

## **Навчальні заняття № 35-37.**

### **Тема: «Фотосинтез».**

#### **План:**

1. Світлова фаза фотосинтезу. Фотоліз води. Робота світлозбиральних антенних комплексів пігментів. Фотосинтетичний ланцюг перенесення електронів. Утворення АТФ за рахунок протонного градієнту на мембрані тилакоїда. Циклічне і нециклічне фотофосфорилування.
2. Темнова фаза фотосинтезу. Цикл Кальвіна. Роль рибулобисфосфаткарбоксилази. Утворення, запасання і використання крохмалю.
3. Особливості фотосинтезу у прокаріотів. Планетарне значення фотосинтезу.
4. Загальні риси процесу хемосинтезу. Групи хемосинтезувальних організмів. Етапи хемосинтезу. Значення хемосинтезу для колообігу елементів у природі.
5. Біосинтез жирних кислот і складних ліпідів.
6. Утворення, запасання і використання глікогену.

## Фотосинтез

Фотосинтез — це процес утворення живими організмами органічних речовин з неорганічних з використанням енергії світла:



Процес фотосинтезу складається з двох основних фаз — світлової і темної. Під час світлової фази кванти світла вловлюються хлорофілом, енергія квантів використовується для синтезу АТФ і НАДФ Н<sub>2</sub>. Побічним продуктом є кисень. У ході темної фази за рахунок АТФ та інших продуктів світлової фази відбувається фіксація молекул СО<sub>2</sub> і утворюються молекули глюкози.

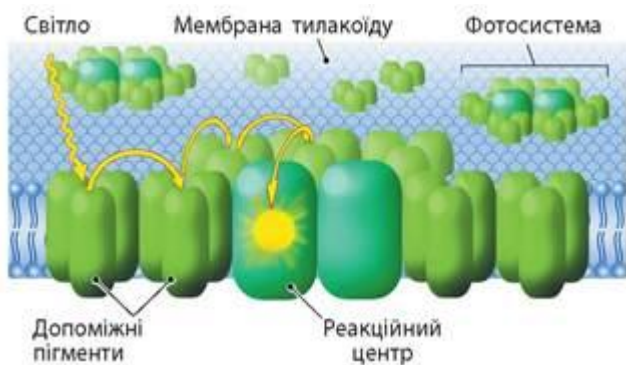
До фотосинтезу здатні рослини і деякі бактерії.

**У клітинах рослин фотосинтез відбувається в хлоропластах: світлова фаза — на мембранах тилакоїдів, темнова — у стромі.**

### 1. Світлова фаза: поглинання енергії Сонця

Сонячна енергія уловлюється фотосинтетичними пігментами, серед яких основну роль відіграє хлорофіл а. Крім того, існують хлорофіли b, c, d, f. Допоміжними пігментами є каротиноїди (жовті, помаранчеві, червоні) і фікобіліни (червоні й сині пігменти червоних водоростей).

Фотосинтетичні пігменти згруповані на мембранах тилакоїдів у комплекси двох типів — фотосистему I (ФС I) і фотосистему II (ФС II). Кожна фотосистема складається з кількох сотень молекул пігментів. Усі пігменти фотосистеми можуть поглинати кванти світла, але тільки одна молекула хлорофілу фотосистеми може використовувати поглинену енергію у фотохімічних реакціях. Ця молекула називається реакційним центром (мал. 45.1). Усі інші молекули пігментів утворюють антенний комплекс: вони уловлюють енергію світла і передають її в реакційний центр.



**Мал. 45.1. Схема передачі поглиненої енергії в антенному комплексі фотосистеми. Енергія передається від молекули до молекули, поки не досягне реакційного центру**

### Світлова фаза: фотоліз води

У рослин фотосинтез починається з фотосистеми II. Енергія поглиненого світла від антенних комплексів передається в реакційний центр ФС II і переводить один з електронів хлорофілу а в збуджений стан (мал. 45.2).

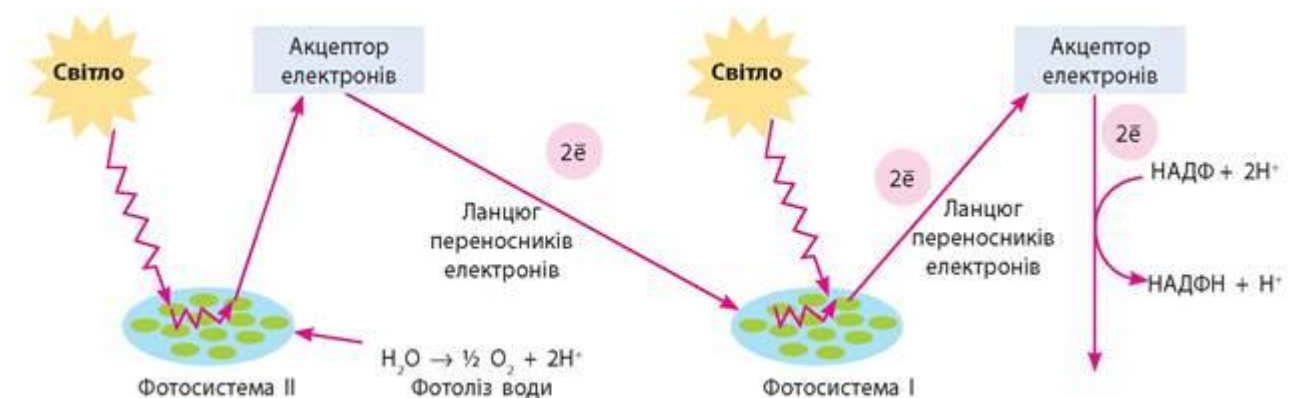
Збуджений електрон передається на молекулу-переносник, а в молекулі хлорофілу з'являється позитивно заряджена електронна «дірка».

