



Ярина Колісник

ЗЕЛЕНА ФАБРИКА ЖИТТЯ



Сонце — основа життя

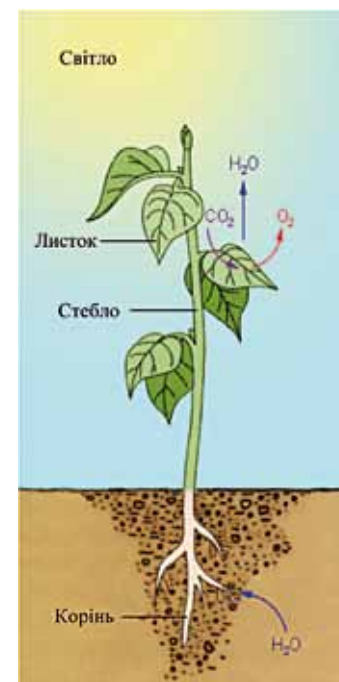
Так говорили античні філософи і не помилялися. Всесвіт наповнений різними видами енергії, проте основним її джерелом для переважної більшості біологічних процесів на нашій планеті є сонячне світло. Але і тут не все так просто. Вловлювати світлову енергію Сонця і перетворювати її на щось корисне, а саме на енергію хімічних зв'язків синтезованих вуглеводів, не кожен мастак. Це можуть зробити лише ті організми, які опанували секрети фотосинтезу – фототрофи. До них належать рослини та фотосинтезуючі бактерії, зокрема зелені, пурпурові, ціанобактерії. Про таємниці фотосинтезу бактерій ми поговоримо у наступній статті.

Тільки половина сонячного випромінювання, яке падає на нашу планету, доходить до поверхні Землі, тільки 1/8 сонячного потоку має довжину хвилі, яка підходить для фотосинтезу, і тільки 16 % таких променів (приблизно 1 % від загальної енергії) використовують рослини. Саме від цього одного відсотку залежить усе життя на Землі.

Тварини, гриби, багато бактерій є гетеротрофами і не можуть здійснювати фотосинтез, тому їхня життєдіяльність повністю залежить від органічної речовини і кисню, які утворюють рослини та ціанобактерії. А вони, на щастя, дуже працьовиті. Так, впродовж року рослини суходолу і океану

маніпулюють колосальними кількостями речовини і енергії: засвоюють $1,5 \times 10^{11}$ т вуглекислого газу, розкладають $1,2 \times 10^{11}$ т води, виділяють 2×10^{11} т вільного кисню і запасують 6×10^{20} калорій енергії Сонця у вигляді хімічної енергії продуктів фотосинтезу. Так, завдяки фотосинтезу Карбон, що входить до складу CO_2 повітря, стає складовою органічних речовин, які передаються ланцюгами живлення гетеротрофним організмам. Кисень атмосфери Землі, який потрібний для дихання мешканців нашої планети, також утворюється в результаті фотосинтезу. Крім того, вільний кисень бере участь в утворенні озонового шару атмосфери, який захищає живі організми Землі від згубного впливу короткохвильових ультрафіолетових космічних променів.

Ось як писав про космічну роль зелених рослин російський дослідник фотосинтезу К. А. Тімірязєв: „Рослина – посередник між небом і землею. Вона є справжнім Прометеєм, який викрав вогонь з неба. Викрадений нею промінь сонця горить і в мерехтливому каганці, і в сліпучій іскрі електрики. Промінь сонця приводить у рух і величезний маховик гігантської парової машини, і пензель художника, і перо поета... Дайте найкращому кухарю вдосталь свіжого повітря, вдосталь сонячного світла, річку чистої води і попросіть, щоб з усього цього він приготував цукор, крохмаль, жири і зерно, – він вирішить, що ви насміхаєтеся з нього. Але те, що здається цілком фантастичним для людини, з легкістю відбувається в зелених листках рослин”.



