

Skąd rośliny czerpią energię?

Joanna Kijowska-Oberc i Ewelina Ratajczak

Trudno wyobrazić sobie świat bez drzew. Te długowieczne rośliny pełnią zdumiewająco wiele funkcji w ekosystemach. Kształtują mikroklimat, zatrzymują wodę w glebie, dają schronienie zwierzętom, a także zapewniają im pożywienie w postaci swych owoców, liści i drewna. Choć drzewa oferują innym organizmom tak liczne „usługi”, na pierwszy rzut oka może wydawać się, że same nie potrzebują do życia zbyt wiele. Nic bardziej mylnego! Osiągnięcie imponujących rozmiarów przez drzewo, będące niegdyś drobnym nasieniem, wymaga równie imponującego nakładu energii.

Sygnal do działania – energia cieplna

Każde drzewo wymaga określonej dawki energii cieplnej, aby przeżyć. Wymagania te różnią się w zależności od środowiska, w którym wyewoluował dany gatunek. Te występujące w wyższych partiach gór lub w pobliżu koła podbiegunowego są przystosowane do znoszenia niskich temperatur, które nie stanowią dla nich przeszkody we wzroście, produkcji kwiatów i nasion. Do takich gatunków zaliczają się m.in. świerk syberyjski, jodła syberyjska i limba syberyjska, które tworzą drzewostany mieszane na północy Azji. Całkiem inaczej przedstawia się sytuacja w strefie podzwrotnikowej, na sawannach lub w lasach tropikalnych, gdzie drzewa potrzebują znacznie wyższych temperatur, by móc rozwijać się i rozmnażać. Niektóre z nich doskonale bronią się przed upałami, które zagrażałyby życiu przedstawicieli nawet ich blisko spokrewnionych krewniaków z północy. Za przykład może posłużyć znany wszystkim baobab, którego beczkowaty pień zbudowany z miękiszu wodnego może pomieścić ok. 100 tys. litrów wody. Drzewa tracą wodę wskutek transpiracji, tzn. parowania wody poprzez tkanki liści. Ten mechanizm umożliwia przepływ wody i soli mineralnych z korzeni do liści przez naczynia przewodzące w pniu. Liście afrykańskich akacji są mocno zredukowane, dzięki czemu powierzchnia transpiracji jest ograniczona, zaś spłaszczone ogonki liściowe służą akacjom jako aparat fotosyntetyczny.

Ciepło jest również niezbędne w poszczególnych fazach rozwoju drzewa, począwszy od etapu kiełkowania. Jeśli odpowiednia jego ilość nie zostanie dostarczona, nie zostaną uruchomione procesy fizjologiczne prowadzące do pęknięcia łupin nasennych i przedostania się przez nie zarodka. Nasiona gatunków drzew występujących w klimacie umiarkowanym nie są zdolne do kiełkowania zaraz po osiągnięciu biologicznej dojrzałości jesienią. Wykazują tzw. spoczynek względny, który umożliwia

im przetrwanie niekorzystnej pory roku. Kiełkowanie rozpoczyna się dopiero, gdy pojawią się warunki (np. odpowiednia temperatura i wilgotność otoczenia) stwarzające największe prawdopodobieństwo przeżycia młodej rośliny. Wyróżniamy również spoczynek bezwzględny, który wynika z niedojrzałości fizjologicznej lub anatomicznej nasion. W celu wybudzenia nasion ze spoczynku bezwzględnego stosuje się najczęściej zabieg stratyfikacji, który polega na poddaniu ich oddziaływaniu określonych warunków cieplnych i wilgotnościowych przy dostępie powietrza, co ma stanowić przyspieszone odtworzenie warunków, na jakie nasiona są wyeksponowane, leżąc w ściółce przez okres jesienno-zimowy. Są też takie gatunki, których nasiona nie mogą zostać rozsiane, jeżeli nie dojdzie do... pożaru lasu. Należy do nich sosna Banksa, występująca w Kanadzie i północno-wschodniej części USA – jej szyszki otwierają się jedynie pod wpływem ognia. Uwolnione w ten sposób nasiona mogą kiełkować i tworzyć wtórny las na powierzchni zniszczonej przez pożar.