Втрачений хлорофілом електрон заміщується електроном, який утворюється в результаті фотолізу води під дією світла:



Під час фотолізу в результаті розщеплення молекули води утворюються:

- 1) електрони, що заповнюють «дірки» у фотосистемі II;
- 2) протони  $\text{H}^+$ ;
- 3) побічний продукт — молекулярний кисень  $\text{O}_2$ .



Мал. 45.2. Схема роботи фотосистем I і II. У центрі кожної ФС розміщений реакційний центр (молекула хлорофілу а)

### Світлова фаза: фотосинтетичний ланцюг перенесення електронів

Електрон, випущений збудженим хлорофілом ФС II, через ланцюг молекул-переносників передається до ФС I. Там він заповнює електронну «дірку», яка утворюється під час поглинання кванта світла хлорофілом ФС I. Тут електрон збуджується вдруге і бере участь у відновленні  $\text{НАДФ}^+$  до  $\text{НАДФH}_2$ . Такий рух електронів по ланцюгу переносників називають нециклічним потоком, або Z-схемою.

У мембранах тилакоїдів можуть здійснюватися циклічні потоки електронів. У них електрон збуджується тільки в реакційному центрі ФС I, і не відбувається утворення  $\text{НАДФH}_2$ . Потік стає циклічним, коли електрони від реакційного центру ФС I передаються не на  $\text{НАДФ}^+$ , а повертаються назад, у ланцюг переносників електронів від ФС II до ФС I. Такий рух електронів забезпечує тільки АТФ, але не  $\text{НАДФH}_2$ .

### Світлова фаза: протонний градієнт на мембранах тилакоїдів

Перенесення електронів супроводжується іншим процесом: переносом протонів  $\text{H}^+$  у внутрішньотилакоїдний простір. На мембрані тилакоїдів виникає електрохімічний градієнт. Накопичені протони «прориваються» з внутрішньотилакоїдного простору в строму по каналах АТФ-синтази; при цьому синтезується АТФ. Цей механізм називається фотофосфорилування; його принцип схожий з механізмом окисного фосфорилування в мітохондріях.

Основні продукти світлових реакцій фотосинтезу — НАДФ H<sub>2</sub> і АТФ — накопичуються в стромі, тобто там, де вони мають витратитися в реакціях темної фази.

### **Ключова ідея**

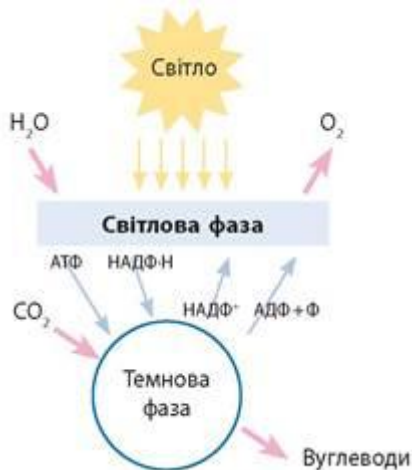
Фотосинтез — це процес утворення живими організмами органічних речовин з неорганічних з використанням енергії світла. Під час світлової фази кванти світла вловлюються фотосинтетичними пігментами, що згруповані у фотосистеми I і II на мембранах тилакоїдів хлоропластів. Енергія квантів використовується для синтезу АТФ і НАДФ H<sub>2</sub>. Побічним продуктом є кисень.

## 2. Процеси темної фази фотосинтезу

У процесах темної фази фотосинтезу утворюються вуглеводи — первинні органічні речовини. Саме в цій фазі відбувається включення атмосферного  $\text{CO}_2$  у склад біосфери. Реакції синтезу органічних речовин відбуваються з використанням енергії, накопиченої у ході світлової фази (мал. 46.1).

Темнова фаза фотосинтезу здійснюється у стромі хлоропластів. Ця фаза називається темною тому, що світло не бере в ній безпосередньої участі. У рослин вона відбувається як удень, так і вночі.

Сукупність послідовних реакцій темної фази називається циклом Кальвіна. Цикл названий на честь американського біохіміка Мелвіна Кальвіна, який отримав за його відкриття Нобелівську премію з хімії 1961 р.