Мал. 1. Газообмін у рослині під час фотосинтезу, поглинання і випаровування води

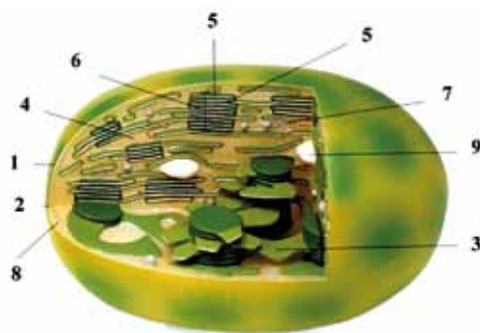
Чому листки зелені?



Мал. 2. Хлоропласти в рослинних клітинах

Зеленого забарвлення листкам надають хлоропласти (мал. 2). Ці органели мають вигляд подовгастих або сферичних тілець завдовжки до 10 мкм. Хлоропласти в клітинах можна побачити у світловий мікроскоп (мал. 3). Залежно від освітлення листка вони можуть





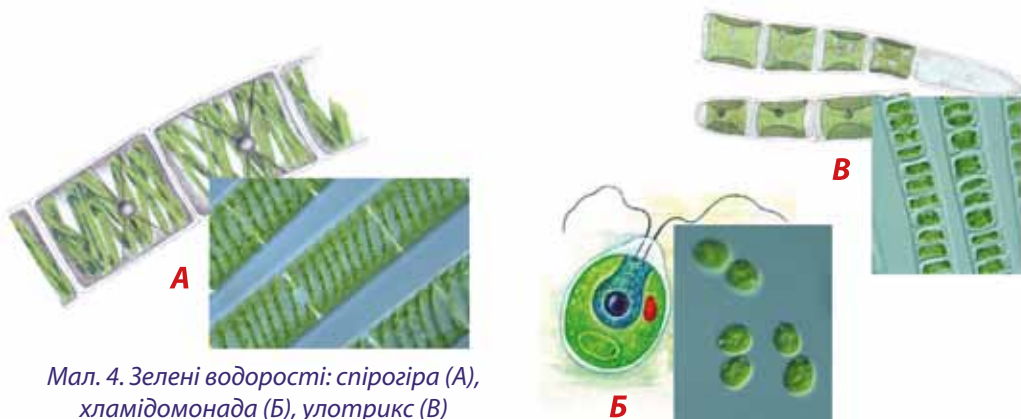
Мал. 3. Будова хлоропласта.
Пояснення позначень в тексті

змінювати свою форму і розташування в клітині.

Хлоропласти – двомембранні органели. Вони оточені гладкою зовнішньою мембраною (1), а внутрішня мембрана (2) утворює вгинання – ламели (3) – у внутрішній простір хлоропластів – строму (4). З внутрішньою мембраною пов'язані тилакоїди (5) – структури, які мають вигляд плоских мішечків. Частина тилакоїдів зібрана в грани (6), які нагадують стопку монет. У стромі хлоропластів є молекули ДНК (7), РНК, рибосоми (8), зерна крохмалю (9), жирові включення.

Хлоропласти містяться в клітинах листків та інших зелених органів вищих рослин. Кількість хлоропластів у клітинах різних типів неоднакова і коливається від 20 до 50, а у великих стовпчастих клітинах фотосинтезуючої тканини листка тютюну їх може бути до 1 000. Такі фотосинтезуючі органели є й у клітинах водоростей, і їх часто називають хроматофорами. Вони дуже різноманітні за формою: чашоподібні у хламідомонади, у вигляді незамкненого кільця в улотрикса, довгих спіральних стрічок у спірогіри (мал. 4). Особливий фотосинтезуючий апарат є й у прокаріот (зелені та пурпурові сіркові бактерії, ціанобактерії): хлоросоми, фікобілісоми і тилакоїди.

Зелений колір хлоропластів зумовлений наявністю в них пігменту хлорофілу. Правильніше сказати хлорофілів, бо існує кілька їхніх типів, які відрізняються будовою та поширеністю в рослинному світі. Хлорофіл *a* є у всіх рослинах. У клітинах вищих рослин та зелених водоростей є хлорофіл *b*. Бурі та діатомові водорості містять хлорофіл *c*, а червоні водорості – хлорофіл *d*.