Energia cieplna może również stanowić dla drzew specyficzny sygnał do rozpoczęcia określonego procesu życiowego. Zjawisko to obserwujemy, gdy już pierwszym wiosennym dniom towarzyszą stosunkowo wysokie temperatury powietrza. W efekcie kwiaty na drzewach i krzewach takich jak magnolia, jabłoń czy lilak pojawiają się ewidentnie wcześniej niż w przypadku, gdy wiosna jest chłodna. Towarzyszące globalnemu ociepleniu ekstremalne zjawiska pogodowe, takie jak fale upałów i coraz dłuższe okresy suszy mają bezpośredni wpływ na produkcję owoców i nasion, a tym samym na przetrwanie i utrzymanie różnorodności biologicznej ekosystemów. Temperatura może wpływać na rytm tzw. lat nasiennych czy zsynchronizowanej na danym obszarze, masowej produkcji nasion drzew. Wiele gatunków nie rozmnaża się rokrocznie, ale gromadzi energię, by potem w trakcie jednego sezonu wytworzyć nasiona w znaczącej ilości. Sygnałem o tym, że w kolejnym sezonie powinien nastąpić rok nasenny są właśnie stosunkowo wysokie temperatury powietrza. Zmiana klimatu sprawia jednak, że drzewa takie jak chociażby dobrze znany nam buk zwyczajny, zamiast obradzać co kilka lat, dostają sygnał, że jest wyjątkowo ciepło niemal każdego roku. Z tego powodu masowo wytwarzają kwiaty i nasiona coraz częściej, np. co dwa lata zamiast co osiem, za to mniej obficie; ponadto wiele nasion jest pustych (pozbawionych zarodka) bądź wykazuje niską żywotność (nie kiełkują lub siewki łatwo obumierają). Drzewa nie są bowiem w stanie zregenerować swoich sił w czasie zaledwie dwóch

lat od tak wielkiego wydatku energii, jakim jest rok nasienny. Ten niewątpliwie negatywny skutek zmiany klimatu stanowi również poważny problem dla współczesnego leśnictwa. Obniżona jakość nasion ogranicza efektywną produkcję sadzonek, niezbędną do odnawiania lasów gospodarczych, i zagraża trwałości ekosystemów leśnych. To właśnie dlatego tak ważne są obecnie badania naukowe, które pozwolą poszerzyć wiedzę z zakresu ochrony zasobów nasion przed utratą żywotności, a także wykrywania materiału siewnego charakteryzującego się wysoką odpornością na nowe warunki klimatyczne, który da początek równie odpornym i stabilnym drzewostanom.

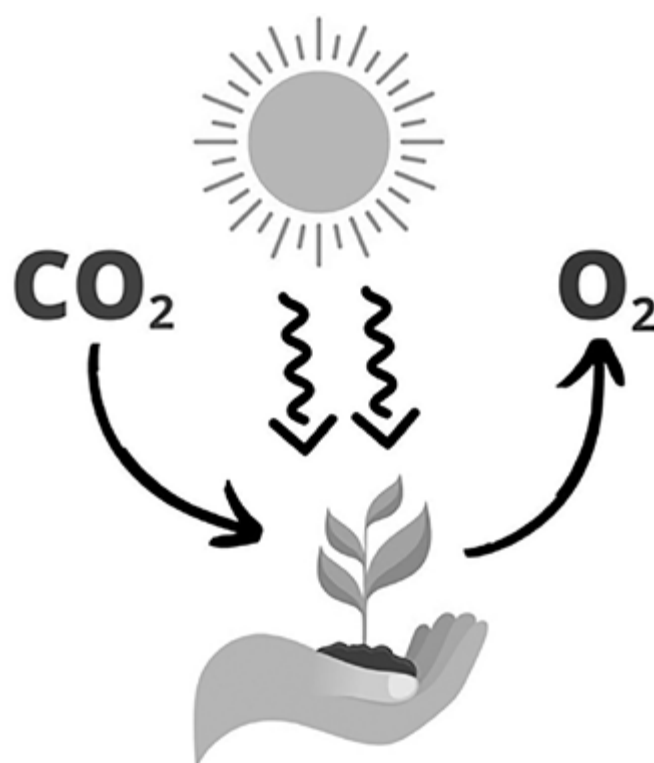
Pomoc w rozprzestrzenianiu – wiatr i woda