Мал. 46.1. Взаємозв'язок світлової і темної фаз фотосинтезу

### Цикл Кальвіна

Під час біохімічних реакцій циклу Кальвіна за участю вуглекислого газу і продуктів світлової фази фотосинтезу НАДФН і АТФ утворюються молекули глюкози.

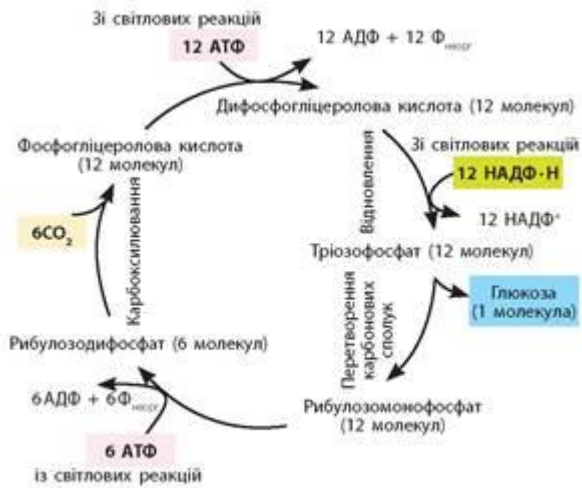
Синтез 1 молекули глюкози відбувається за 6 обертів циклу і потребує 6 молекул  $\text{CO}_2$ , 12 молекул НАДФН і 18 молекул АТФ.

Цикл Кальвіна складається з трьох стадій: карбоксилування, відновлення та регенерації (мал. 46.2).

Карбоксилування. Ця стадія найважливіша, оскільки саме на ній неорганічний Карбон у складі  $\text{CO}_2$  включається до складу органічних речовин. Ключовою реакцією є приєднання молекули вуглекислого газу до 5-карбонової сполуки рибулозо-1,5-бісфосфату. Реакція каталізується ферментом рибулозобісфосфаткарбоксилазою (скорочено — RuBisCo). Процеси карбоксилування здійснюються за участю АТФ, отриманої під час світлової фази фотосинтезу. Нова, вже 6-карбонова сполука, нестійка і швидко розкладається на дві молекули 3-фосфогліцеролової кислоти (3-ФГК).

Відновлення. 3-ФГК відновлюється до 3-фосфогліцеролового альдегіду (3-ФГА), частина молекул якого йде в цитоплазму на синтез 6-карбонового моносахариду (глюкози або фруктози). Тут, крім АТФ, використовується також НАДФН.

Регенерація. Частина молекул 3-ФГА використовується для синтезу рибулозо-1,5-бісфосфату, який вступає в новий цикл.

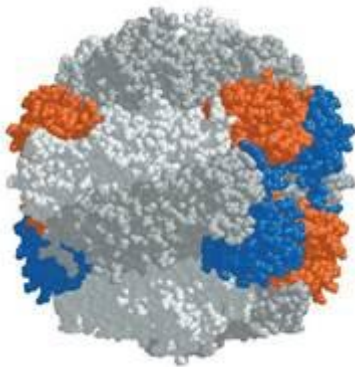


**Мал. 46.2. Схема циклу Кальвіна — шляхи фіксації Карбону під час фотосинтезу**

### **Фермент RuBisCo**

RuBisCo (мал. 46.3) є дуже важливим ферментом на Землі, оскільки саме він включає неорганічний  $\text{CO}_2$  з атмосфери у біологічний кругообіг. Іншого подібного ферменту не існує. Цей фермент виявлений у фотосинтезуючих клітинах усіх наземних і водних еукаріотичних фототрофів і ціанобактерій, у більшості пурпурних і зелених бактерій та у безхлорофільних хемоавтотрофних бактерій. Вважається, що це найпоширеніший на Землі і переважний у кількісному відношенні білок.

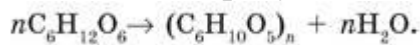
Реакція, що каталізується ферментом RuBisCo, відбувається дуже повільно (кілька молекул  $\text{CO}_2$  на секунду), тому в стромі хлоропластів цей фермент може становити до половини всього білка. На рівні цього ферменту здійснюється регуляція швидкості циклу Кальвіна.



**Мал. 46.3. Модель молекули RuBisCo**

### Синтез, запасання і використання крохмалю

Трикарбонові фосфосахариди (3-ФГА), що утворилися на другій стадії циклу Кальвіна, транспортуються в цитоплазму клітини, де з'єднуються один з одним і утворюють шестикарбоновий сахарид — глюкозу або фруктозу. Надалі глюкоза може полімеризуватися в крохмаль, целюлозу та інші сполуки:



Крохмаль є основним запасним полісахаридом у рослинах. У клітинах він зберігається у вигляді крохмальних зерен діаметром від 1 до 100 мкм. Зазвичай крохмаль концентрується в листках у період активного фотосинтезу, після чого перетворюється на розчинну сахарозу, яка транспортується в інші частини рослини.