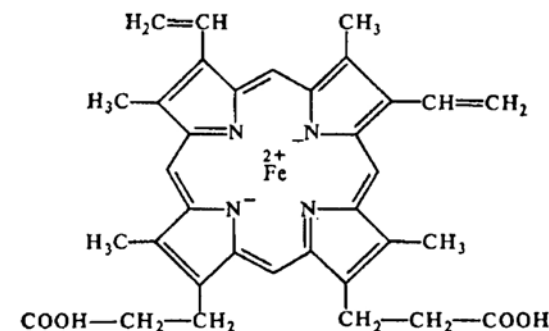
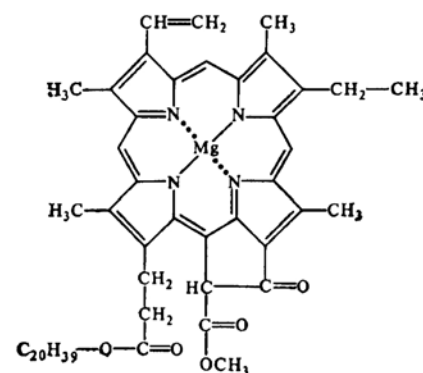


Мал. 4. Зелені водорості: спірогіра (А), хламідомонада (Б), улотрикс (В)



Хлорофіли фотосинтезуючих бактерій мають деякі особливості і називаються бактеріохлорофілами.

Чарльз Дарвін вважав, що хлорофіл – „одна з найцікавіших речовин на земній поверхні”. Погодьтеся, є якась таємниця в тому, що молекула хлорофілу схожа на гем¹ молекули гемоглобіну (мал. 5). Щоправда, в центрі



Мал. 5. Структурна формула хлорофілу *a* (А) та гему гемоглобіну (Б)

молекули хлорофілу міститься атом Магнію, а не Феруму. Але для синтезу хлорофілу необхідний саме Ферум.

Щоб виробляти енергію, люди будують великі і потужні електростанції. Природа ж розмістила свої електростанції у зеленому листочку. На жаль, у людей немає таких маленьких і таких надійних енергетичних елементів.



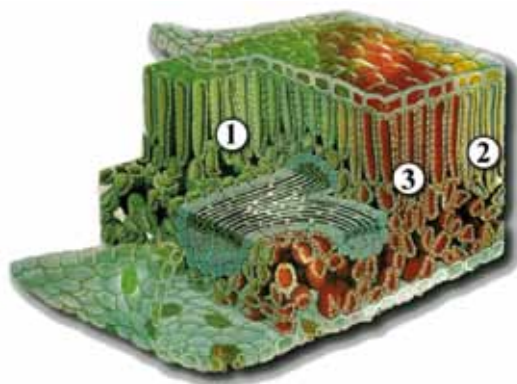
Чому листки жовтіють?

Зелена осінь. Уявляєте таку? Напевно, ні. Осінь золота. Древа урочисто проводжають літо в ошатному, барвистому вбранні усіх відтінків, від зелених до пурпурових. Під ногами ледь чутно шелестить жовте, буре, багряне листя. Але чи задумувались ви, звідки береться цей колір листків, наче зігрітий сонцем і теплом літа? Звідки рослини знають, що прийшла осінь?

Восени скорочується світловий період доби. Це сигнал для рослин – настав час готуватися до зими. У помірному кліматі більшість видів рослин скидають листя для зменшення випаровування води взимку. Напередодні листопаду в листках руйнується зелений хлорофіл і



¹Молекула гемоглобіну складається з двох частин: білкової (глобіну) та ферумвмісної небілкової (гему).



Мал. 6. Пігменти каротиноїди (2) і антоціани (3) забарвлюють листок восени замість хлорофілу (1)

Каротиноїди в рослинному організмі виконують ще одну важливу місію – беруть участь у фотосинтезі як допоміжні пігменти. Вони поглинають кванти світла синьо-фіолетової та синьої ділянок спектру і передають їхню енергію хлорофілу. Крім того, каротиноїди захищають хлорофіл від окиснення киснем, який утворюється в процесі фотосинтезу.