Zanim człowiek zbudował pierwszy wiatrak i umieścił koło młyńskie na rzece, rośliny już potrafiły wykorzystywać energię rzek i wiatru. Robią to nieustannie, w bardzo słusznej sprawie – w ten sposób rozprzestrzeniają się i migrują. Przykłady możemy znaleźć w naszym najbliższym otoczeniu: nasiona olszy i brzozy są zapatrzone w „skrzydełka”, umożliwiające przenoszenie przez wiatr. Ich powierzchnia jest dodatkowo nieprzepuszczalna dla wody, którą również mogą wykorzystać jako środek transportu – zjawisko to nazywane jest hydrochorią. Choć 1 tys. tych nasion waży mniej niż 1 gram, pod pewnym względem przypominają one orzechy palmy kokosowej, które osiągają masę nawet 2,5 kg – one również unoszą się na wodzie. Zapewnia im to specyficzna budowa mezokarpu, czyli środkowej warstwy owocu: między jego licznymi włóknami znajduje się powietrze, umożliwiające pływanie. Bywa, że kokosy pokonują drogą morską odległości rzędu tysięcy kilometrów, po czym zaczynają kiełkować wyrzucone na brzeg przez fale. W ten sposób gatunek zasiedla nowe tereny.

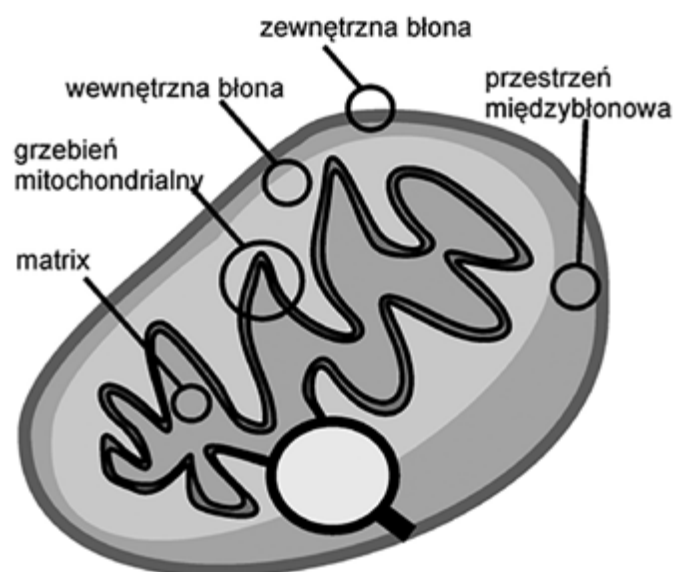
Wiatr jest kluczowy również dla rozmnażania się wielu drzew leśnych takich jak leszczyna, topola czy sosna. Gatunki te wykazują anemogamię, czyli wiatropylność; charakteryzują się one prostą budową organów rozrodczych, niewielkim rozmiarem kwiatów i produkują wielkie ilości lekkiego i suchego pyłku, który przenoszony jest przez powietrze i zapyla kwiaty, osiadając na znamionach słupków (u gatunków okrytozalążkowych) bądź zalążkach (w przypadku nagolężkowych). Mechanizm ten zapewnia możliwość zapłodnienia przez osobniki znajdujące się w stosunkowo dużej odległości.

Pożywienie – energia świetlna

Rośliny znacznie wyprzedziły człowieka w wykorzystywaniu odnawialnych źródeł energii – dotyczy to nie tylko energii wiatrowej i wodnej, ale także świetlnej. Jako organizmy samożywne, większość roślin (są też wyjątki np. występujący w Polsce łuskiewnik różowy, pasożyt korzeni drzew i krzewów, nieposiadający chlorofilu) pozyskuje całą swoją energię ze światła słonecznego, które jest wychwytywane w chloroplastach i wykorzystywane do napędzania wszystkich zachodzących w organizmach roślin procesów życiowych. Podstawowe substancje wykorzystywane przez rośliny do wytwarzania pokarmu to woda i dwutlenek węgla; wodę rośliny lądowe pobierają z gleby, zaś dwutlenek węgla oczywiście z powietrza (ryc. 1). Przy udziale energii świetlnej następuje fotoliza wody i redukcja dwutlenku węgla, czego efektem jest (w uproszczeniu) powstanie glukozy i tlenu. Ten fascynujący proces warunkuje życie na Ziemi, wszak to on stanowi pierwsze ogniwo zdecydowanej większości łańcu-