Крохмаль накопичується у насінні й використовується під час проростання. Відкладення крохмалю накопичуються також у підземних пагонах (бульбах, цибулинах, кореневищах), паренхімі провідних тканин коренів і стебел. Особливо багатими на крохмаль є бульби картоплі, насіння злаків, бобових, гречаних рослин (мал. 46.4).



Мал. 46.4. Уміст крохмалю в продуктах харчування

### Ключова ідея

У ході темної фази фотосинтезу у стромі хлоропластів відбувається фіксація молекул  $\text{CO}_2$  і утворюються молекули глюкози. Надалі глюкоза може полімеризуватися в крохмаль, целюлозу та інші органічні сполуки. Сукупність послідовних реакцій темної фази називається циклом Кальвіна. Ключова реакція приєднання молекули  $\text{CO}_2$  каталізується ферментом RuBisCo.

### 3. Фотосинтез у прокаріотів

Фотосинтезуючими є багато груп бактерій, зокрема ціанобактерії. У бактерій немає хлоропластів, тому фотосинтез відбувається в цитоплазмі та на внутрішніх складках плазматичної мембрани — мезосомах.

На мезосомах розташовані фотосинтезуючі пігменти — бактеріохлорофіли, які здійснюють світлову фазу фотосинтезу; темнова фаза відбувається в цитоплазмі.

Подібно до хлорофілу, бактеріохлорофіли поглинають енергію світла й випускають електрони, які передаються по електронотранспортному ланцюгу і забезпечують синтез АТФ, НАДФ Н. Далі відбувається фіксація  $\text{CO}_2$  у карбонові сполуки.

Бактеріальний фотосинтез може відбуватися як з виділенням кисню, так і без його виділення.

Кисневий (окисгенний) фотосинтез відбувається у ціанобактерій (синьо-зелених водоростей) (мал. 47.1). Він подібний до фотосинтезу вищих рослин:

забезпечується хлорофілом а;

супроводжується виділенням молекулярного кисню;

відбувається з фотолізисом води як джерела електронів.

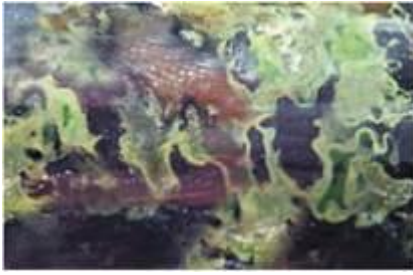
Безкисневий (аноксигенний) фотосинтез відбувається в пурпурних, деяких зелених і геліобактерій (мал. 47.2). Це найдавніші, примітивні форми фотосинтезу, які:

- 1) забезпечуються бактеріохлорофілом;
- 2) відбуваються без виділення кисню в навколишнє середовище;
- 3) як донора електронів використовують не воду, а інші речовини — гідроген сульфід, молекулярний Гідроген, молекулярний Сульфур, тіосульфат, органічні сполуки.

В екстремальних галофільних архебактерій виявлений так званий безхлорофільний фотосинтез. Роль хлорофілу в них виконує білок бактеріородопсин (мал. 47.3). Це фіолетовий світлочутливий пігмент, подібний до родопсину сітківки ока. Він поглинає світло і перетворює поглинену енергію на АТФ. Безхлорофільний бактеріородопсиновий фотосинтез є найбільш примітивним типом фотосинтезу. Порівняно з ним хлорофільний фотосинтез має суттєво більшу ефективність запасання енергії.



Мал. 47.1. Ціанобактерії здійснюють кисневий фотосинтез



**Мал. 47.2. Сіркобактерії здійснюють безкисневий фотосинтез**



**Мал. 47.3. Бактеріородопсин — трансмембранний білок, що забезпечує безхлорофільний фотосинтез в архей роду *Halobacterium***

### **Планетарне значення фотосинтезу**

Перші земні організми були анаеробними гетеротрофами — вони поглинали готові органічні речовини з первинних водойм. Згодом готової органіки стало не вистачати, й організми почали шукати інші джерела речовин. Однією з адаптацій було виникнення автотрофного типу живлення. Перші автотрофи використовували безкисневий фотосинтез. Самостійно синтезуючи необхідні речовини, вони перестали конкурувати за них з гетеротрофами, посіли нові екологічні ніші та створили безліч нових форм і видів.

Наступним етапом була поява кисневого фотосинтезу. Молекулярний кисень видалявся з клітин як побічний продукт, оскільки він був токсичний для давніх автотрофних анаеробів. Згодом кисень накопичувався в атмосфері, й організми почали виробляти способи захисту від його токсичної дії. Так виникли аероби. З'явилися нові метаболічні шляхи, що використовують кисень для ефективного вироблення енергії (кисневе дихання). Анаероби зникли або збереглися у важкодоступних місцях.