Мал. 7. Молоді листки бузини червоної

Цікаво, що в деяких рослин (бузини червоної, піериса японського) листки можуть змінювати забарвлення не лише восени (мал. 7, 8). Молоде листя є червоним або фіолетовим, а зеленіє пізніше. Це пов'язано з підвищеним вмістом в молодих листках антоціанів, які мають властивість перетворювати світлову енергію в теплову, що важливо для розвитку рослин ранньою весною.

Мал. 8. Молоді пагони піериса японського



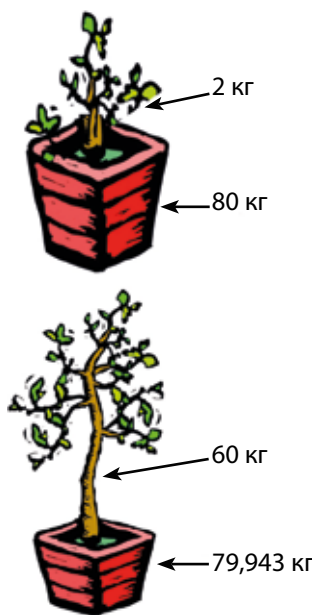
Хто відкрив секрети фотосинтезу?



Мал. 9. Ян Баптист ван Гельмонт (1580–1644)

Завдяки яким процесам з маленької насінини, кинутої в землю, виростає величезне дерево? Це питання давно хвилювало вчених. Давньогрецький філософ і вчений Аристотель (384–322 рр. до н. е.) міркував так: „Рослина – це тварина, поставлена на голову. Органи розмноження в рослині вгорі, а голова низу. За допомогою коріння, що відіграє роль рота, рослина добуває із землі готову їжу”.

Фламандський дослідник Ян Баптист ван Гельмонт (мал. 9) на початку XVII ст. провів дослід і довів, що для живлення рослин важливе значення мають не тільки речовини ґрунту (мал. 10). Учений засипав у діжку 80 кг висушеної землі і посадив гілку верби масою 2 кг. Рослину поливав тільки дощовою водою. Через 5 років дерево виросло і його маса становила 60 кг, а маса землі у діжці – 79 кг 943 г. Отже, маса дерева збільшилася на 58 кг, а маса землі зменшилася лише на 57 г! Така різниця маси землі не могла компенсувати кількість речовин, затрачених на ріст верби. Дослідник зробив висновок, що збільшення маси рослини відбулось за рахунок води. Це був перший в історії кількісний біологічний експеримент з живим організмом. Але висновок ван Гельмонта про таку велику роль води для рослин виявився помилковим.



Мал. 10. Дослід Яна Баптиста ван Гельмонта



Мал. 11. Стівен Хейлс (1677–1761)

У 1727 році англійський ботанік Стівен Хейлс (мал. 11) видав книгу, в якій повідомив, що рослини використовують повітря як поживну речовину для росту.



Мал. 12. Джозеф Прістлі (1733–1804)

Дещо пізніше (1770–1780 рр.) знаменитий англійський хімік Джозеф Прістлі (мал. 12), один з першовідкривачів кисню, провів серію дослідів, вивчаючи горіння та дихання, і дійшов висновку, що зелені рослини здатні відновлювати повітря після горіння.

Дещо пізніше (1770–1780 рр.) знаменитий англійський хімік Джозеф Прістлі (мал. 12), один з першовідкривачів кисню, провів серію дослідів, вивчаючи горіння та дихання, і дійшов висновку, що зелені рослини здатні відновлювати повітря після горіння.



Мал. 13. Дослід Джозефа Прістлі

Учений спалював свічку в замкнутому об'ємі повітря і виявив, що після цього воно вже не підтримувало горіння (мал. 13). Миша, поміщена в таку посудину, гинула. Однак гілочка м'яти продовжувала жити в такому повітрі тижнями. Крім того, Прістлі виявив, що в повітрі, „відновленому” гілочкою рослини, знову горить свічка і дихає миша. Тепер ми можемо пояснити, що під час горіння свічки вміст кисню у замкнутому об'ємі повітря зменшувався, а під час фотосинтезу, що відбувався у гілочці м'яти, кількість кисню знову зростала. Ось що писав Прістлі про свої досліді: „Мені пощастило випадково знайти метод очищення повітря, забрудненого горінням свічки, і відкрити щонайменше один очисник, яким користується Природа, – це рослини. З дослідів я переконався, що це повітря не гасить свічку і не шкодить миші, яку я туди помістив...” Учений зробив висновок, що рослини виділяють кисень, необхідний для дихання і горіння, проте не зауважив, що для цього рослинам потрібне світло.