Ryc. 1. Uproszczony schemat przebiegu fotosyntezy



Ryc. 1. Uproszczony schemat przebiegu fotosyntezy

chów troficznych (tu również są wyjątki – dotyczy to środowisk, do których światło słoneczne nie ma dostępu, np. jaskiń lub głębin morskich; w takich przypadkach pierwszym ogniwem łańcucha jest martwa materia organiczna). Drzewa odgrywają szczególną rolę w powstawaniu materii i energii potrzebnej do funkcjonowania ziemskiego ekosystemu, gdyż to od nich pochodzi $\frac{2}{3}$ produkcji fotosyntetycznej wszystkich roślin lądowych. Ponadto tlen zawarty w atmosferze ziemskiej pochodzi właśnie z aktywności fotosyntetycznej. Przed pojawieniem się organizmów posiadających zdolność wykorzystywania światła do produkcji cukrów, atmosfera Ziemi była niemal całkowicie pozbawiona wolnego tlenu.

Mitochondrium – energetyczny silnik komórki

Jednak w „niezielonych” częściach roślin lub w ciemności energia wykorzystywana przez komórki roślinne pochodzi z oddychania, które odbywa się w mitochondriach. Tutaj właśnie węgiel fotosyntetycznie związany w cząsteczkach glukozy utleniany jest do dwutlenku węgla, a uwolniona w tej reakcji energia wykorzystywana jest przez komórki i tkanki roślinne.

Mitochondria roślinne są zwykle kulistymi lub pręcikowymi organelami o długości 1–3 μm i średnicy około 0,5 μm , a każda komórka roślinna zawiera ich kilkaset. Liczba mitochondriów zależy od aktywności i zapotrzebowania na energię. Mitochondria to struktury otoczone podwójną błoną mitochondrialną (zewnętrzną i wewnętrzną). Wewnętrzna błona mitochondrialna posiada charakterystyczne pofałdowania tzw. grzebienie (ryc. 2) – to od ich liczby zależy aktywność tych małych komórkowych „silników”. Wnętrze mitochondrium wypełnia macierz mitochondrialna (matrix), w której znajdują się niewielkie koliste cząsteczki mitochondrialnego DNA, rybosomy oraz białka. Posiadają więc swój własny genom (mtDNA) odpowiedzialny za kodowanie niewielkiej ilości białek niezbędnych do ich funkcjonowania. Można zatem powiedzieć, że organelle te są w pewnym sensie autonomiczne, działają wewnątrz komórki niczym „państwo w państwie”. Mitochondria uczestniczą w przeprowadzaniu licznych procesów metabolicznych związanych głównie z produkcją energii, która magazynowana jest w postaci cząsteczek adenozy-5'-trifosforanu (ATP). Organelle te są bardzo dynamiczne i plastyczne, zmieniają swą liczbę i strukturę (ryc. 3–4). Dynamika mitochondrium jest procesem regulowanym szczególnie w komórkach roślinnych i zależy od stanu zapotrzebowania komórek na energię, czyli od etapu rozwoju rośliny lub bodźców zewnętrznych. Prawidłowa dynamika mitochondrium jest niezbędna do zachowania odpowiedniej aktywności wszystkich procesów zachodzących w komórkach, od niej zależy poziom produkowanej energii, ma też wpływ na śmierć komórki.

Maszyneria oddechowa, w tym produkcja energii, oparta jest na działaniu mitochondrialnego łańcucha oddechowego (mtETC). Łańcuch ten u wszystkich organizmów wyższych zbudowany jest z dużych kompleksów białkowych (Kompleksów I–IV). Białka tworzą bowiem różnego rodzaju kompleksy, zbudowane zarówno przez pary białek, jak też złożone układy biologiczne składające się z wielu białek i innych biocząsteczek (np. cukrów lub kwasów nukleinowych jak DNA). Kompleksy białkowe wchodzące w skład łańcucha umożliwiają transport elektronów z cząsteczek NAD(P)H i FADH₂ na cząsteczkę tlenu, czego efektem jest „związanie” energii w cząsteczce ATP. Kompleksy I, III oraz IV, przez które przenoszone są elektrony, mają charakter transbłonowy – sięgają obu stron błony lipidowej w komórce, przechodząc przez całą jej grubość. Produkcja cząsteczek ATP również jest katalizowana przez białko transbłonowe – enzym syntaza ATP (tzw. Kompleks V w mtETC).