Унаслідок високої концентрації кисню в атмосфері сформувався озоновий шар. Він захищав планету від жорсткого сонячного випромінювання. Організми змогли вийти з води на суходіл, що зумовило різкий стрибок видоутворення.

Сьогодні основними фотосинтезуючими організмами на Землі є зелені рослини і ціанобактерії. Фотосинтез є основним джерелом біологічної енергії (мал. 47.4). Фотосинтезуючі автотрофи використовують її для синтезу органічних речовин. Гетеротрофи існують за рахунок енергії, запасеної автотрофами у вигляді хімічних зв'язків, вивільняючи її в процесах дихання і бродіння.

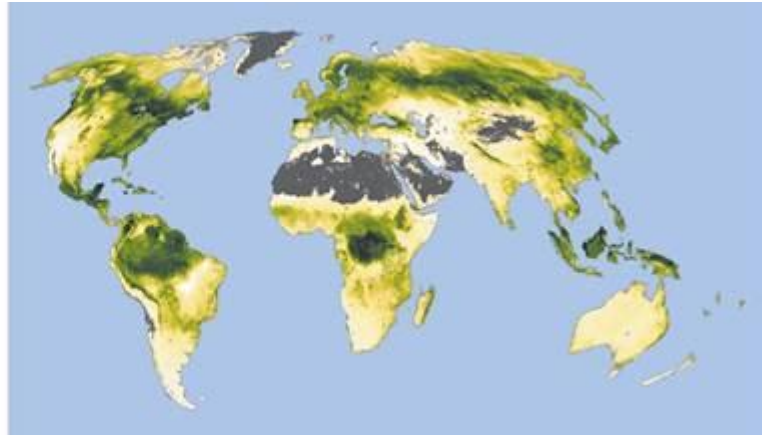
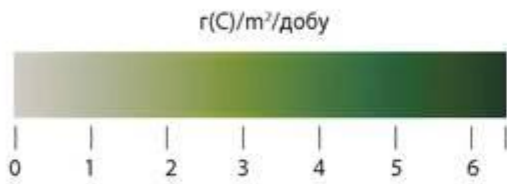
### **Функції фотосинтезу**

**Накопичення органічної біомаси.**

У процесі фотосинтезу рослини утворюють 160—240 млрд тонн біомаси на рік (у перерахунку на суху речовину). За час існування життя на Землі органічні залишки накопичувалися і модифікувалися (гумус ґрунтів, мул, торф, кам'яне вугілля, осадові породи морів і океанів).

Підтримка складу атмосфери. Щорічно в ході фотосинтезу в атмосферу надходить 70—120 млрд тонн кисню. Сьогодні він становить близько 21 % за обсягом повітря. Фотосинтез і дихання підтримують відносно сталий рівень  $\text{CO}_2$  в атмосфері (0,03 %), уміст якого впливає на тепловий режим планети.

Утворення озонового шару. На висоті близько 25 км під дією сонячної радіації з кисню  $\text{O}_2$  утворюється озон  $\text{O}_3$ . Шар озону затримує значну частину ультрафіолетового випромінювання (довжина хвилі 240—290 нм), згубного для живих організмів.



**Мал. 47.4. Первинна продукція органічної речовини в процесі фотосинтезу на суходолі**

### **Ключова ідея**

Кисневий фотосинтез за допомогою хлорофілу притаманний зеленим рослинам і ціанобактеріям. Безкисневий і безхлорофільний фотосинтез є найдавнішими і примітивними формами фотосинтезу, що здійснюються деякими бактеріями й археями за допомогою бактеріохлорофілу і бактеріородопсину. Виникнення фотосинтезу змінило еволюцію організмів і склад атмосфери, літосфери і гідросфери Землі.

#### 4. Процес хемосинтезу

Одним з видів автотрофного живлення є хемосинтез — процес, у якому енергію для утворення органічних речовин організм отримує від реакцій окиснення неорганічних сполук.

Такий тип живлення характерний тільки для бактерій і архей.

Хемосинтез здійснюється без участі світла. Це відрізняє хемосинтезуючі організми від фотосинтезуючих, оскільки останні використовують як джерело енергії сонячне світло, а не енергію хімічних реакцій.

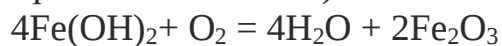
Для одержання енергії мікроорганізми використовують енергію реакцій окиснення сірководню, амоніаку, водню, ферум(II) оксиду та інших речовин. Енергія, що отримується під час окиснення, запасається у формі АТФ.

Речовинами, з яких відбувається синтез органічних молекул, є вуглекислий газ або метан.

Процес хемосинтезу відкрив 1889 року видатний український мікробіолог С. М. Виноградський.

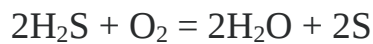
##### Групи хемосинтезуючих організмів

**Залізобактерії.** Існують за рахунок окиснення Феруму (двовалентного  $\text{Fe}^{2+}$  до тривалентного  $\text{Fe}^{3+}$ ):



Утворений ферум(III) оксид залізобактерії відкладають у своїй слизовій оболонці. Ці мікроорганізми поширені в прісних і морських водоймах (мал. 48.1, 48.2).