Мал. 15.
Жан Сенеб'є
(1742–1809)

Через кілька років голландський лікар Ян Ингенхауз (мал. 14) виявив, що рослини утворюють кисень лише на сонячному світлі, і цей процес відбувається тільки в їхніх зелених частинах. У 1782 році швейцарський дослідник Жан Сенеб'є (мал. 15) продовжив дослідження Яна Ингенхауза і показав, що джерелом Карбону для рослин є вуглекислий газ.

У 1818 році французькі хіміки П'єр Жозеф Пельтьє (1788–1842) і Жозеф Б'єнеме Каванту (1795–1877) (мал. 16) вперше виділили зелений пігмент рослин і назвали його хлорофілом. Наприкінці XIX ст. російський вчений Михайло Семенович Цвет (мал. 17), досліджуючи пігменти листків, виділив за допо-



Мал. 14.
Ян Ингенхауз
(1730–1799)



Мал. 16. Пам'ятник
П. Ж. Пельтьє
і Ж. Б. Каванту



могою відкритого ним методу хроматографії різні типи хлорофілу.

У 1842 році німецький лікар та фізик Роберт Майєр (1814–1878) на основі закону збереження енергії постулював, що рослини перетворюють енергію сонячного світла в енергію хімічних зв'язків. У 1877 році німецький вчений Вільгельм Пфеффер (мал. 18) назвав цей процес фотосинтезом.

Важливе значення для розуміння процесів фотосинтезу мали роботи російського ботаніка і фізіолога рослин Климента Аркадійовича Тімірязєва (мал. 19). Вчений з'ясував зв'язок фотосинтезу з інтенсивністю та спектральним складом сонячного світла. Провівши в 1871–1875 рр. серію дослідів, він встановив, що зелені рослини найінтенсивніше поглинають промені червоної і синьої частин сонячного спектру, а не жовтої, як вважали раніше. Зелені промені хлорофіл відбиває, тому й здається зеленим.

На основі цих даних німецький фізіолог рослин Теодор Вільгельм Енгельман (мал. 20) у 1883 році розробив бактеріальний метод вивчення процесів фотосинтезу в рослинах.



Мал. 17. Михайло
Семенович Цвет
(1872–1919)



Мал. 18. Вільгельм Пфеффер
(1845–1920)

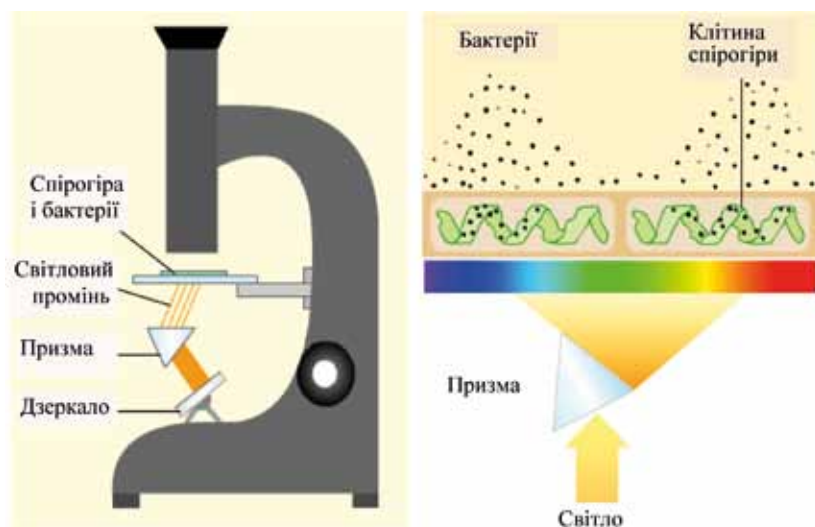


Мал. 19. Клімент
Аркадійович Тімірязєв
(1843–1920)