W oddychaniu komórkowym tlen i glukoza są wykorzystywane przez komórki do produkcji energii, wody i dwutlenku węgla. Komórki roślinne muszą przeprowadzać nocne oddychanie komórkowe, aby móc pełnić wszystkie podstawowe funkcje komórek. Łańcuch oddechowy jest etapem, w którym powstaje najwięcej energii w postaci ATP. W wyniku wszystkich przemian zachodzących w czasie oddychania tlenowego z 1 mola glukozy otrzymujemy 30–32 mole ATP.

Mitochondria a odporność na stres

Mitochondrialny łańcuch transportu elektronów jest głównym generatorem cząsteczek reaktywnych form tlenu (RFT) w mitochondriach (ryc. 5). RFT powstają naturalnie podczas transportu elektronów do tlenu cząsteczkowego, który w wyniku tego jest redukowany do anionorodnika nadadtlenkowego, a ten z kolei do nadadtlenku wodoru. Główne miejsca produkcji RFT zlokalizowane są w kompleksie I i III mtETC. RFT są uważane za cząsteczki sygnałowe; nadtlenek wodoru, jako cząsteczka najbardziej stabilna, może przekazywać informacje o stanie komórek, regulując wzrost, rozwój, adaptację roślin do stresu, inicjację zaprogramowanej śmierci komórki itd. Poziom RFT jest regulowany przez systemy obronne, tzw. systemy antyoksydacyjne, złożone ze związków chemicznych posiadających możliwość neutralizacji tych silnie utleniających cząsteczek. Dodatkowo mitochondria roślinne posiadają białko alternatywne oksydaza (AOX), które również przeciwdziała wytwarzaniu RFT, dzięki czemu może chronić przed stresem oksydacyjnym. Białko to odpowiada za dostosowanie się funkcjonowania mtETC do zmieniającego się środowiska. Ponieważ AOX jest indukowana zarówno w warunkach stresu biotycznego, jak i abiotycznego, nazywana jest „białkiem stresu” i jest uważana za białko „przetwarzania”, wspierające homeostazę komórkową, czyli utrzymywanie stabilnego poziomu różnych parametrów fizjologicznych wewnątrz komórki w stale zmieniającym się środowisku zewnętrznym.

Często jednak w warunkach stresu (np. zbyt wysoka/niska temperatura, zbyt wysoka/niska wilgotność, działanie patogenów) dochodzi do uszkodzenia prawidłowości przepływu elektronów, a tym samym do nadprodukcji RFT. Cząsteczki te produkowane w nadmiarze powodują zmiany w strukturze mitochondriów, w tym zaburzenia stabilności błon mitochondrialnych (inicjują proces ich peroksydacji, czyli utleniania składników błon, uniemożliwiającego ich prawidłowe funkcjonowanie), czy też uszkodzenia mtDNA, co przyczynia się do istotnych zmian w syntezie białek związanych m.in. z systemem obronnym komórek czy też z utrzymaniem homeostazy. Dysfunkcje mitochondrium wywołane przez RFT powodują również zahamowanie produkcji energii, a tym samym nieprawidłowe funkcjonowanie komórek, prowadząc nawet do ich śmierci.

Organiczna elektrownia

Przywykliśmy do tego, że sprzęty codziennego użytku działają po podłączeniu do gniazdka. Dostęp do energii elektrycznej wydaje się nam czymś oczywistym, choć wyprodukowanie jej bywa przecież problematyczne. Wykorzystywanie w tym celu paliw kopalnych zagraża środowisku, a wytworzenie energii ze źródeł odnawialnych bywa kosztowne. Choć ludzkość nieustannie zmagą się z tymi problemami, roślinom już przed milionami lat udało się „ujarzmzić” energię i efektywnie z niej korzystać. Dzięki procesowi fotosyntezy energia słoneczna akumulowana jest w biomasie początkowo właśnie organizmów roślinnych, a dopiero później – w obrębie łańcucha pokarmowego – także zwierzęcych lub grzybowych. O drzewach i innych roślinach, które wspólnie tworzą wielki efekt o globalnej skali, warto pamiętać i chronić je. Poradzimy sobie bez kolejnego parkingu lub nowej inwestycji budowlanej, ale nie bez nich – organicznych „elektrowni”, będących podstawą funkcjonowania ekosystemu ziemskiego. ■