**Сіркобактерії.** Окиснюють сірководень (гідроген сульфід) до молекулярної сірки:



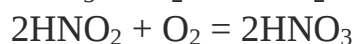
У разі нестачі сірководню окиснюють сульфур до сульфатної кислоти:



Сіркобактерії можуть жити в океанах на величезній глибині, у тих місцях, де з розломів земної кори у воду виходить сірководень. Колосальна кількість сіркобактерій існує в Чорному морі, в якому на глибинах понад 200 м вода насичена сірководнем.

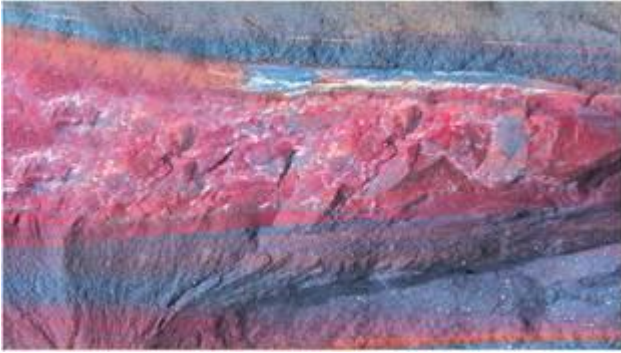
**Тіонові бактерії.** Окиснюють відновлені сполуки Сульфуру та двовалентного Феруму до сульфатної кислоти. Деякі представники тіонових бактерій здатні виживати й розмножуватися за екстремальних концентрацій кислоти ( $\text{pH} = 2$ ). Більшість із них є аеробами.

**Нітрифікуючі бактерії.** Окиснюють амоніак, що утворюється в процесі гниття органічних речовин (білків), до нітритної та нітратної кислот:



Утворені кислоти взаємодіють з ґрунтовими мінералами, утворюючи нітрити та нітрати. Нітрифікуючі бактерії поширені в ґрунті та водоймах. Багато з них є симбіонтами рослин.

**Водневі бактерії** окиснюють водень, який утворюється під час анаеробного розкладання органічних решток:  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ . Отриману енергію використовують для перетворення  $\text{CO}_2$  на метан та інші органічні сполуки.



**Мал. 48.1. Залізисті кварцити — результат життєдіяльності залізобактерій**



**Мал. 48.2. Результати діяльності залізобактерій у водопровідних трубах**

### **Значення хемосинтезу**

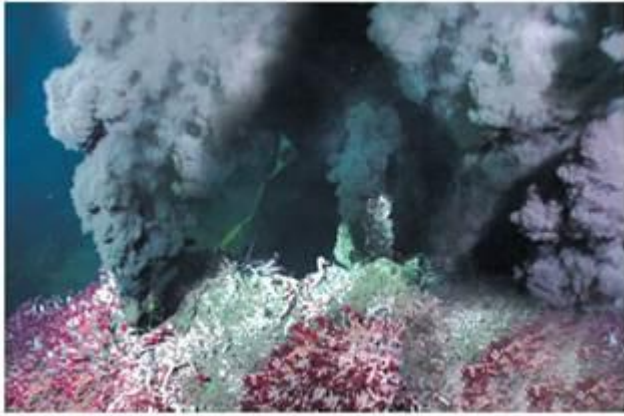
Органічна продукція хемосинтезу становить менше 1 % від фотосинтезу, проте він має величезне значення для біологічних і геохімічних процесів на Землі. Основне значення хемосинтезу полягає в тому, що він забезпечує кругообіг найважливіших елементів зі змінним ступенем окиснення: Феруму, Сульфуру, Нітрогену та інших.

Суттєве значення в кругообігу **Нітрогену** належить хемотрофним нітрифікуючим бактеріям. Вони поширені в природі, і здійснювані ними процеси відбуваються у досить великих масштабах. Процес нітрифікації є джерелом нітратів і нітритів — сполук Нітрогену, що засвоюються рослинами і включаються до складу органічних речовин. До того ж, життєдіяльність нітрифікуючих бактерій — найважливіший чинник родючості ґрунтів. Важливу роль у процесах перетворення речовин у ґрунтах відіграють також водневі бактерії.

**Залізобактерії** відіграють важливу роль у кругообігу таких елементів, як Ферум і Манган. Завдяки їхній життєдіяльності на дні водойм відкладаються залізні й марганцеві руди.

**Сіркобактерії**, утворюючи сульфатну кислоту, сприяють поступовому руйнуванню і вивітрюванню гірських порід, руйнуванню кам'яних і металевих споруд.

Хемосинтезуючі організми виробляють органічні речовини там, де фотосинтез неможливий. Глибоко на дні океанів існують справжні «оази життя» навколо «чорних паліїв». «Чорні палії» — це підводні гарячі джерела, вода яких насичена сполуками Сульфуру. Сіркобактерії використовують ці сполуки для свого росту, а ними живляться інші живі організми (мал. 48.3).