Мал. 20. Теодор Вільгельм
Енгельман (1843–1909)

На той час не було датчиків, які могли би зафіксувати, в якій частині сонячного спектру швидше відбувається фотосинтез. Замість них Енгельман запропонував використати бактерії. Вчений припустив: якщо помістити в краплину води клітини рослини разом з рухливими аеробними бактеріями і освітити їх променями різного спектрального складу, то бактерії концентруватимуться в тих ділянках рослинної клітини, де інтенсивніше виділяється кисень. Щоб перевірити це, Енгельман вдосконалив світловий



Мал. 21. Дослід Т. В. Енгельмана

мікроскоп, закріпивши над дзеркальцем призму, яка розкладала сонячне світло в спектр. Фотосинтезуючою рослиною в експерименті була зелена водорість спірогіра. Експеримент довів, що найбільша кількість бактерій збиралась біля тих ділянок водорості, які освітлювалися синім і червоним світлом (мал. 21). Дані, отримані на сучасному обладнанні, повністю підтверджують результати, отримані Т. В. Енгельманом 130 років тому.

Провівши аналогічні дослід з різними водоростями, вчений встановив, що максимум інтенсивності фотосинтезу в червоних водоростей спостерігається під час освітлення їх зеленою частиною спектру, у синьо-зелених – жовтою, а в бурих – синьою і зеленою. Саме такі промені сонячного спектру найкраще поглинає кожна з груп водоростей.

Такі відмінності пов'язані з пристосуванням водоростей до життя на різних глибинах водойм. Відомо, що вода сильніше поглинає червоні промені,



А



Б

Мал. 22. Бура водорість фукус (А) і червона порфіра (Б)

ні, зелені та сині – слабше. Тому зелені і синьо-зелені водорості живуть біля поверхні й у верхніх шарах водойм. А на середніх і великих глибинах поширені бурі й червоні водорості. У їхніх хроматофорах є специфічні пігменти, що додатково поглинають енергію тих світлових променів, які проникають на відповідну глибину, і передають її молекулам хлорофілів. Саме ці пігменти надають бурим і червоним водоростям характерне забарвлення (мал. 22).



Мал. 23. Даніель Ізраель Арнон
(1910–1994)

Той факт, що кисень у процесі фотосинтезу утворюється з води, експериментально підтвердив у 1941 році Олександр Павлович Виноградов. У 1905 році англійський вчений Ф. Блекман висловив припущення, що фотосинтез складається з двох послідовних фаз: швидких світлових реакцій і низки повільніших незалежних від світла темнових реакцій. У 1954–1958 рр. американський учений польського походження Даніель Арнон (мал. 23) встановив механізм світлових стадій фотосинтезу, а суть процесу фіксації рослиною CO_2 наприкінці 1940-х років розкрив американський дослідник Мелвін Кальвін (мал. 24), використавши ізотопи вуглецю. За цю роботу в 1961 році йому була присуджена Нобелівська премія.



Мал. 24. Мелвін Еліс Кальвін
(1911–1997)

Учені, про яких ми розповіли в статті, і багато інших дослідників самовіддано працювали, щоб розкрити таємниці фотосинтезу. Завдяки їхнім роботам ми знаємо як працює „батарейка” зеленої рослини. У книзі „Життя рослин” К. А. Тімірязєв поетично розповідає про це: „Колись, десь на землю впав сонячний промінь, але він упав не на безплідний ґрунт, він упав на зелену стеблинку пшеничного паростка, або, краще сказати, на хлорофілове зерно. Зіткнувшись з ним, він згас, перестав бути світлом, але не зникнув. Він тільки затратився на...”. Ми продовжимо цю історію у наступній статті і розглянемо, які складні процеси приховує просте (на перший погляд!) сумарне рівняння фотосинтезу $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$, яке наводиться у шкільних підручниках біології.