консументи* або *м'ясоїдні*, такі, як хижі риби в озері харчуються первинними консументами або іншими вторинними консументами (стаючи тим самим *третинними консументами*).

Ще один важливий тип консументів представлений *детрітофагами*, які існують за рахунок дощу органічного детриту, падаючого з верхніх автотрофних ярусів. Разом із рослиноїдними детрітофаги служать їжею для м'ясоїдних. Багато, а можливо, навіть і всі детрітоядні тварини одержують велику частину їжі, переварюючи мікроорганізми, що заселили частинки детриту.

*Редуценти* або *сапротрофні* організми - бактерії, жгутикові, гриби поширені повсюдно, але особливо численні ці організми на поверхні розділу мула й води. За сприятливих температурних умов перші стадії розкладання відбуваються швидко.

Мертві тварини й рослини зберігаються недовго й незабаром розпадаються на частини в результаті сумісної дії детрітоїдів та мікроорганізмів. Частина елементів живлення, що містяться в них, вивільнюється для повторного використання. Як уже наголошувалося, стійка фракція детриту, наприклад, целюлоза, деревина, гумус, не розкладаються, і це додає губчасту структуру донним опадам; така структура забезпечує зручним середовищем безліч дрібних істот, частина з яких переводять атмосферний азот у форми, придатні для рослин (фіксація азоту), або виконують інші функції, корисні для всієї екосистеми. Це й дало даній групі організмів назву «редуценти» (латинською – «поновлюючі»).

Часткову стратифікацію ставка на верхню «зону продукування» й нижню «зону розкладання й регенерації елементів живлення» можна ілюструвати вимірюваннями добового обміну речовин у стовпі води за участю кисню. Для цієї мети використовують метод «світлих і темних судин». Він полягає в тому, що проби води з різних глибин беруть у попарно зв'язані бутлі; один бутель із пари («темний») обернено чорною матерією або алюмінієвою фольгою, щоб виключити проникнення світла. Інші, паралельно взяті проби води, «фіксуються» за допомогою хімічних реактивів, щоб пізніше в лабораторії можна було визначити початковий вміст кисню на кожній глибині. Потім

спарені темні й світлі бутлі занурюють на тросі в ставок так, щоб проби опинилися на тій же глибині, з якої були взяті.

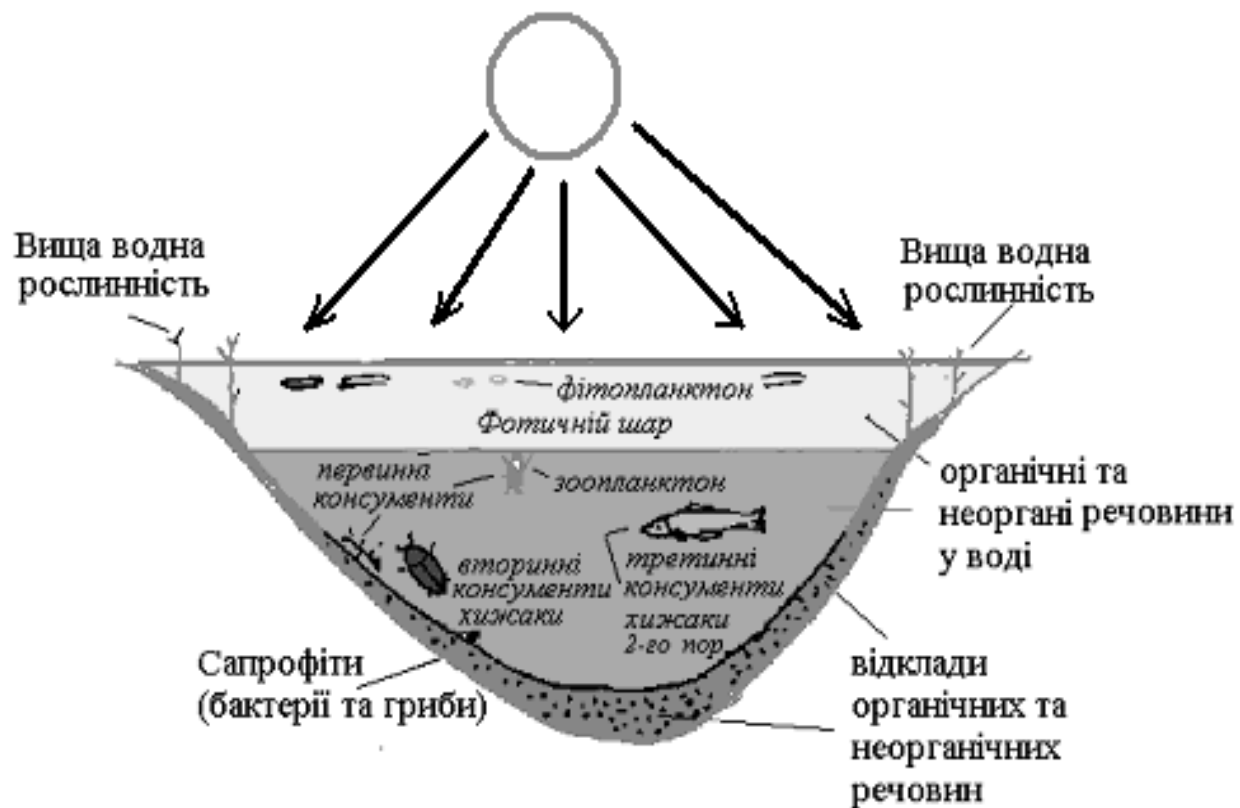


Рис. 6.1- Схема екосистеми водоймища.

Через 12 годин трос із бутлями витягують, визначають у кожній пробі зміст кисню й порівнюють із початковою його концентрацією. Зменшення кількості кисню в темних бутлях служить показником інтенсивності дихання продуцентів, що знаходилися в пробі, і консументів (тобто всього співтовариства), а зміна кількості кисню у світлому бутлі відображає різницю між споживанням кисню при диханні і його виділенні при синтезі - це чиста продукція кисню в об'ємі відібраної проби. Загальна кількість проведеного в результаті синтезу кисню рівна сумі кисню, що пішов на дихання, його приросту у вигляді чистої продукції показує результат сумарного фотосинтезу (продукції їжі).

Усі описані вище чинники - *абіотичні й біотичні* - є елементами *біологічного кругообігу речовин і кругообігу енергії*.

## 6.2 Передача речовин по трофічних ланцюгах

За один рік на Землі за рахунок фотосинтезу утворюється 150 млрд. тонн органічної речовини. У процесі фотосинтезу виділяється близько 200 млрд тонн вільного кисню й засвоюється 300 млрд тонн вуглекислого газу.

Основна частина рослинної маси у водоймищі зосереджена у фітопланктоні - це і є продуценти. У результаті фотосинтезу вони створюють органічну речовину за рахунок неорганічної (сонячної енергії й хімічних речовин і ін.). Ця речовина є їжею для наявних у воді дрібних водних організмів (зоопланктону), деяких видів риб - це первинні консументи. Первинні консументи служать їжею для крупніших тварин - вторинних консументів (хижаків). Таким чином, консументи є біологічною продукцією водоймища. Гинучи, вони стають здобиччю бактерій (редуценти), розкладаються ними до мінеральних складових, які знов використовуються для утворення первинної продукції, або відкладаються на дні водоймища.

Описаний вище біологічний кругообіг можна охарактеризувати кількісними показниками компонентів. Дійсно, у біологічному кругообігу частина мінеральних й органічних речовин бере участь у такому кругообігу - сонячна енергія й абіотичні чинники - первинна біологічна продукція, консументи - мінеральні й органічні речовини. Таким чином, виходить дуже складний *харчовий ланцюг*, ланки якого залежить один від одного - зникнення фітопланктону приводить до зникнення зоопланктону, а отже, і вторинних консументов. Цей харчовий ланцюг називається *трофічним*.

У створенні трофічних ланцюгів беруть участь усі види, що мешкають в озері. Безперервний потік матерії й енергії постійно пронизує екосистему. При стабільній екосистемі її можна порівняти з великою трубою, в один кінець якої надходять мінеральні солі й сонячна енергія, а з іншого виходить жива речовина. Ця речовина може бути використана зовнішнім хижаком, наприклад, людиною, яка не живе в екосистемі озера. Виловлюючи рибу й поїдаючи її, людина сполучає останню ланку харчової мережі.

У більшості екосистем існує правило - чим вищий трофічний рівень біологічного об'єкту, тим нижче його маса. Так, за оцінками В.А.Ковди, загальна кількість біомаси на Землі складає  $3 \cdot 10^{12}$  тонни, причому, понад 95% цієї величини складають рослини й лише 5% - тварини. При порівнянні біомас із відповідними рівнями трофічного ланцюга утворюється свого роду піраміда біомас. Пірамідою ця схема названа тому, що існують для неї майже загальні правила - чим вище рівень, який займає організм у трофічному ланцюзі, тим менше загальна його біомаса в порівнянні з нижчими рівнями. Наприклад: вага людини (хлопчика) - 48 кг, теляти - 1035 кг; люцерна, яку

він з'їдає 8211 кг. Такі піраміди можна побудувати по самих різних екосистемах, у тому числі й по водних (див. рис.6.2).

У трофічних ланцюгах переходить від одного організму до іншого не тільки біомаса, але й усі інші види речовин. Деякі речовини, що спочатку були відсутні в природі, а потім синтезовані людиною, проходять через трофічні ланцюги незмінними. А оскільки розмір біомаси в екологічних пірамідах закономірно знижується при переході на кожен новий рівень, то концентрація цих синтетичних речовин (ксенобіотиків) на одиницю маси зростає. Приклад - ДДТ. Дослідження показали, що якщо в тілі водних рослин його було 0,04 г/кг біомаси, то в риб, що харчуються водними рослинами - 10 г на 1 кг біомаси, у великих риб (хижаків) - 50 г на 1 кг біомаси, а в птахів, які харчуються рибою - 75 г/кг. Тобто всього на чотири ланки концентрація ДДТ збільшилася в 1875 разів. Таким же чином нарастають концентрації радіоактивних речовин цезію, свинцю, кадмію та інших.

Великий набір речовин в екосистемах може руйнуватися в процесі екологічних циклів. Проте це відбувається в тому випадку, якщо надходження цих речовин не перевищує деякої граничної концентрації. Тому необхідно знати швидкість руйнування (асиміляція) заданої речовини даною екосистемою. Швидкість надходження в систему даної речовини не повинна перевищувати швидкість його асиміляції.

### **6.3 Передача енергії по трофічних ланцюгах**

Передача маси речовин по трофічних рівнях за допомогою фотосинтезу нерозривно пов'язана з передачею енергії. Потік енергії в екологічних системах від одного рівня трофічних ланцюгів до іншого також здійснюється по піраміді, показаній на схемі водної екосистеми. Вона зображена на рис.6.2. для водної екосистеми.

Передача енергії здійснюється за формою великого геологічного кругообігу. У давнину при формуванні біосфери в підземних шарах накопичена значна кількість речовин біологічного походження (типу редуцентів) - кам'яне вугілля, нафта, газ. Першоджерело її - сонячна енергія - рослинний і інший органічний світ - відмирання й мінералізація. Таким чином, сонячна енергія на вході геологічного кругообігу перетворилася завдяки фотосинтезу в енергію хімічних зв'язків - вугілля, нафти, газу.

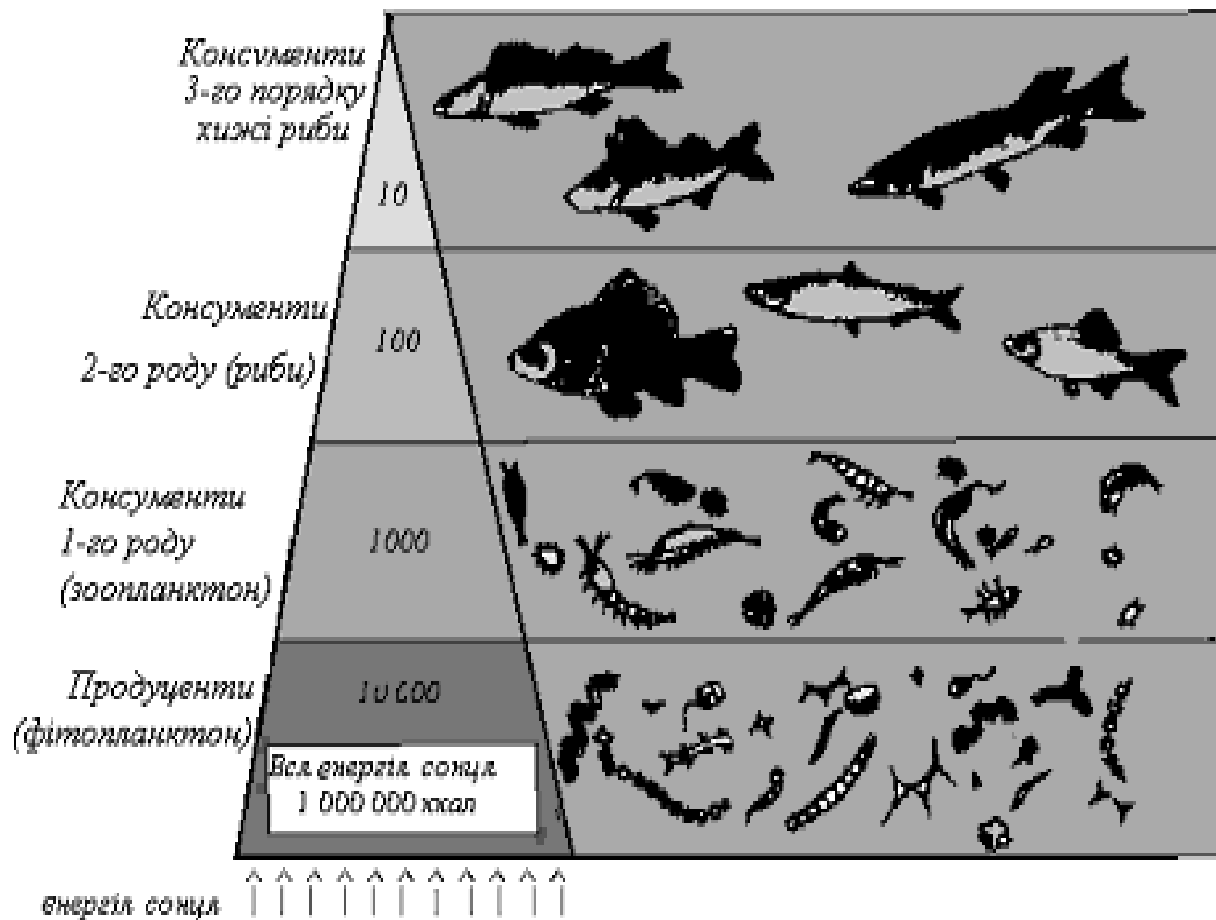


Рис.6.2 - Піраміда передачі енергії по ланках трофічного ланцюга

## 6.4 Біологічний кругообіг речовин

### 6.4.1 Основні закономірності кругообігу речовин

У кругообігу речовин відбувається багаторазова участь речовин у природних процесах, які завжди здійснюються в біосфері. Кругообіг речовин - це *кругообіг хімічних елементів*, які перетворюються живими організмами. В.Е. Некос так сформулював наступні закономірності кругообігів у біосфері.

А. Основною рушійною силою кругообігу речовин на планеті є жива речовина. Її діяльність, за допомогою системи кругообігів забезпечує поступальний розвиток біосфери Землі.

Б. В основі кругообігу речовини й енергії лежать два протилежні процеси - *творення й руйнування*. Перший (висхідна гілка) забезпечує утворення живої речовини й акумуляцію енергії, друга (низхідна гілка) - руйнування

складних органічних сполук і перетворення їх у прості мінеральні: вуглекислий газ, воду, різні солі й т.д.

В. Біосфера існує виключно за рахунок *безперервності кругообігів*. Енергетичною основою існування біологічних кругообігів є процес фотосинтезу. Дякуючи йому в системі запасається величезна кількість сонячної енергії, перетвореної в потенційну хімічну енергію органічних речовин, яка в процесі деградації органічних речовин у мінеральні перетворюється на тепло, даючи початок новому циклу створення біологічних угруповань.

Г. Біологічні *процеси не є замкнутими або повністю зворотними*. Це підтверджується накопиченням біогенних опадів, збільшенням вмісту кисню в атмосфері й т.п.

Усі геосфери Землі зв'язані єдиним циклом абіотичних речовин, який одержав назву великий (геологічний) кругообіг речовин. Йому близько 4 млрд. років. Його рушійною силою є сонячна енергія й тектонічні процеси. У ньому задіяні рухи речовин в атмосфері, гідросфері й літосфері.

Після виникнення життя на Землі з'явилася нова форма міграції хімічних елементів - біогенна. За її рахунок на великий кругообіг речовин наклався малий (біогенний) кругообіг речовин. У цьому кругообігу живі організми завдяки передачі речовин по трофічних рівнях приводять у дію біохімічні цикли. Біохімічні цикли - циклічні переміщення біогенних елементів: вуглецю, кисню, водню, азоту, сірки, фосфору, кальцію, калію та ін. - з одного компонента біосфери до іншого, а на граничних етапах цього кругообігу перераховані елементи входять до складу живої речовини, забезпечуючи їхню життєдіяльність.

Просторове переміщення речовин у межах геосфер (їхня міграція) може бути таким:

- механічне переміщення (без застосування хімічного складу);
- водне (розчиняються у воді й переміщаються у формі колоїдів або іонів);
- повітряне (у формі газових аерозолів із повітрям);
- біогенне (з урахуванням живих організмів);
- техногенне - у результаті господарської діяльності.

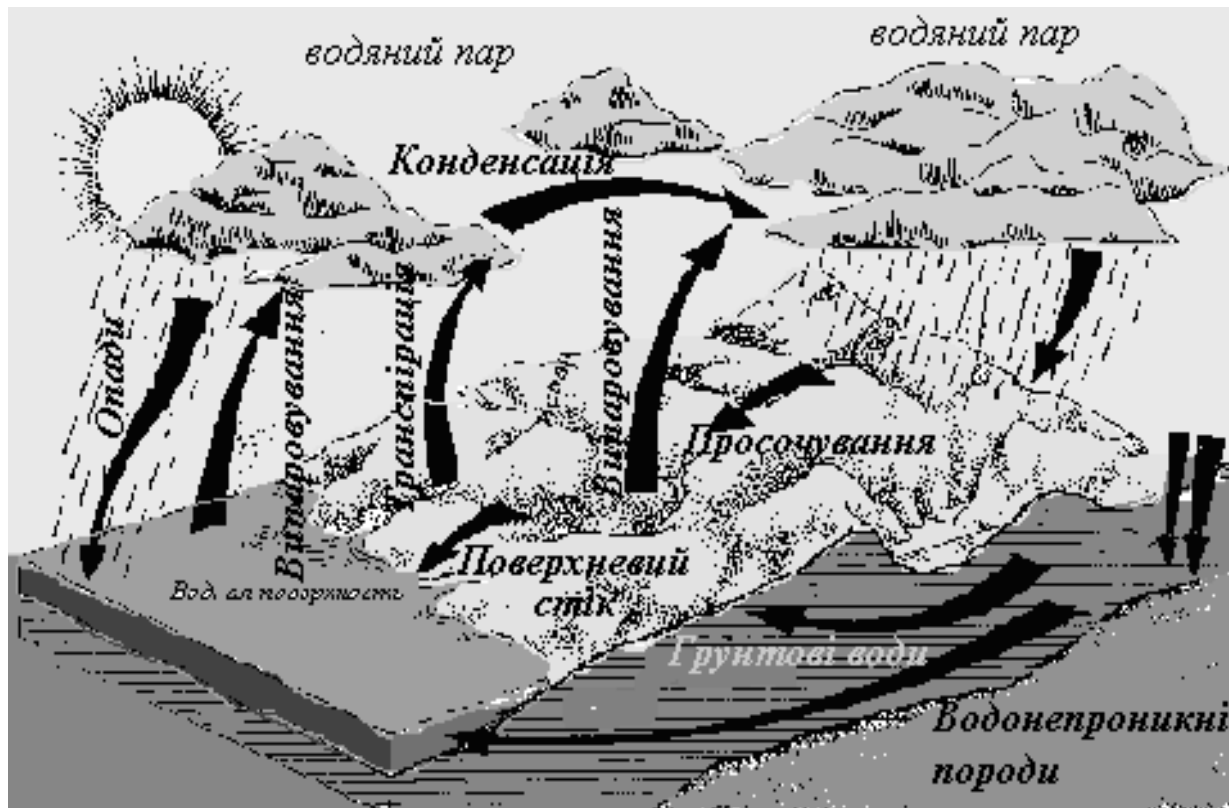
Нижче наводиться короткий опис кругообігів окремих речовин у біосфері, у якій так чи інакше залучені й водні екосистеми.

#### **6.4.2 Кругообіг води**

Вода є середовищем для живих організмів, вона ж входить до складу людини, тварин, рослин. У процесі фотосинтезу вона поставляє водень для

побудови органічних сполук. *Вода, точніше, молекули води є джерелом кисню, що виділяється при фотосинтезі.*

Вона знову утворюється при диханні рослин (процес, протилежний фотосинтезу). Та все ж жива речовина не відіграє визначальної ролі у великому кругообігу води на земній кулі. Біологічної води в складі живих організмів усього 0,003%. Безпосередньо на синтезування біомаси витрачається всього 1% від загальної планетарної її кількості. Проте для утворення 1 кг біомаси використовується 130-230 кг води, тому біологічна частина циклу дуже активна. Схема кругообігу води показана на мал. 6.1.



Мал. 6.3 - Кругообіг води (за В.Ю.Некосом).

*Енергія Сонця є рушійною силою цього кругообігу. Вона витрачається на випаровування води з поверхні водних басейнів або суші, а також на перенесення, перерозподіл вологи по поверхні Земної кулі. Випаровування й випадання опадів приблизно однакові й складають близько 520 тис. км<sup>3</sup> за рік. Сумарний об'єм води на Землі складає 1600-2500 млн. км<sup>3</sup>.*

*Випаровування й транспірація визначають механізм кругообігу води.*



Основними чинниками випаровування є температура повітря й ґрунту, їхня вологість, швидкість вітру. Окрім цих чинників транспірація залежить також від виду рослин, їхнього фізіологічного стану та ін. Для виробництва 1 тони сухої маси рослин необхідно в середньому 200-1000 тонн води, при цьому на фотосинтез витрачається всього 0,05-0,3% всієї води, що пройшла через рослини.

Витрата води за рік транспірація в межах території нашої країни досягає 3-4 тис. км<sup>3</sup>, що складає 1/3 річної кількості опадів. Для порівняння - на побутові потреби йде всього близько 2,5% від загальної кількості опадів. Приведені дані свідчать про значну роль рослинності у формуванні водного балансу річкових водозборів. Вони вказують також на вплив біологічних чинників на гідрологічні процеси.

З викладеного ясно, що транспіраційний потік (ґрунт - листя - атмосфера) є в загальному для планети кругообігу *основним шляхом руху води через живу речовину*.

#### 6.4.3 Кругообіг вуглецю

У рослинах за участю сонячної енергії відбувається реакція фотосинтезу - вуглекислий газ розщеплюється, при цьому вуглець перетворюється на органічні речовини зеленої маси рослин, а кисень повертається в атмосферу. Маса вуглецю, що утворилася при відмиранні рослин або з'їданні її тваринами, окисленні, знову перетворюється на вуглекислий газ.

Одночасно із цією загальною схемою відбувається складна взаємодія атмосферної вуглекислоти з океаном - при низькій температурі води океану поглинають CO<sub>2</sub>, в інших обставинах вуглекислий газ десорбується з його поверхні. Нарешті, деяка частина вуглецю виявляється похованою або випадає в осад, тобто виключається із кругообігу. До теперішнього часу в карбонатних осадових породах зв'язано приблизно в 15 000 разів більше вуглекислого газу, чим міститься в атмосфері.

У той же час у гідросфері розчиненого вуглецю міститься в 16 разів більше, ніж в атмосфері (700 млрд. тонн у формі CO<sub>2</sub>). Найбільша кількість вуглецю міститься в літосфері (104 млрд. тонн).

У зв'язку з тим, що частина вуглецю виходить із кругообігу (органічні речовини не мінералізуються), за мільярди років існування біосфери величезні запаси вуглецю зосередилися у вапняках і інших породах, в органічних опадах. Тому в кругообігу вуглецю зараз беруть участь лише десяті долі відсотка вуглецю від його загальної кількості, що є на Землі.

Спалювання людиною деревної рослинності й використання горючих копалин збільшило виділення вуглекислого газу і його повернення із запасу в

атмосферу. За останні сторіччя кількість  $\text{CO}_2$  у атмосфері зросло на 13%. На рис. 6.4. показано довготривале наростання атмосферної вуглекислоти, головного парникового газу, починаючи з 1958, у значній мірі через антропогенний вплив.

Кругообіг вуглецю безпосередньо впливає на енергетику атмосфери - збільшення концентрації  $\text{CO}_2$  в атмосфері приводить до так званого *парникового ефекту*. У науковій літературі широко обговорюється питання про *глобальне потепління клімату* на декілька градусів і про вірогідність підвищення рівня океану на 50-60 м із-за танення арктичних і антарктичних льодів. Проте ряд дослідників висловлює протилежне, вважаючи, що від спалювання копалин в атмосфері залишається тільки 1/3 з утвореного  $\text{CO}_2$ , а решта кількості, ймовірно, зв'язується океаном і рослинністю. Океан, може поглинути не менше половини тієї вуглекислоти, яка утворюється від спалювання органічного палива.

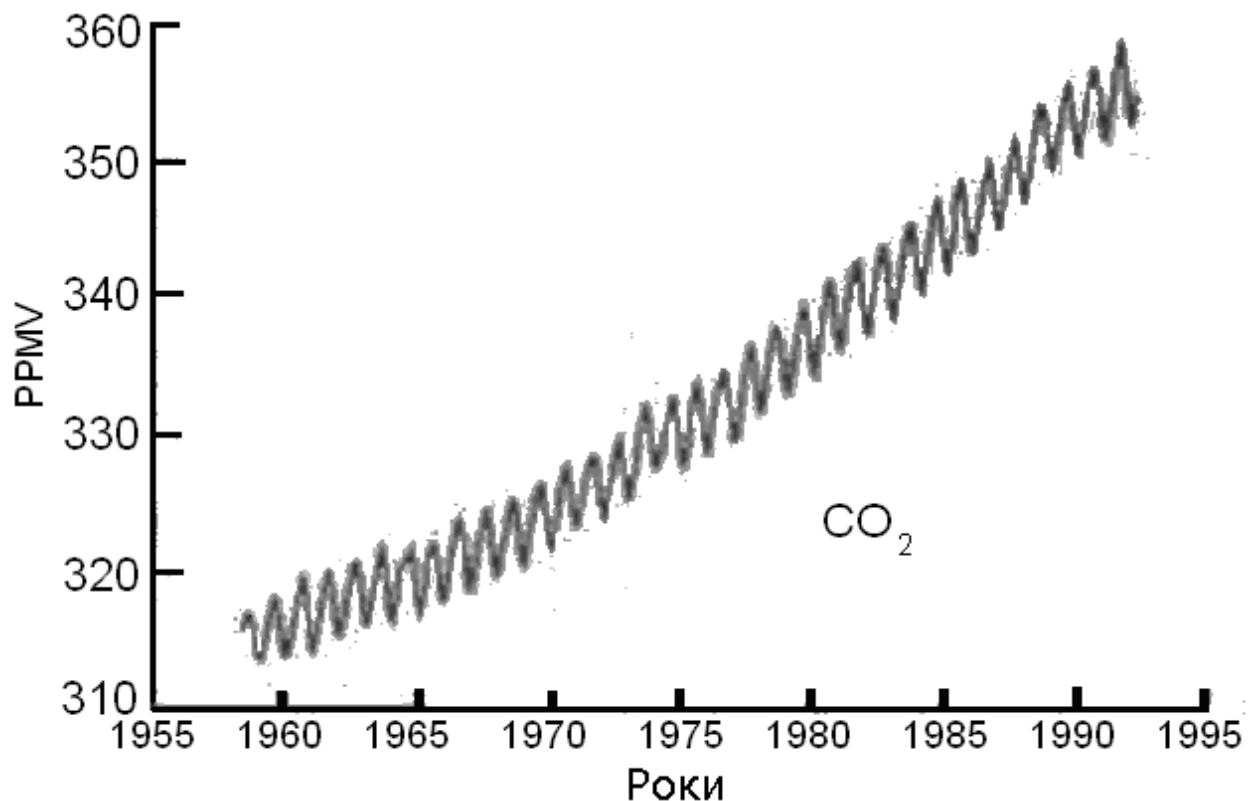


Рис.6.4 – Зміна середньої концентрації (у частках на мільйон об'єму-*ppmv*) двоокису вуглецю ( $\text{CO}_2$ ), спостереження на Обсерваторії Мауна Лоа на Гавайях за період з 1958 р. по 1995 р. (дані Центру Аналізу Інформації Двоокису вуглецю, Національна Лабораторія США).

В.Ю.Некос в посібнику „Основы общей экологии и неоекологии” ч. 1, Харьков – „Торнадо”, 1999 р. наводить дані про роль вуглекислого газу в житті людини, згідно з якими для нормального існування людини в складі повітря повинно бути 7% вуглекислоти й 2% кисню, а в ряді районів Землі кисню міститься до 21%. Це в 10 разів більше, ніж необхідно, а вуглекислоти ж повсюдно менше. Дитина до свого народження дихає виключно вуглекислотою, а після народження як би занурюється в кисневу «пожежу».

Життя на Землі виникло 4 млрд. років тому, коли вільного кисню не було зовсім, і не виключено, що тривалість життя багато в чому пов'язана з пониженим умістом кисню. В атмосфері Венери 90% вуглекислоти й 2% кисню. Схоже, саме там і слід шукати довгожителів, завершує цей аналіз автор.

#### **6.4.4 Кругообіг кисню**

Весь вільний кисень утворюється в результаті фотосинтезу. Рослинний покрив у процесі фотосинтезу щорічно виділяє близько 430-470 млрд. тонн кисню. Весь кисень атмосфери проходить через живу речовину приблизно за 2000 років.

Після появи фотосинтезуючих організмів, коли накопичилося досить вільного кисню й утворився озоновий екран, життя змогло вийти на сушу. Кисень входить у всі біологічні з'єднання. Він забезпечує дихання всього живого. У зв'язку з тим що кисень входить до складу багатьох неорганічних (вода, вуглекислота, карбонати) і органічних сполук (у живій речовині кисень складає близько 70%), його кругообіг достатньо складний. Основні гілки кругообігу – утворення в процесі фотосинтезу й поглинання в процесі дихання. Повний кругообіг води, що є джерелом кисню, здійснюється в біосфері приблизно за 2 млн. років. Таким чином, уся вода планети, весь кисень і водень уже зробили безліч циклів перетворень фотосинтезу й зворотних процесів - окислення органічної речовини вільним киснем.

Деякі дослідники вважають, що велика частина вільного кисню земної атмосфери (близько 99%) утворюється не шляхом фотосинтезу. На їх думку головним його джерелом є розкладання пари води в ультрафіолетових променях у верхніх шарах атмосфери. Другим джерелом вважається утворення кисню з оксидів азоту під впливом космічного випромінювання. Третій, менш важливий шлях, - надходження ядер кисню в атмосферу у вигляді компонентів космічних променів.

У даний час найбільший вплив на кругообіг кисню справляє діяльність людини. Людство щорічно споживає близько  $10^{10}$  тон молекулярного кисню.

Величезна кількість кисню витрачається при роботі двигунів внутрішнього згорання, а також у металургійному виробництві.

Цікаво, що за розрахунками дослідників загальна кількість молекулярного кисню в атмосфері складає  $0,8 \cdot 10^{15}$  тонн, у воді Світового океану -  $0,2 \cdot 10^{15}$  тонн. Отже, усього на поверхні планети міститься  $10^{15}$  тонн кисню.

#### 6.4.5 Кругообіг азоту

Разом з іншими елементами азот входить до складу більшості біологічно важливих органічних речовин усіх живих організмів: білків, нуклеїнових кислот, мікопротеїдів, ферментів, хлорофілу й т.д. Атмосфера включає 79% азоту, та все ж його часто не вистачає для живих організмів. Газоподібна форма азоту в біосфері хімічно малоактивна й тому безпосередньо не використовується вищими рослинами й тваринним світом. Рослини засвоюють так званий фіксований азот із ґрунту у вигляді іонів амонію або нітратних іонів.

Поява азоту в атмосфері в доступній для рослин формі здійснюється в процесі іонізації атмосфери космічними променями, а також при сильних електричних розрядах під час гроз. Це так звані небіологічні форми фіксації азоту, коли його амонійні й нітратні форми потрапляють з атмосферними опадами в ґрунт і водні басейни. Тому кількість нітратів у них залежить від інтенсивності й частоти гроз. Наприклад, на екваторі, де досить часті грози, атмосферні опади містять близько 2-3 мл/дм<sup>3</sup> азотної кислоти, у помірних широтах їх приблизно вдесятеро менше. У середньому 1 км<sup>2</sup> поверхні Землі одержує з атмосферними опадами за рік близько 1 т фіксованого азоту.

Та все ж біологічна фіксація атмосферного азоту значно переважає над небіологічною природною фіксацією. Це пов'язано перш за все з діяльністю ґрунтових мікроорганізмів і організмів, що живуть у симбіозі з вищими рослинами.

Азотфіксуючі аеробні бактерії освоюють молекулярний азот атмосфери за рахунок енергії, що одержується при окисненні органічних речовин ґрунту. Протягом року на 1 км<sup>2</sup> вноситься від 0,2 до 2,5 т фіксованого азоту. У місцях виходу на поверхню Землі газів нафтового конденсату підвищується температура ґрунтів. Ці зміни температури ґрунтів фіксуються при розвідці нафти з космосу.

Найефективніше фіксують азот бактерії, які мешкають на корінні бобових рослин і забезпечують рослину-господаря доступним азотом. Сімейство бобових, як відомо, налічує 13 тисяч видів, тому роль їх у підтримці кругообігу азоту дуже велика. Так, у посівах конюшини й люцерни вміст зв'язаного азоту досягає 150-400 кг/га в рік (15-40 т/км<sup>2</sup>).

Біологічна фіксація характерна й для деяких фотосинтезуючих організмів (синьо-зелених водоростей і тих, що фотосинтезують бактерії). Синьо-зелені водорості грають особливу роль у збагаченні азотом рисових полів.

Особливе значення в азотному балансі ґрунтів належить *промисловій фіксації атмосферного азоту людиною у формі агрохімічних азотистих добрив*. Рослини використовують його для побудови свого тіла й збагачують азотом весь тваринний світ і людство, передаючи його по трофічних ланцюгах. Останньою ланкою цих ланцюгів є мікроорганізми, які розкладають органічні речовини (амінокислоти, сечовину), що містять азот, з утворенням аміаку, гумусні речовини й компоненти осадових порід.

#### **6.4.6 Кругообіг фосфору, сірки, неорганічних катіонів**

Кругообіг *фосфору* в біосфері підтримується шляхом *мінералізації органічного й вивітрювання мінерального фосфору*.

Рослини засвоюють фосфор у вигляді іонів ортофосфорної кислоти. Кругообіг фосфору незамкнений. Рослини корінням поглинають фосфор із ґрунтів тільки частково. Решта його вимивається зі стоками дощових вод із ґрунту у водні басейни.

Велика кількість фосфатів міститься в ряді гірських порід. Частина фосфору з них поступає в ґрунт, частина переробляється в добрива (5-6 млн. т), велика кількість вилуговує й вимивається в гідросферу, де його вплив позначається на фітопланктоні й інших водних організмах.

Щорічно із суші в океани водним стоком виноситься від 3,5 до 20 млн. т фосфору. У Світовому океані втрати фосфору відбуваються в основному за рахунок відкладення органічних залишків на великих глибинах. Повернення його в літосферу здійснюється тільки біологічним шляхом: за рахунок споживання риби морськими птахами (утворення гуано), використання бентосу й рибної муки як добрива й т.п.

*Сірка* входить до складу сірковмісних амінокислот (цистеїну, метіоніну) і ряду інших важливих сполук. Ці амінокислоти підтримують структуру білкових молекул.

Сірка засвоюється рослинами тільки в окисненій формі у вигляді іона  $\text{SO}_4^{2-}$ . Тваринні організми засвоюють тільки відновлену форму сірки, включену до складу органічних речовин. Після відмирання тих і інших відбувається повернення сірки в ґрунт, де знову відбувається її перетворення мікроорганізмами.

В аеробних умовах мікроорганізми окисляють органічну сірку до сульфатів. А останні знову за допомогою коріння рослин включаються в кругообіг. Частина сульфатів залучається до водної міграції й виноситься із ґрунту.

У гумусових утвореннях сірка знаходиться в органічних сполуках і не вимивається. В анаеробних умовах при розкладанні органічних речовин утворюється сірководень.

Сульфатредуючі бактерії поширені в підземних водах, намулах і застійних морських водах. Сірководень - отрута для живих організмів, тому в таких середовищах майже немає життя. Таке, наприклад, Чорне море на глибинах понад 200 м.

При спалюванні кам'яного вугілля, нафтопродуктів, переробці сірки в повітря викидається окисел сірки, який при подальшому окисленні й розчиненні перетворюється на сірчану кислоту, згубну для живого.

Багато життєвих процесів у біосфері здійснюються за участю макро- і мікроелементів, серед яких виділяються деякі метали (магній, залізо, мідь, молібден). Вони входять до складу біологічно важливих молекул (хлорофілу, ферментів).

З водою рослини одержують катіони металів із навколишнього середовища. Вони з'являються в ґрунтах при руйнуванні материнських порід. У водоймища вони поступають із поверхневим стоком.

## 6.5 Поняття про процес фотосинтезу

*Фотосинтез у найбільш загальному розумінні* - це засвоєння вуглекислого газу рослинами й відновлення вуглецю з утворенням органічних речовин за участю поглиненої енергії світла й виділенні вільного кисню. Узагальнена схема процесу фотосинтезу зображена на мал. 6.5, представленому в роботі В.Е. Некоса, з якої запозичені наступні положення.

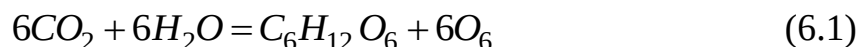
У процесі фотосинтезу виділяють три фази:

1) *фотофізична* - поглинання фотона світла й перехід його енергії в збуджений стан електронів;

2) *фотохімічна* - перехід енергії збудженого стану електронів в енергію хімічних зв'язків;

3) *біохімічна* - що включає процеси перетворення органічних речовин аж до утворення кінцевих продуктів фотосинтезу. Реакції біохімічної фази відбуваються за участю ферментів і стимулюються температурою, тому цю фазу йменують також термохімічною. Частіше дві перші фази називають *світловими*, а біохімічну - *темновою*, тому що для неї світло необов'язкове.

У спрощену формулу фотосинтезу входять по 6 молекул вуглекислоти (CO<sub>2</sub>) і води (H<sub>2</sub>O). У результаті фотосинтез призводить до утворення однієї молекули вуглеводню (глюкози C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) і 6 молекул кисню (O<sub>2</sub>).



Дослідження показали, витрати енергії власне на синтез біомаси дуже невеликий - усього 0.1-1% від загальної кількості сонячної радіації, що поступила. Те ж саме слід зазначити й про приріст сухої біомаси рослин за період біосинтезу - вона по вазі в 300 разів менше витрати транспірування води за цей же період. Таким чином, у природних умовах рослинний покрив освоює тільки незначну частину наявних енергетичних і водних ресурсів.

Причини цього явища пояснюються будовою випарювального листа рослини - він пронизаний безліччю малих отворів - устячок, які можуть відкриватися й закриватися. У листі міститься багато хлоропластів із великою кількістю зерен хлорофілу. Поверхня хлоропластів сполучається з атмосферним повітрям через устячка, через них надходить з повітря вуглекислота. Тому для розвитку процесу фотосинтезу поверхня хлоропластів повинна постійно знаходитися в зволоженому стані, оскільки вуглекислота може асимілюватися тільки у вигляді водного розчину. Тому відносна вологість повітря в міжклітинниках велика й значно перевищує відносну вологість атмосферного повітря. У листі спостерігається підвищена дифузія водяної пари в атмосферу, тобто транспірування рослини. Звідси й така непомірна витрата води.

Окрім цього, колосальна енергія витрачається на підтримку різниці температур листа й повітря в літніх умовах. Звичайно, ця різниця складає близько 5°C.

Таким чином, продуктивність рослини істотно обмежена метеорологічними чинниками на різних рівнях рослинного покриву, тобто особливостями фотосинтезу по вертикалі.

У процесах фотосинтезу бере участь тільки *фотосинтетична активна радіація (ФАР)*. Сонце випускає широкий спектр випромінювань. Рослини можуть використовувати енергію тільки певної частини цього спектра в діапазоні випромінювань з довжиною хвилі 400-700 нм., яку називають випромінюванням ФАР. Саме радіація ФАР забезпечує фіксацію вуглецю в тканинах рослин за допомогою пігментів на зернах хлорофілу. На цей діапазон припадає всього лише 14% всієї енергії Сонця, що досягає земної поверхні. Решта частини сонячного спектра не може служити джерелом енергії для земних рослин.

*Дихання рослин.* У найбільш загальній формі дихання - це процес зворотний фотосинтезу - молекула глюкози, взаємодіючи з 6 молекулами кисню, розчленовується на 6 молекул води й 6 молекул вуглекислоти. При цьому з одного моля глюкози (180 г) виділяється енергія 674 ккал теплоти.

Дихання займає величезне місце в життєдіяльності рослин. У ході цього процесу утворюються різноманітні органічні речовини, які використовуються для синтезу білків і інших важливих речовин.

Питання для самоперевірки.

1. Передача маси й енергії речовин по трофічних ланцюгах.
2. Основні закономірності кругообігу речовин у водній екосистемі.
3. Роль транспірації в кругообігу води.
4. Кругообіг вуглецю, його роль у глобальному потеплінні клімату.
5. Кругообіг кисню.
6. Кругообіг азоту.
7. Процес фотосинтезу, його фази.

## **7 ВПЛИВ ТВЕРДОГО СТОКУ Й ДОННИХ ВІДКЛАДЕНЬ НА ГІДРОЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН РІЧОК І ВОДОЙМИЩ**

### **7.1 Твердий стік і його вплив на гідроекологічні процеси**

Головною зоною формування твердого стоку є поверхня річкових водозборів. При розгляді процесів формування річкових наносів розрізняють поверхневий змив частинок зі схилів водозборів, глибинний і бічний розмив у первинних борознах, струмочках і русловій мережі.

Перенесення продуктів розмиву й змиву відбувається у формі руху завислих наносів, рухомих і розчинених. Основною характеристикою завислих наносів є мутність проби  $\text{г/м}^3$ . Вони у твердому стоці є основним елементом, займаючи по вазі понад 90% від загальної витрати твердого стоку  $R$   $\text{кг/с}$ . У зв'язку зі значною динамікою твердого стоку й мутності вод виникають утруднення у вивченні режиму мутності.

Дослідження показали, що визначення мутності води шляхом фільтрування відібраних проб через паперові фільтри дає задовільні результати тільки при великій мутності. При малій мутності через вимивання при фільтрації частини матеріалу, з якого складається фільтр, цей метод дає великі помилки.



Тому останнім часом рекомендується використовувати в основному мембранні фільтри, що мають пористу 3-вимірну систему з колоїдних розчинів нітроцелюлози.

Тверді частинки, що знаходяться у воді в завислому стані, змінюють режим освітленості водної маси, механічно впливають на гідробіоти. На твердих частинках адсорбується багато мікроелементів і забруднювальних речовин. Вони також забезпечують формування комплексу донних відкладів. Завислі наноси представляють основний транспорт для різного типу токсичних речовин, зокрема, таких небезпечних, як, наприклад, радіонуклідів, що потрапили на поверхню й у ґрунти після аварії на ЧАЕС. Проте, у зв'язку з тим, що деякі радіонукліди, наприклад, стронцій - 90, мають низькі сорбційні властивості й велику рухливість, вони знаходяться в поверхневому стоці в розчинених формах. У завислих наносах його опиняється всього 1% від загального складу наносів.

За висновком дослідників на річках України висока мутність річкових вод (Дунай, Дністер і ін.), пов'язана з тим, що в твердому стоці річок переважають фракції діаметром 0,005 - 0,15 мм. Це визначає ряд екологічних аспектів стану гирлових областей цих річок. Так, у гирлі Дунаю за інших рівних умов, великий вміст мінеральних частинок обмежує розвиток фітопланктону, бактеріо-планктону й інших планктонних організмів, чим певною мірою лімітується процес забруднення річок. У той же час, завислі частинки адсорбують на собі значну кількість забруднювальних речовин (до 80-90% від валового вмісту), таких як важкі метали й органічні сполуки - пестициди, нафтопродукти, феноли, СПАР і багато інших. Доведено, що на мулистій фракції наносів інтенсивно осідають іони металів - міді й марганцю.

Таким чином, суспензії твердих частинок у Дунайській воді, з одного боку, виступають як чинник концентрації токсикантів, з іншого - як показник самоочищення річкової води. Осадження суспензій у донні відклади річок або водосховищ призводить, звичайно, до зниження токсичності водних мас. Завислі наноси складають основну частину (до 90%) твердого стоку, тому нижче розглянемо їхні характеристики й гранулометричний склад.

## **7.2 Вплив механічного складу наносів на якість річкових вод**

*Механічний (гранулометричний склад) наносів дає уявлення про крупність частинок - зерен наносів - у їх процентному вмісті. З'ясування крупності частинок наносів у значній мірі доповнює відомості про твердий стік.*

Склад наносів визначає деякі непрямі властивості твердого стоку, зокрема його здатність до адсорбції й перенесення окремих форм забруднювальних речовин. У верхів'ях річок, де ухили річки й швидкості перебігу води великі, водний потік несе в завислому стані порівняно крупні частинки наносів.

У міру просування до гирла крупні наноси в зв'язку зі зменшенням швидкостей перебігу води осідають на дно річки, а дрібні переносяться вниз за течією. Зміна складу наносів по довжині річки пов'язана з тими, що безперервно відбуваються на шляху проходження процесів стирання крупних рухомих частинок наносів.

Гранулометричні аналізи наносів на гідрометмережі проводяться на ситах, піпеткою й фракціометрами. У Гідрологічному щорічнику вказується наведений у табл. 7.1 поділ на фракції по діаметру частинок у мм.

Таблиця 7.1 - Методи вимірювання наносів різної крупності.

| №№<br>п/п | Розміри частинок,<br>мм | Назва<br>наносів | Склад час-<br>ток | Методи вимі-<br>рювання    |
|-----------|-------------------------|------------------|-------------------|----------------------------|
| 1         | Більше 5,0              | Гравій           | Крупний           | Ситовий                    |
| 2         | 5,0 - 2,0               | - “ -            | Середній          | Ситовий                    |
| 3         | 2,0 - 1,0               | - “ -            | Дрібний           | Ситовий                    |
| 4         | 1,0 - 0,5               | Пісок            | Крупний           | Фракціометр                |
| 5         | 0,5 - 0,2               | - “ -            | Середній          | Фракціометр+<br>Піпеточний |
| 6         | 0,20 - 0,10             | - “ -            | Дрібний           | Фракціометр+<br>Піпеточний |
| 7         | 0,10 - 0,05             | Пил              | Крупний           | Фракціометр+<br>Піпеточний |
| 8         | 0,05 - 0,01             | - “ -            | Дрібний           | Фракціометр+<br>Піпеточний |
| 9         | 0,01 - 0,005            | Мул              | Крупний           | Фракціометр+<br>Піпеточний |
| 10        | 0,005 - 0,001           | - “ -            | Дрібний           | Фракціометр+<br>Піпеточний |
| 11        | Менше 0,001             | Глина            | Глина             | Фракціометр+<br>Піпеточний |

Для визначення процентного вмісту наносів кожної фракції дрібних розмірів частинок менше 0,25 мм використовуються методи відмучування - піпе-

точний і фракційний - у лабораторії. Метод седиментації дає позитивні результати, правильно відносячи планктон до частинок, що мають малу гідравлічну крупність - менше 0,01 мм. Інші ж способи визначення гранулометричного складу, наприклад, методом послідовної фільтрації, як це видно з табл.7.2, дають інший розподіл частинок по фракціях:

Таблиця 7.2 - Порівняння результатів складу наносів методами послідовної фільтрації й седиментації.

| Розмір часток<br>мм | Метод послідовної<br>фільтрації | Метод седиментації |
|---------------------|---------------------------------|--------------------|
| > 0.04              | 84.8%                           | 9.5%               |
| 0.04 ÷ 0.01         | 10.9%                           | 41.1%              |
| < 0,01              | 4.3%                            | 49.4%              |

Така розбіжність пов'язана з тим, що в розряд «крупних частинок» потрапив фітопланктон, який затримується в крупних осередках фільтра, хоча він відноситься до дрібнодисперсних частинок, слабо сполучених між собою зв'язками, але таких, що мають дуже низький гідравлічний розмір (швидкість падіння у воді), і майже нейтральну плавучість. У цьому й полягає перевага методу седиментації.

Слід зазначити, що описані вище утруднення в оцінці гранулометричного складу природних вод, у завданнях вивчення змиву наносів зі схилів річкових водотоків представляються в дещо іншому плані. Річ у тому, що у водах силового стоку фітопланктон відсутній. Проте є води схилового стоку, що характеризуються підвищеною турбулентністю. Тому вони містять велике число мінеральних ґрунтових частинок широкого спектра розмірів - від найдрібніших глинистих до крупних піщаних. У них незмінно присутня органіка - частинки гумусу, детриту, залишки рослинних тканин і т.п. Наявна в наносах схилового стоку органіка сприяє високому рівню поглинання, наприклад, радіонуклідів. Вміст у схиловому стоці органіки є важливим джерелом її винесення в річки й водоймища. Слід також відзначити, що механічний склад завислих наносів, тобто їхній розподіл за розмірами на фракції не стабільний у часі в зв'язку зі зміною гідрометеорологічних умов водозбору й водного режиму річок, які визначають характер припливу води до русел і швидкості течії.

Правильний підхід до оцінки гранулометричного складу сприяє більш точній оцінці чинників, винесенню речовин у водоймища. Багато небезпечних речовин, наприклад, цезій 137, мають виражену властивість закріплення своїх обмінних форм на частинках завислих наносів. Причому, частинки на-

носів містять на своїй поверхні радіонуклід цезію 137 із питомою активністю, яка обернено пропорційна їхньому діаметру. Багато інших забруднювачів поступають у водоймища на завислих наносах, закріплюючись на поверхні частинок твердого стоку. Дослідження питомої активності (Бк/г) радіонуклідів (цезій 137) показало, що зі зменшенням розмірів частинок наносів змінюється їхня питома активність. В УКРНДГМІ проводився аналіз численних проб наносів, узятих із вод річкового й схилового стоку, а також із донних відкладів. Проводилася сепарація по фракціях методом відмучування. Після розділення кожна фракція піддавалася гамма-спектрометричному аналізу. Практично у всіх дослідах і пробах спостерігався характер розділення активності цезію 137 по розмірних фракціях - зі зменшенням діаметра наносів питома активність цезію 137 збільшувалася. Проте при зменшенні діаметра від 0,1 мм до 0,05 мм питома активність зростає плавно, а потім росте стрибкоподібно до фракцій із розмірами 0,05-0,01 мм. При подальшому зменшенні розміру частинок відновлюється плавне зростання активності.

Таким чином, гранулометричний склад наносів відіграє велику роль у формуванні надходження хімічних речовин у водоймища із твердим стоком.

Описаний вище характер динаміки хімічних речовин, що переносяться твердим стоком, можна пояснити особливостями речовинного складу наносів різної гідравлічної крупності. Крупні наноси розміром більше 0,01- 0,015 мм (піщано-алевритові фракції) за мінеральним складом відносяться до кварцу й польових шпатів, які практично не мають іонно-обмінної здатності, тому складаються із цих мінералів і мають низьку питому активність забруднення цезієм 137.

Гідравлічно дрібні частинки з діаметром седиментації менше 0,01-0,015 мм складаються із глинистих мінералів і органіки (гумус, детрит, фітопланктон), які мають високий рівень поглинання цезію 137. Особливо великою спадкоємністю до цезію 137 мають шаруваті алгомо - силікати (монтморіноліт, каолінит, гідрослюди), оксиди й гідроксиди Si, Al, Fe, гумінові та інші органічні речовини, органо-мінеральні сполуки.

Такий поділ наносів на частини за їхньою крупністю можливий тільки при використанні методу відмучування. Інші способи відносять планктон до крупних частинок, тобто тих, які не потрапляють до фракції 0,01-0,015 мм. Саме в цьому діапазоні частинок спостерігається велике поглинання радіологічного забруднювальної речовини.

### **7.3 Розрахунок прозорості вод за даними їхньої мутності**

За відсутності даних вимірювань прозорості цей, найважливіший гідроекологічний показник природних вод, може бути обчислений по його залеж-

ностях із визначальними його чинниками - мутністю води, складом суспензій (наявністю й концентрацією у воді розчинених речовин, живих організмів, інших домішок). На рис. 7.1 показана залежність прозорості води від її мутності для Дніпровських водосховищ і водоймищ Північно-західного Причорномор'я, одержана відділом гідрології Інституту Гідробіології НАНУ. Для її побудови використано 212 парних вимірювань. Одночасно з вимірюванням прозорості по колу Секкі інтеграційним способом відбиралася проба води на всю глибину надходження променистої енергії з подальшим визначенням її каламутності.

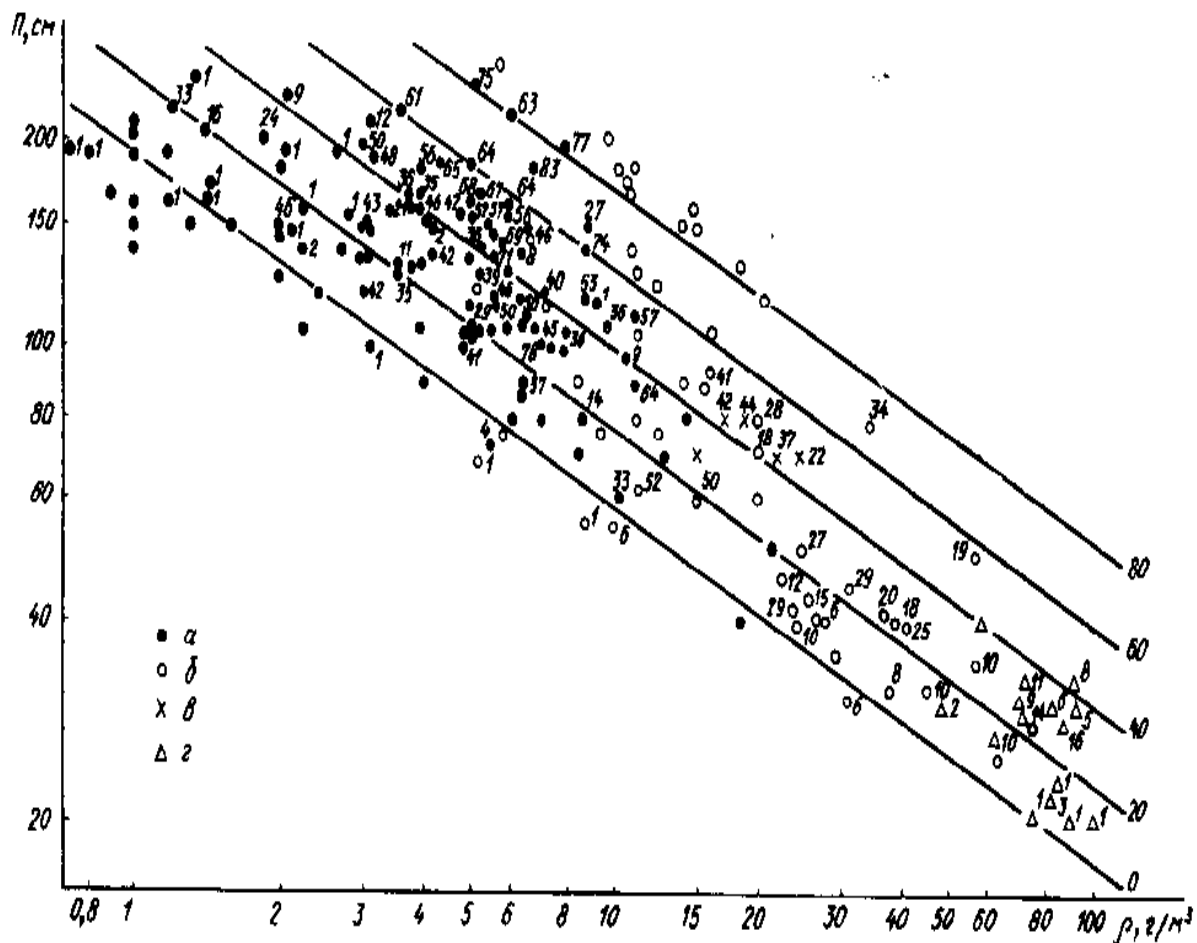


Рис.7.1 - Залежність прозорості води  $P$  від її мутності  $\rho_v$   
Примітка: цифри біля точок - відсоток вмісту органічної речовини в суспензіях (Дніпровські водосховища, річок Дніпро й Дунай).

Аналіз залежності прозорості  $P$  від каламутності  $\rho$  вийшла недостатньо тісною й тому був використаний третій чинник - частка органічних речовин у суспензіях після фільтрування. Після прожарювання суспензії з фільтром у фарфорових тиглях при температурі 450°C протягом 1,5 години органічна складова (ОС) випаровувалася. Якщо частку цих втрат органічної частини проби при прожарюванні (ППП) виразити в % від загальної ваги суспензії й нанести це значення біля точок, то на логарифмічному графіку, показаному на рис. 7.1, можна побудувати абаци - лінії рівних значень ППП і, таким чином, одержати придатний для розрахунків прозорості графік на рис. 7.1 з кореляційним відношенням 0,78.

Точнішу залежність можна встановити, якщо врахувати ряд додаткових чинників - швидкість течії, ступінь турбулентності водної маси, розмір і форму завислих частинок. Проте це ускладнює систему розрахунків й, особливо, прогнозів прозорості, тому рекомендується використовувати графік на рис. 7.1, або наступне аналітичне рівняння (7.1) установлене по типу цієї залежності:

$$P = 190 \rho_v^{-0,513} 10^{0,006 \cdot (ППП)}, \quad (7.1)$$

де  $P$  - прозорість води, см;  $\rho_v$  - мутність проби, г/м<sup>3</sup>, ППП - органічна складова суспензії, %.

Наведені вище залежності дозволяють обчислити величину сонячної енергії на будь-якій глибині з достатньо високою мірою достовірності при вимірюванні прозорості й мутності водних мас.

#### 7.4 Донні відкладення й екосистема

Донні наноси - наноси, які формують поверхневий шар русла, і знаходяться в активній взаємодії з водними масами.

Донні відклади - донні наноси в їх природному заляганні. Це відклади різноманітних мінеральних і органічних частинок, що накопичуються із часом на дні й схилах водоймищ озер, ставків, водосховищ. Донні відклади формуються в результаті надходження у водоймище річкових наносів і продуктів абразії берегів, накопичення продуктів хімічних реакцій, відкладення залишків відмираючих живих організмів, що формують так звані біогенні відкладення.

Біогенні відклади поділяються на мінеральні залишки відмерлих організмів і органічні речовини.

Донні відклади - один із найважливіших абіотичних компонентів екосистеми. Вони беруть активну участь у внутрішньоводному кругообігу речовин і енергії, є незаселим середовищем численних гідробіонтів. Склад донних відкладів і їхня динаміка визначають умови існування донних організмів - бентосу, можливість їх пересування, закопування, прикріплення, умови зимівлі й ін. До складу бентосу входять численні види бактерій. Бентос є кормовою базою для промислових тварин, особливо риб, тому рівень його розвитку служить показником продуктивності водного об'єкта.

Найбільше екологічне значення для гідробіонтів мають розміри частинок ґрунту, щільність їхнього прилягання одна до одної, стабільність взаємного розташування й акумуляції за рахунок осідання завислого матеріалу.

Сприятливою для них є певна щільність відкладів. При високій щільності відкладів організми не зможуть заритися в них, в інших випадках у організмів не буде опори і вони будуть винесені водою. Прикладом бентосу можуть служити «кокони метеликів» - мешканці дна, які впливають на донні відклади, механічно порушують їхню структуру, активізують обмін речовин між дном і водними масами, впливають на хімічний склад відкладів і масу органічної речовини.

#### Питання для самостійної підготовки

1. Формування твердого стоку й методи його оцінки.
2. Особливості впливу твердого стоку на гідроекологічні процеси.
3. Гранулометричний склад наносів і методи його оцінки.
4. Особливості транспортування хімічних речовин частинками різних розмірів.
5. Розрахунки прозорості води за даними мутності й складу суспензії.
6. Донні відклади як середовище існування бентосу.

## **8 СУМІСНИЙ ВПЛИВ ГІДРОЛОГІЧНИХ, ГІДРОХІМІЧНИХ І ГІДРОБІОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА БІОЛОГІЧНУ ПРОДУКТИВНІСТЬ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ**

У попередніх розділах курсу розглядалася спрощена схема харчового ланцюга водних екосистем. Вона включає сонце, як джерело енергії, первинні продуценти й споживачі (консументи) першого, другого, третього і четвертого порядків. У роботі [4] наведені приблизні кількісні значення цих ланок ла-

нцюга для екосистем Дніпровських водосховищ. Установлено, що для первинної продукції використовується від 0 до 0,77% енергії сонця, що надійшла на поверхню води. Продукція рослинних (первинних консументів) складає близько 20% від первинної; продукція м'ясоїдних першого порядку - близько 15% від рослинних, а м'ясоїдних 2-го порядку - тільки 0,3% від продукції м'ясоїдних першого порядку.

Первинна продукція водної екосистеми лежить в основі всієї її трофічної структури, живлячи процес трансформації речовин у трофічному ланцюзі, коли кожна попередня ланка ланцюга служить їжею для подальшої. Рух речовин по трофічному ланцюгу приводиться в дію енергією фотосинтезу органічної речовини, яку він одержує від сонячного випромінювання, а поживні речовини - будівельний матеріал для фітоценозів - з води й ґрунту.

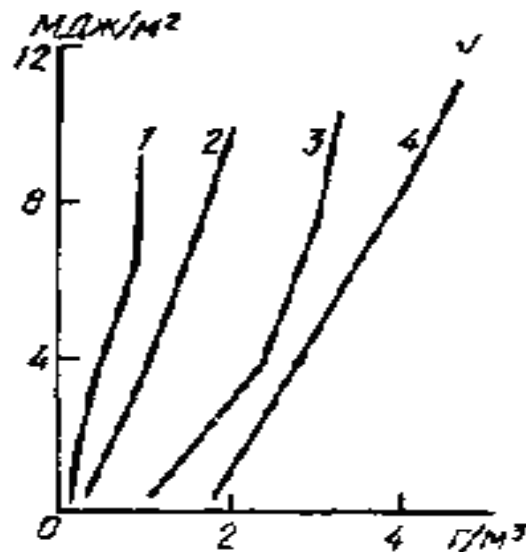


Рис. 8.1 - Залежність первинної біологічної продукції (г/м³) від добових сум ФАР (МДж/м²) на верхніх (1,3) і пригребельних (2,4) ділянках Київського (1,2) і Кременчуцького водосховища (3, 4); червень 1981 р.[17].

Величина первинної продукції водних екосистем залежить у першу чергу від кількості активної сонячної енергії (ФАР), що поступила на задану глибину фотичного шару. Кількість же ФАР залежить від гідрометеорологічних чинників - прозорості атмосфери й води, кількості зваженого матеріалу у воді, глибини, турбулентного перемішування, багатьох інших природних чинників.



Між сумами ФАР за добу й даним фактичних вимірювань первинної біологічної продукції на Дніпровських водосховищ одержана залежність, яка представлена на рисунку (8.1).

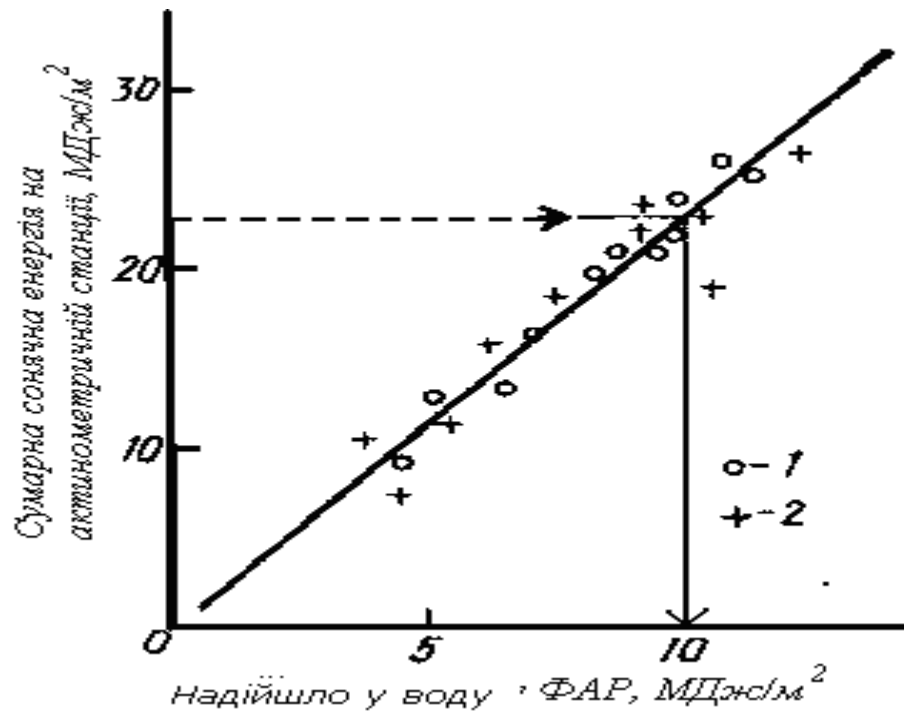


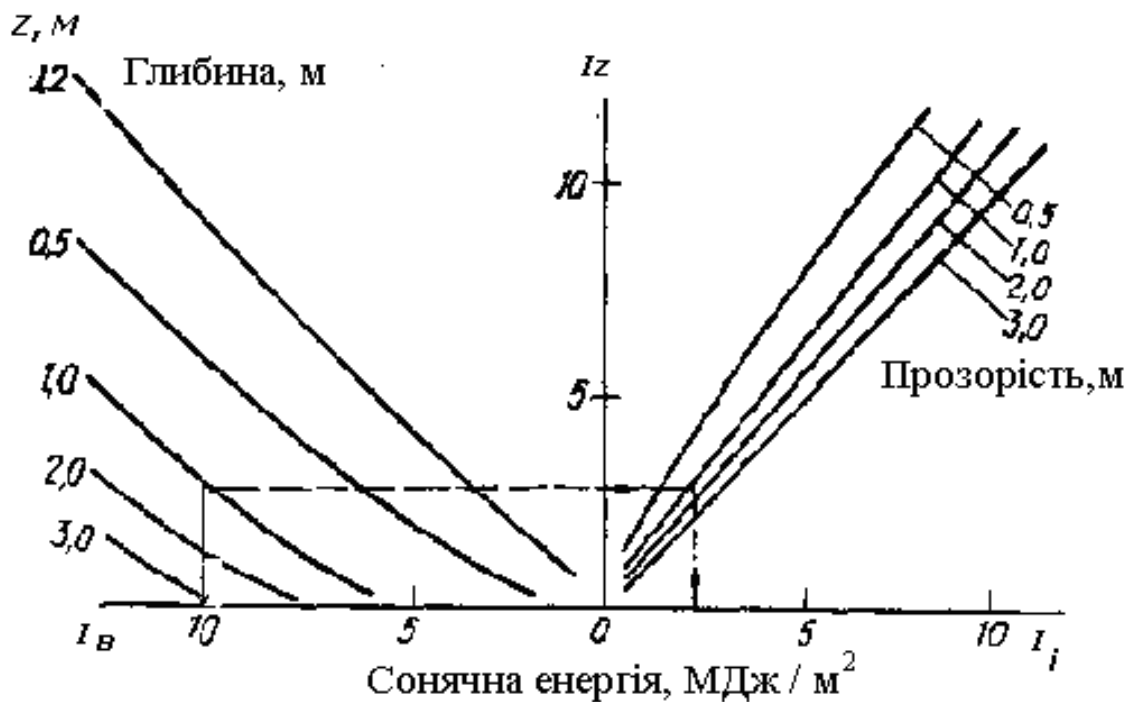
Рис.8.2 - Залежність між величинами сумарної сонячної радіації на актинометричних станціях (1-Бориспіль; 2 - Полтава) і ФАР, що надійшла у водосховища Дніпровського каскаду.

## 8.1 Розрахунок первинної біологічної продукції водних екосистем за гідрометеорологічними характеристиками

### 8.1.1 Методи розрахунку ФАР

Фотосинтетична активна радіація представляє сонячну енергію, що утилізована у водній екосистемі й використана в процесі фотосинтезу. Вона значно змінюється з перебігом року й по довжині водоймища, що викликає складнощі в її розрахунку. Загальна кількість ФАР, використаної процесом фотосинтезу в Дніпровських водосховищах, змінюється від 0,1 до 0,77% від сумарної енергії сонця, що поступила на водну поверхню. По місяцях ця час-

Звичайно, розрахунок первинної продукції зручно вести по добових інтервалах часу, оскільки цикл надходження енергії сонця на поверхню води носить чітко виражений добовий цикл. Для визначення кількості енергії, що надійшла від сонця, використовуються дані актинометричних станцій, де вона вимірюється спеціальними приладами піргеліометрами в МДдж/м<sup>2</sup> за певний період (доба). На території України є мережа таких станцій, дані по яких можна використовувати для різних цілей.



За стійких погодних умов характеристики прозорості атмосфери й хмарності мало змінюються по території України, тому доцільно використовувати дані актинометричних станцій, розташованих на одній широті з водосховищем. За даними вимірювань сумарної сонячної радіації й розрахованої радіації ФАР

за добові періоди часу будувалися графіки зв'язку між ними. Приклад такого графіка для водосховищ Дніпровського каскаду показано на рис. 8.2. Тіснота зв'язку оцінюється кореляційним відношенням на рівні  $0.86 \pm 0.06$ .

### 8.1.2 Визначення ФАР по глибині водоймища

Основними чинниками проникнення сонячної енергії на глибину водоймища є висота сонця, прозорість води й глибина водоймища на заданій вертикалі. Висота сонця для річкового водосховища може прийматися однаковою для всієї його акваторії (для даної доби). Значення ФАР на глибині  $Z$  при заданій прозорості  $P$ , тобто  $I_{zp}$ , може визначатися із залежності загального вигляду:

$$I_{zp} = f(I_B, Z, P). \quad (8.1)$$

де  $I_B$  - загальна кількість ФАР, що надійшла у воду.

Таким чином, за наявності синхронних вимірювань  $I_{zp}$ ,  $I_B$ ,  $Z$ ,  $P$  можна побудувати відповідний графік по типу залежності (8.1), показаний на рис. 8.3. По цьому графіку можна встановити величину енергії ФАР на заданій глибині  $I_{zp}$  при заданій прозорості.

Таблиця 8.1 - Значення елементів розрахункової схеми визначення первинної біологічної продукції для водосховищ Дніпровського каскаду

| Операції                                                                | Приклад для вересня |      |      | Сума за період вегетації |       |      |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------|------|------|--------------------------|-------|------|
|                                                                         | max                 | сер  | min  | max                      | сер   | min  |
| Надходження сонячної енергії на пов. водосховищ, МДж/м <sup>2</sup>     | 615                 | 536  | 434  | 3439                     | 2971  | 2417 |
| Площа дзеркала водосх. км <sup>2</sup>                                  | 6990                | 6778 | 6387 | -                        | 47010 | -    |
| Сумарна сон. енергія на всю поверхн. водосх, 10 <sup>10</sup> *МДж      | 430                 | 363  | 277  | 2408                     | 1995  | 1541 |
| Сонячна енергія ФАР в %%% від загальної                                 |                     | 0,35 |      |                          | 0,02  |      |
| Сонячна енергія, використана в процесі фотосинтезу, 10 <sup>8</sup> МДж | 1505                | 1272 | 970  | 5717                     | 3591  | 3733 |
| Утворення органічних речовин (у сухій масі), 10 <sup>3</sup> т          | 119                 | 100  | 76.4 | 490                      | 415   | 317  |

На кожній вертикалі з різних глибин відбирають проби води для встановлення концентрації первинної продукції (фітопланктон і водна рослинність) і за цими даними розраховують середнє значення на вертикалі концентрацій первинної продукції ( $\text{г/м}^3$ ) і будують графік. За допомогою цих графіків визначають середньодобові значення ФАР для різних глибин на заданій вертикалі. Середньодобову концентрацію первинної продукції ( $\text{г/м}^3$ ) на всіх вертикалях водоймища встановлюють по графіку, показаному на рис.8.1, який заздалегідь побудований за даними фактичних вимірювань для окремих вертикалей водоймища.

На основі описаної вище розрахункової схеми значення первинної продукції для каскаду Дніпровських водосховищ обчислені за окремими місяцями (в табл.8.1 наведені дані тільки для серпня), а також для вегетаційного періоду. Їхні сумарні значення за цей період (25 квітня - 22 жовтня).

## 8.2 Вплив регулювання стоку на біологічну продуктивність річки

Створення каскаду водосховищ на Дніпрі забезпечує отримання дешевої електричної енергії, вирішує багато проблем водозабезпечення народного господарства й населення, що проживає в басейні Дніпра, судноплавства, а також зрошування великих площ у південних незабезпечених водою регіонах степової зони країни. Проте одночасно змінюється біологічна продуктивність, і біологічні ресурси річкових систем. Змінюється також якість вод часто в гіршу сторону. Головними чинниками, що визначають біологічну продуктивність річкового водоймища  $V_n$ , є кількість сонячної енергії у фотосинтетичний активному діапазоні випромінювання  $I_{ocm}$  і величина об'єму фотичного шару  $W_{фот}$ , де утворюється додаткова біомаса, тобто

$$V_n = f(I_{ocm}, W_{фот}). \quad (8.2)$$

Відомо, що сонячна енергія, яка надходить на одиницю площі водосховища - постійна для даної місцевості величина (вона залежить від висоти сонця й кліматичної характеристики - хмарності), тому зміна первинної біомаси залежить в основному, від другого чинника - об'єму фотичного шару  $W_{фот}$ . Розміри фотичного об'єму визначаються його потужністю (товщиною) і площею водної поверхні. Потужність фотичного шару залежить в основному від прозорості води, оскільки висота сонця для даного водосховища не змінюється від року до року. Тому великий вплив на загальну біологічну продуктивність водосховищ надає площа їхньої водної поверхні.

Разом із тим, автори роботи [17] указують на суперечливий характер впливу розмірів водосховищ на їх біологічну продуктивність. Річ у тому, що зі зростанням площі, а отже і  $W_{\text{фот}}$ , збільшуються поперечні розміри водоймища, тобто збільшується довжина розгону хвиль на водосховищах, активізується процес змулювання донних наносів і тому зменшується прозорість води. Це приводить до зменшення надходження енергії до водоймища  $I_{\text{осм}}$ , до зменшення їх біопродуктивності. Розміри фотичного шару також визначаються морфометрією дна водосховища.

У цитованій вище роботі А.В. Яцика й В.М. Шмакова [17] детально розглянуті гідрологічні чинники об'єму фотичного шару Дніпровських водосховищ - глибини, швидкості течії, прозорості води та інші, як для річкових ділянок до створення водосховищ, так і створених на їхніх місцях водосховищ. Всі дані віднесені до середньомісячних рівнів води.

Порівняльні характеристики русел річок і створених на їх місці водосховищ за вегетаційний період наведені в таблиці (8.2). Їхній аналіз дає можливість скласти висновки про вплив цих чинників на біологічну продуктивність водоймищ і річок Дніпровського каскаду. Із цієї таблиці видно, що при створенні водосховищ на місці річкових русел в 4,9 разу збільшилася площа водної поверхні водосховищ, і в 20 разів зменшилася швидкість течії води в них. В результаті освітлилася вода від наносів, що осіли на дно, це сприяло збільшенню в 2,11 разів середньої глибини фотичного шару.

Таблиця 8.2 - Порівняльні характеристики русел річок і створених на їх місці водосховищ Дніпровського каскаду

| Параметри                         | Річка | Водосховище | Зміна параметрів після створення водосховища |
|-----------------------------------|-------|-------------|----------------------------------------------|
| Швидкість течії, м/с              | 0,7   | 0,035       | Зменшилась в 20 раз                          |
| Прозорість води, м                | 0,8   | 1,4         | Збільшилась в 1,75 разу                      |
| Глибина, м                        | 3,2   | 3,9         | Збільшилась в 1,22 разу                      |
| Фотичний шар, м                   | 1,8   | 3,8         | Збільшилась в 2,11 разу                      |
| Площа водної пов., м <sup>2</sup> | 60,3  | 900         | Збільшилась в 14,9 разу                      |

У зв'язку з такими змінами гідрологічних характеристик водосховищ об'єм фотичного шару, що є одним із головних чинників біопродуктивності 6-

ти водосховищ Дністровського кадастру збільшилася після створення водосховищ в 24-37 разів (у середньому в 29,3 разу).

Вище в табл. 8.1 приведені відомості про первинну продуктивність Дністровських водосховищ - вона складає в середньому за період вегетації сумарну величину  $415 \cdot 10^3$  тонни в сухій масі, при максимальній  $490 \cdot 10^3$  тонн і мінімальній -  $317 \cdot 10^3$  тонни.

### 8.3 Гідрологічні умови «цвітіння» води у водосховищах

Разом із позитивною роллю, яку виконує регулювання стоку й створення з цією метою водосховищ, їх супроводжують негативні явища й процеси. Будівництво крупних водосховищ на Дніпрі призвело до «цвітіння» води в них - це масовий розвиток фітопланктону, що спричиняє зміну забарвлення води (ГОСТ 17.1.01-77).

Розрізняють слабе цвітіння - біомаса водоростей у межах 0,5 - 0,9 мг/дм<sup>3</sup>; помірне - 1 - 9,9 мг/дм<sup>3</sup>; інтенсивне - 10 - 99,9 мг/дм<sup>3</sup>; гіперцвітіння - більше 100 мг/дм<sup>3</sup>.

У Дніпровських водосховищах у період «цвітіння» біомаса синьо-зелених водоростей досягає 23,4 г/м<sup>3</sup> (мг/дм<sup>3</sup>), у полях і плямах «цвітіння» 10-50 кг/м<sup>3</sup> і більше, а при нагонах води - до 500 кг/м<sup>3</sup> сирової речовини. У межах полів «цвітіння» розвиваються явища біологічного забруднення й самозабруднення. З водної маси виділяються продукти розпаду з неприємним запахом - аміак, феноли, індол, скатол, ціаніди; вміст у воді (у полях «цвітіння») розчинених органічних речовин перевищує норму по вуглеводу в 20-40 разів, по азоту в 30-150 разів, по фосфору - в 20-25 разів і т.д. Загальна чисельність бактерій зростає в 25-100 разів, а гетеротрофних (які освоюють біомасу без застосування фотосинтезу, на відміну від автотрофних, у живлення яких входять мінеральні речовини в процесі фотосинтезу) - до 400 разів. Гетеротрофні організми - це вищі водні рослини, гриби, мікроорганізми, усі тварини й людина.

Масовий розвиток синьо-зелених водоростей порушує режим водопостачання, викликає замори риби й появу джерел забруднення на місцях відпочинку й життя населення (наприклад, озеро Сасик після його «опріснення»).

Основні причини «цвітіння» - зміна гідрологічних характеристик і водного режиму, зменшення швидкості течії, осідання на дно зважених частинок, збільшення прозорості води й глибини проникання у воду променистої енергії сонця. Збільшилася площа дзеркала водосховищ і об'єм їхнього фотичного шару й дуже важлива причина змиву з полів мінеральних фосфоровміщуючих добрив, СПАР і органічних забруднень.

Цвітіння водосховища спостерігається не на всій площі, а окремими плямами. Вони скупчуються в основному в нижній частині водосховища. Наприклад, у Кременчуцькому водосховищі в липні 1961 року біомаса синьо-зелених водоростей у прибережній частині досягла  $7166 \text{ мг/м}^3$ , у середній -  $2177 \text{ мг/м}^3$  і у верхній -  $150 \text{ мг/м}^3$  сухої речовини. Ці місця цвітіння зосереджені там, де є малі припливи вод та наявність великих глибин – біля дамби. Тут спостерігається значна прозорість води, великі шари мулу, сповільненого водообміну.

Для боротьби з “цвітінням” води запропоновані різні заходи: продування крізь водну товщу кисню, застосування хімічних засобів, розведення рослинної риби, вирощування очерету на мілководдях, скорочення надходжень біогенних речовин у водоймища й ін. Проте ці методи виявляються ефективними тільки в окремих випадках.

#### **8.4 Взаємозв'язок між гідробіологічними й гідрологічними характеристиками водоймищ**

Головними гідрологічними показниками, що визначають гідробіологічні процеси в річкових водоймищах, є :

$I_B$  – фотосинтетичний активна сонячна радіація, що поступає у воду ;

$T$  – температура води,  $^{\circ}\text{C}$  ;

$V$  – швидкість перебігу води,  $\text{м/с}$  ;

$h$  – глибина води,  $\text{м}$ ;

Використовуються також показники, які оцінюють процеси хвилювання, дію вітру, циркуляцію вод та ін..

За висновком авторів огляду [17], деяка гідробіологічна характеристика  $X_i$  залежить від перерахованих вище гідрологічних параметрів у вигляді лінійних рівнянь:

$$X_i = a + b_1 T + b_2 I_B + b_3 V + b_4 h \quad (8.3)$$

Гідрохімічні характеристики також пов'язані з гідрологічними. Наприклад, вміст кисню у воді ( $X_1$ ,  $\text{мг/дм}^3$ ), пов'язаний із гідрологічними характеристиками у вигляді лінійного рівняння:

$$X_1 = 3,456 - 0,1669T + 0,01382V - 0,01631h + 0,09552X_2, \quad (8.4)$$

де  $X_2$  - % насичення води киснем, обчислюваний за рівнянням:

$$X_2 = 36,82 + 2,085T - 0,02121 I_B + 0,182h. \quad (8.5)$$

На концентрацію завислого фосфору ( $X_3$  мг/дм<sup>3</sup>) впливає сонячна енергія й величина прозорості  $P_n = X_4$ :

$$X_3 = 1,051 - 0,000486 I_B - 0,1054 X_4, \quad (8.6)$$

$$X_4 = 8,139 + 0,01374 V. \quad (8.7)$$

В описаній методиці емпіричної оцінки залежностей біологічної продуктивності від діючих чинників одержані чисельні значення коефіцієнтів лінійних рівнянь.

Наведені результати статистичного аналізу біопродуктивності Дніпровських водосховищ дозволили авторам встановити основні її чинники. Вони також ілюструють наявність зв'язків між гідрологічними й гідрохімічними, гідробіологічними показниками штучних водоймищ.

## 8.5 Про можливість регулювання функцій водних екосистем

До порівняно недавнього часу дія людини на природу була незначною, і водні системи знаходилися в рівноважному стані.

Якщо ж в певні періоди рівноважний стан їх порушувався (повінь, паводки і ін.), то природа сама відновлювала через деякий час їх рівновагу. В умовах величезного впливу НТР на екосистеми їх гідрологічний режим значно змінився, із цими змінами природа не могла справитися (наприклад, споруда великих гідровузлів). У результаті порушувалася екологічна рівновага в співвідношенні компонентів екосистем. Окремі види гідробіонтів і популяцій скорочуються або навіть гинуть, а інші інтенсивно розвиваються. Відбувається заміщення цінних видів рослин і тварин смітними видами, знижується видова різноманітність.

Антропогізація річок і озер майже повсюдно привела до зменшення їх водності й біологічної продуктивності, а також погіршення якості води в них. Так, прикладом може служити «цвітіння води», яке спостерігається на водосховищах Дніпровського каскаду. Щорічні збитки від «цвітіння води» складають значні кошти [13]. Водосховища стали акумуляторами мулу й стійких забруднювальних речовин, промислових і побутових скидів. Накриті новими відкладами мулів, вони якоюсь мірою захистили жителів і природу Придніпровських територій від наслідків Чорнобильської аварії.

Крупні водосховища привели до значних втрат води на випаровування - воно збільшилося на 156-253 мм у рік, а зі всіх водосховищ їх об'єм склав - 2,25 км<sup>3</sup>. Підйом рівня ґрунтових вод сприяв підтопленню близьких до водо-



совищ населених пунктів.

Таким чином, усе це відбулося за рахунок зміни гідрологічних характеристик і водного режиму. Через це відбулося порушення екологічної рівноваги й зміна екосистеми. Проте слід пам'ятати, що з комплексу гідрохімічних, гідрологічних і гідробіологічних явищ і процесів, гідрологічні найбільш доступні для управління.

Цілеспрямована зміна гідрологічного режиму може змінити, зумовити як позитивний, так і негативний вплив на біологічну продуктивність і формування якості вод. Наприклад, якщо затримання води у водосховищах привело до погіршення екологічного стану водних екосистем, то грамотно складена схема екологічних попусків води і їх своєчасне здійснення здатне створити сприятливі умови для існування заплавних екосистем і очищення вод пониззя річки від забруднень. Розробка способів і знаходження шляхів перетворення водних екосистем є важливим завданням сучасної гідроекології.

І найголовніше, при створенні нових систем використання природних вод необхідно ретельно аналізувати ступінь майбутньої зміни екосистем і не допускати їх погіршення.

#### Питання для самостійного вивчення

1. Основні чинники, що визначають біологічну продуктивність водних екосистем.
2. Методи розрахунку ФАР за даними актинометричних вимірювань.
3. Методи визначення ФАР по глибині водоймища.
4. Основні висновки про вплив регулювання стоку на продуктивність річки.
5. Гідрологічні умови «цвітіння» води у водосховищах.
6. Вплив на біологічну продуктивність і якість вод шляхом цілеспрямованої зміни гідрологічного режиму водоймища.

## Бібліографічний опис

1. Владимиров А.М., Ляхов Ю.И., Матвеев Л.Т. и Орлов В.Г. Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеиздат, 1991.-423 с.
2. Горев Л.М., Пелешенко В.Г., Хильчевський В.К. Гідрохімія України. Київ, "Вища Школа".1995.-306 с.
3. Дрё Ф. Экология(пер. с франц.). М.: Атомиздат. 1976. – 168 с.
4. Злобін Ю.А. Основи екології. К.: - Лібра. 1998. – 248 с
5. Некос В.Е. Экология. Учебное пособие /Ч.І. Основы общей и глобальной традиционной экологии. 2-е изд.-Х,: Торнадо, 1999.-192 с.
6. Некос В.Е. Основы общей экологии и неоекологии. Учебное пособие. Часть II.- Основы общей экологии и глобальной неоекологии. Харьков: ХГУ, 1998г.-156 с.
7. Никаноров А.М. Гидрохимия. Ленинград - Гидрометеиздат. 1989. -350 с.
8. Оксуюк О.П., Тимченко В.М., Полищук В.С. и др. Управление состоянием экосистемы и качеством воды в устьевом участке Днестра. Киев –институт Гидробиологии НАН Украины, часть 1 и часть 2.
9. Романенко В.Д., Оксуюк О.П., Жукинський В.Н. и др. Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты. Киев - Наукова Думка, 1990. - 254с.
10. Романенко В.Д. Основи гідроекології: Підручник. – К.: Обереги, 2001.- 728 с.-іл.
11. Сытник К.М. Словарь-справочник по экологии. -Киев,1994.
12. Страшкраба М., Гнаук А. Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. (пер.с англ.). М.: Мир, 1989.-376с.
13. Тимченко В.М. Еколого-гідрологічні дослідження водоемів Северо-Западного Причорномор'я. Киев - Наукова Думка, 1990. - 238с.
14. Федоров В.Д., Гильманов Т.Г. Экология.-М.:Изд-во Моск.Ун-та, 1980.-464 с.
15. Филатов Н.Н. Динамика озер. Л.- Гидрометеиздат, 1983, 164с.
16. Хильчевський В.К. Водопостачання і водовідведення (гідроекологічні аспекти). Київ, "Київський Університет".1999.-319 с.
17. Яцык А.В., Шмаков В.М. Гидроэкология - К.: Урожай, 1992.-192с.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**О.Г. Іваненко**

# **Гідроекологія**

Конспект лекцій

**Одеса**  
**„Екологія”**  
**2008**

Навчальне видання

Іваненко Олександр Григорович

# Гідроекологія

К о н с п е к т л е к ц і й

Підп. до друку 20.02.08  
Умовн. друк. арк. 5.8

Формат 60x84/16  
Тираж 50

Папір офс.  
Зам. №

Надруковано з готового оригінал-макета

---

Одеський державний екологічний університет  
65016, Одеса, вул. Львівська, 15

---