**Мал. 48.3. Скупчення живих організмів біля «чорного палія»**

### **Ключова ідея**

Хемосинтез — вид автотрофного живлення, у якому енергію для утворення органічних речовин організм отримує від реакцій окиснення неорганічних сполук. До хемосинтетиків належать залізобактерії, сіркобактерії, тіонові, нітрифікуючі, водневі бактерії. Хемосинтез забезпечує кругообіг найважливіших елементів зі змінним ступенем окиснення: Феруму, Сульфуру, Нітрогену тощо.

## 5. Глікогенез

У рослинах, як ви вже знаєте з матеріалу § 46, глюкоза, що синтезована в реакціях фотосинтезу, полімеризується до крохмалю. Саме крохмаль є запасним полісахаридом рослин.

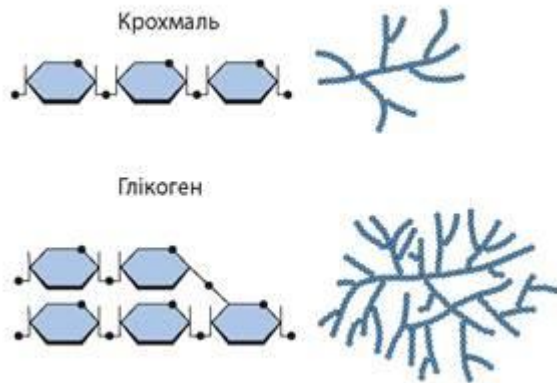
У грибів, тварин і людини вуглеводи також запасуються, але переважно у вигляді глікогену. Це полісахарид, теж полімер глюкози. Структурно глікоген є аналогом крохмалю, але має більший ступінь розгалуженості (мал. 49.1).

Процес біосинтезу глікогену називається глікогенезом. Глікогенез стимулюється гормоном інсуліном. Полімеризація здійснюється кількома ферментами, що будують прямі або розгалужені ланцюжки глікогену. У лінійних ділянках основного ланцюга залишки глюкози зв'язані 1,4-глікозидними зв'язками, тоді як точки розгалуження формуються 1,6-глікозидними зв'язками (мал. 49.2).

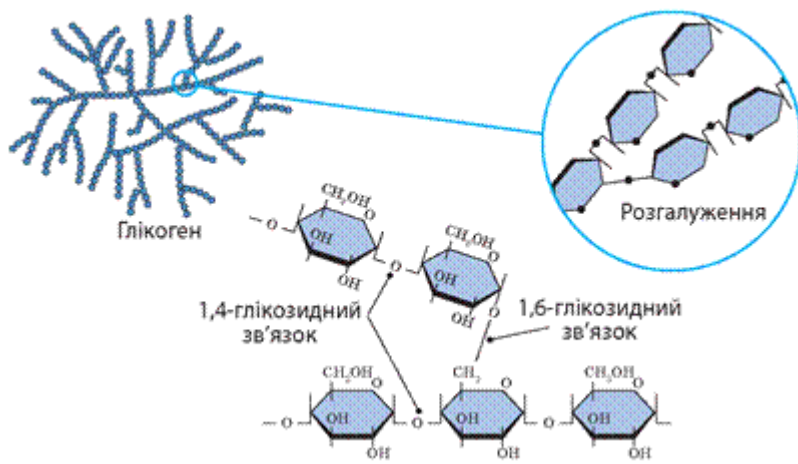
Синтезований глікоген накопичується переважно в клітинах печінки й м'язів (мал. 49.3). Його запаси є енергетичним резервом організму, що швидко мобілізується у разі потреби. За нестачі в організмі глюкози (через кілька годин після їжі або під час фізичних навантажень) глікоген печінки розщеплюється ферментами до глюкози, яка надходить у кров і використовується для харчування всього організму. У м'язах глікоген переробляється на глюкозу винятково для локального споживання; він є головним джерелом енергії для працюючих м'язів.

### Дізнайтеся більше

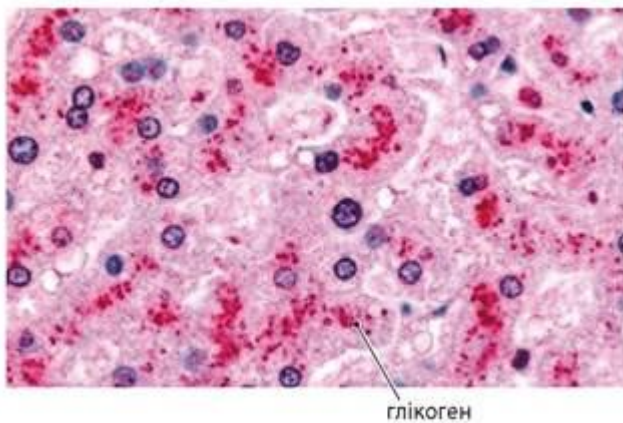
Вуглеводи, які ми вживаємо з їжею (хліб, фрукти, солодоші) у процесі травлення розщеплюються до глюкози, яка потрапляє в кров. Ця глюкоза може використовуватися або для поточних енергетичних потреб, або для створення запасів енергії. Спочатку організм синтезує з глюкози глікоген, а пізніше починає перетворювати глюкозу на жири.



Мал. 49.1. Структура глікогену порівняно зі структурою крохмалю



Мал. 49.2. Глікоген — полімер глюкози



Мал. 49.3. Включення глікогену в клітинах печінки

## 6. Біосинтез жирних кислот і ліпідів

Жири в організмі синтезуються з вуглеводів, тому найшвидше жирні кислоти і жири синтезуються після вживання вуглеводневої їжі. Найбільш активно цей процес відбувається у печінці та жировій тканині.

Синтез жирних кислот і жирів називається ліпогенезом. Їхній синтез відбувається у цитоплазмі клітини. Субстратом для синтезу є вже добре відома вам сполука — ацетил-КоА. Процес є циклічним: у кожному циклі до радикалу жирної кислоти, що поступово подовжується, додається два атоми Карбону. У кожному циклі використовується НАДФ Н і АТФ. Кінцевим продуктом синтезу є пальмітинова кислота, що має 16 атомів Карбону (мал. 49.4).

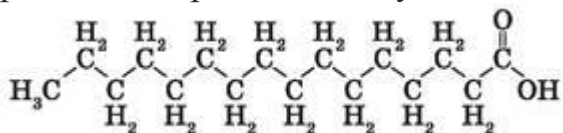
Інші жирні кислоти в організмі людини синтезуються саме з пальмітинової кислоти. Але подовження ланцюгів жирних кислот до 18, 20 і 22 атомів Карбону відбувається вже не у цитоплазмі, а в мітохондріях.

Однак не всі жирні кислоти можуть бути нами синтезовані. Для людини незамінними є дві жирні кислоти — ліолева і а-ліноленова. Їх джерелом може бути тільки їжа. Вони містяться у всіх рослинних оліях. Нестача таких кислот призводить до порушення обміну речовин.

Синтезовані жирні кислоти входять до складу інших молекул: жирів і фосфоліпідів. Стероїдні гормони (тестостерон, естрогени) синтезуються з холестеролу.

Жири, синтезовані в печінці, транспортуються кров'ю в складі ліпопротеїнів. Жири, синтезовані в клітинах жирової тканини, запасуються в них (мал. 49.5).

На відміну від вуглеводів, жири становлять довготривалий енергетичний резерв організму. Вуглеводи ж, запаси яких представлені в організмі людини у вигляді глікогену, виконують більш оперативну функцію енергопостачання протягом нетривалого часу.



Мал. 49.4. Структурна формула пальмітинової кислоти



Мал. 49.5. Клітини жирової тканини

### Дізнайтеся більше

Середньостатистична людина має запас жиру приблизно 13 кг, цього могло б вистачити на 40 днів голодування в умовах помірного фізичного навантаження.

А загальні запаси глікогену в організмі неспортсмена приблизно 200—300 грамів, чого вистачить менш ніж на одну добу голодування.

**Ключова ідея**

Запаси глікогену і жирів є енергетичними резервами у тварин і людини. Обидві речовини можуть синтезуватися з глюкози через утворення ацетил-КоА.

| Стадія 1. Світлова                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Стадія 2. Темнова                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Світло</p> <p>Акцептор електронів</p> <p>Ланцюг переносників електронів</p> <p>Фотосистема II</p> <p><math>H_2O \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2H^+</math><br/>Фотоліз води</p> <p>Світло</p> <p>Акцептор електронів</p> <p>Ланцюг переносників електронів</p> <p>Фотосистема I</p> <p><math>2e^-</math></p> <p><math>2e^-</math></p> <p><math>NADP^+ + 2H^+ \rightarrow NADPH + H^+</math></p> | <p>З 3 світлових реакцій</p> <p><b>12 АТФ</b></p> <p><b>12 НАДФ·Н</b></p> <p>Дифосфогліцеролова кислота (12 молекул)</p> <p>Фосфогліцеролова кислота (12 молекул)</p> <p><b>6 CO<sub>2</sub></b></p> <p>Рибулосидифосфат (6 молекул)</p> <p>Карбоксилювання</p> <p>Рибулосомонофосфат (12 молекул)</p> <p>Тріозофосфат (12 молекул)</p> <p>Відновлення</p> <p>Глюкоза (1 молекула)</p> <p>Регенерація карбонових сполук</p> <p><b>6 АТФ</b></p> <p>З 3 світлових реакцій</p> |
| Вихідні речовини: $H_2O$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Вихідні речовини: $CO_2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Продукти: НАДФН, АТФ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Продукти: глюкоза                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |