

VLIV ORIENTOVANÉHO SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ NA RŮST A VÝVOJ ROSTLIN – POKUSY PRO VÝUKU FOTOTROPIZMU V BIOLOGII ROSTLIN

The Effect of Oriented Irradiance on Plant Growth and Development—Experiments for Teaching Phototropism in Plant Biology at High Schools

Libor Sedlecký, Jana Albrechtová, Věra Čížková, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální biologie rostlin vera.cizkova@natur.cuni.cz

Abstract

*The present paper summarizes theoretical background, practical notes and design of two experiments on plant phototropism to be conducted at high schools. Theoretical introduction describes different types of plant tropisms, e.g. gravitropism, heliotropism and phototropism, and different types of nastic movements not directionally oriented. Phototropism is a type of plant growth reaction oriented towards or against the direction of the source of irradiation, called positive phototropism or negative phototropism, respectively. The Experiment 1 is aimed at the effect of the different irradiation wavelength on the growth of plant shoot of *Lepidium sativum*. It is demonstrated there that blue light and, thus, blue photoreceptors are determining stem positive phototropic reaction. The use of LED light source to induce irradiation of a narrow wavelength is recommended. The Experiment 2 then demonstrates negative phototropism of plant roots. An important part constitutes the experience gained during the design, accomplishment and verification process for the presented experimentation. Both experiments were designed in cost-effective way for application of scientific approaches and protocols at high schools.*

Klíčová slova

biologie rostlin, směrový zdroj záření, fotomorfogeneze, fototropizmus, střední školy, pokusy, výuka, světlo.

Key words

plant biology, oriented source of irradiation, photomorphogenesis, phototropism, high school, experiments, teaching, light.

Úvod

Tento příspěvek navazuje na článek „Fotomorfozene – teoretické základy pro výuku biologie rostlin na školách“ uveřejněný v čísle 4/2017 tohoto časopisu (Albrechtová et al., 2017). Je detailněji zaměřen na vliv světelných signálů na směrově orientovaný růst rostlin, tzv. fototropizmus, jehož důsledkem jsou pozorovatelné ohyby rostlin nebo části rostlinného těla směrem ke zdroji záření nebo od něj. V článku představujeme dva modelové experimenty sledující vliv světelných signálů na fototropizmus rostlin a vliv světelného záření na směr růstu kořenů v laboratorních podmínkách středních škol.

Růstové reakce rostlin vzhledem k vnějšímu, směrově orientovanému podnětu se obecně nazývají tropizmy. Při chemotropizmu rostlina orientuje svůj růst podle gradientu směrem k vyšší koncentraci nebo směru pohybu iontů. Jedná se o růstový pohyb charakteristický pro kořeny a pyllové láčky.

Při gravitropizmu (též geotropizmu) se rostlina orientuje podle směru gravitace, kdy rostlinné orgány rostoucí směrem dolů označujeme jako pozitivně gravitropické (kořeny) a orgány rostoucí směrem nahoru jako negativně gravitropické (prýt – stonek s listy, úžlabními pupeny a květy). Negativní gravitropizmus můžeme pozorovat i u vzdušných kořenů (pneumatoforů), např. u mangrovů, dřevin rostoucích v tropických přílivových oblastech pobřeží moře.

Hygotropizmus je růstový pohyb za vlhkosti, například kořene. Heliotropizmem se označuje pohyb rostlinných orgánů za sluncem během dne. Klasickým příkladem je pohyb květenství slunečnice roční (*Helianthus annuus*). Ráno jsou květenství obrácena přibližně k východu, přes den sledují pohyb Slunce po obloze a večer pak končí otočeny

téměř na západ. V noci se pohybují opačným směrem, před rozedněním se vrací zase na východ. Otáčivý pohybový růst u rostlin slunečnice je spojen s procesem elongace (prodlužování buněk) vyvolaným vyšší koncentrací fytohormonu auxinu. Tento proces je nejvýraznější v mladých pletivech. Ve starších pletivech s ukončeným procesem jak diferenciaci buněk, tak prodlužovacím růstem je méně výrazný či nemusí být vůbec patrný. To platí i pro jiné ohybové procesy rostlin. Proto květenství slunečnice sledují dráhu pohybu Slunce jen v juvenilním (mladém) stádiu ontogenetického vývoje, v dospělosti pak zůstávají obrácené přibližně na jih (více v Kolář, 2013).

Fototropizmus je specifický typ pohybové reakce, kdy rostlina rozezná nejen samotný světelný podnět, ale dokáže také vnímat polohu zdroje a reagovat na ni. Může být buď pozitivní, kdy se rostlina či její část ohýbá směrem ke světlu, nebo negativní, kdy se na světlo reagující část ohýbá směrem od zdroje světla. Např. stonky a listy rostlin, ve kterých probíhá fotosyntéza a potřebují světlo jako zdroj energie, projevují pozitivní fototropizmus, tedy rostou směrem ke světelnému zdroji tak, aby byly osvětleny co nejlépe (Obr. 1). Tento druh fyziologické reakce je zásadní především u klíčících a mladých rostlin. Význam pozitivního fototropizmu stonku spočívá v tom, že vrchol rostliny se co nejrychleji dostane do prostředí, ve kterém může rostlina začít či zlepšit svou fotosyntetickou aktivitu (viz Pokus 1). Naproti tomu kořeny jsou fototropicky negativní a ohýbají se růstem směrem od zdroje záření a rychleji pak dosahují do zastíněné půdy, kde jsou živiny (viz Pokus 2).

Mechanismus tropických růstových reakcí zajišťuje fytohormon auxin. Ohyb vzniká rozdílnou rychlostí růstu buněk a je iniciován auxinem. Auxin je transportován do části stonku, která je odvrácená od zdroje světelného záření. Děje se tak

pomocí výtokových přenašečů v cytoplazmatické membráně buněk, proteinů PIN. Díky jejich činnosti se auxin shromažďuje na straně orgánu odvrácené od zdroje světla. Buňky, které se tam nacházejí, se začnou prodlužovat a po ohnutí orgánu budou na vnější straně oblouku. Tam, kde se ve stonku auxin nachází, vyvolává prodlužovací růst buněk, tedy jejich prodloužení. Asymetrický (v rámci orgánu) prodlužovací růst buněk na vnější straně oblouku orgánu pak vyvolá jeho ohyb (Obr. 1). Buňky na odvrácené straně se prodlužují více než buňky na ozářené straně. Tento objev je ostatně již velmi starý – učinili ho otec a syn Darwinovi v 19. století (Darwin a Darwin, 1880), kteří své pokusy uskutečnili na koleoptile¹ ovsa, kde je možné sledovat zakřivení už 5 minut po změně směru působení signálu. V případě gravitropizmu kořenů je distribuce výtokových přenašečů PIN svázána s polohou statocytů, buněk v kořenové čepičce, ve kterých se nacházejí škrobová zrna zvaná statolity². Ty svým umístěním a pohybem informují rostlinu o směru působení gravitace. V kořeni auxin působí opačně než ve stonku. Inhibuje prodlužovací růst buněk na té straně, kde se hromadí, a buňky kořene se na této straně prodlužují pomaleji. Navíc auxin stimuluje zakládání postranních kořenů, a proto se používá v přípravcích podporujících zakořeňování rostlinných stonkových řízků.

Velikost ohybu je závislá na síle podnětu (Celaya & Liscum, 2005), což již pozoroval Julius von Sachs³ v 19. století (viz přehled Rivière et al., 2017). Fototropismus je velmi komplexní fyziologický děj, při kterém slouží jako signál modré světlo. Je

zprostředkovaný součinností řady fotoreceptorů. Hlavními fotoreceptory jsou fototropiny (více viz Albrechtová et al., 2017), ale zapojují se i kryptochromy, což jsou další fotoreceptory modrého světla, a fytochromy operující v červené oblasti (viz přehled Briggs, 2014).

Tropizmy vyvolané směrově orientovaným signálem vnějšího prostředí se obvykle v učebnicích odlišují od nastií. Nastie je termín používaný pro pohyby některých orgánů rostlin, které způsobují environmentální faktory bez přednostní orientace. Na rozdíl od tropizmů však obvykle probíhají rychleji a nemusejí být spojené s růstovou reakcí, ale rychlou změnou turgoru⁴ buněk. Nicméně v současné době se striktní dělení na tropizmy a nastie používá méně a spíše se zařazuje do kontextu ontogenetického vývoje rostlin, kdy se orgány při vývoji a růstu různě pohybují (Rivière et al., 2017).

Mezi nejznámější patří tigmonastie vyvolané dotykem (mechanickým podrážděním), jejichž typickým příkladem je citlivka stydlivá (*Mimosa pudica*). Mezi tigmonastie se řadí také pohyb listů některých masožravých rostlin, např. rosnatek (*Drosera* sp.), jako reakce na kořist lapenou na lepkavé tentakule⁵ na povrchu listů. Seizmonastie se projevuje sklápěním listů v důsledku otřesu, např. u šťavelu (*Oxalis triangularis*). Nyktinastie, spánkové pohyby, závisejí na střídání dne a noci, tedy spadají do cirkadiánních rytmů. Příkladem může být pohyb listů některých rostlin. Vykazuje ji např. maranta (*Maranta leuconera*), pokojová rostlina, které se říká „modlicí se květina“ z anglického „prayer plant“. Tento název vznikl od její typické vlastnosti, kdy večer rostliny stavějí listy směrem nahoru,

1 Blanitý obal (první list) zárodku jednoděložných rostlin, chránící prvotní vzrostlý vrchol rostliny.

2 Objev statolitových škrobových zrn je přisuzován významnému českému vědci světového významu – profesoru Bohumilu Němcovi. Bohumil Němec působil jako rektor Univerzity Karlovy v letech 1921–1922 a zasloužil se i o vznik samostatné Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v r. 1920.

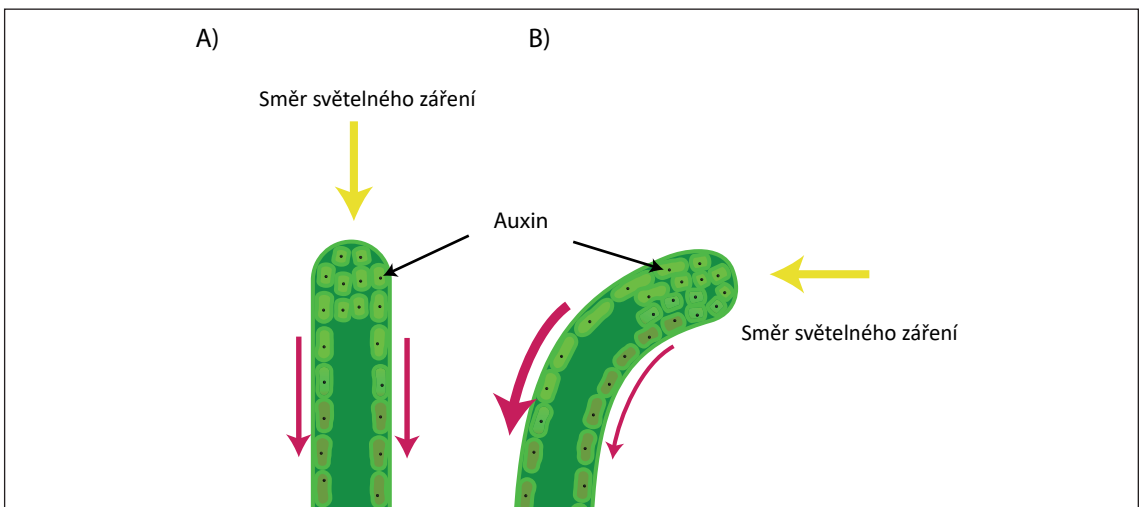
3 Julius von Sachs je světově významný vědec, který působil na pražské, tehdy Karlo-Ferdinandově univerzitě a jako první ve světě se habilitoval v Praze a působil jako docent v oboru fyziologie rostlin v roce 1857.

4 Turgor (*latinsky* opuchlost, nadutost) odpovídá vnitřnímu tlaku buněk *pletiv*. Protože rostlinné buňky mají buněčnou stěnu, voda pronikající do buňky ji nemůže rozpínat a tlak působící proti buněčné stěně se nazývá *turgor*. U rostlin dává turgor oporu rostlinným pletivům. Při nedostatku vody se turgor snižuje a rostlina vadne.

5 Tentakule jsou drobné stopkaté lepkavé žlázy pokrývající povrch listů rosnatky.

jakoby se modlily, a ráno potom listy svěšují a nastavují kolmo k dopadajícímu dennímu světlu. Asijská rostlina z čeledi bobovitých *Desmodium gyrans* (též *Codariocalyx motorius*) je další příklad rostliny s pohyby tak rychlými, že jsou viditelné pouhým okem. Kvůli pohybům jejích listů se jí přezdívá tanečnická nebo telegrafní rostlina. Termonastie se projevuje např. zavíráním a otvíráním květů v závislosti na okolní teplotě. Například květy šafránu (*Crocus* sp.) a tulipánu (*Tulipa* sp.) se rozvíjejí při vyšší tep-

lotě, kdy se zrychluje růst vnitřní strany okvětních lístků, naopak při chladu, kdy probíhá růst vnější strany okvětních lístků, se zavřou. Otvírání květů u jmenovaných rostlin bývá někdy chybně připisováno vlivu světla. Řadu pohybů rostlin můžeme najít na videích na portálu Youtube – dáváme toto jako inspiraci pro zpestření výuky; jako klíčová slova můžeme použít české, latinské nebo anglické názvy těchto rostlin či zmíněných růstových pohybů.



Obr. 1 Role auxinu při pozitivním fototropizmu stonku rostlin. Buňky s vyšší koncentrací auxinu jsou značeny světlejší zelenou. Směr šipky v obrázku značí klesající gradient koncentrace auxinu v buňkách a větší síla šipky odpovídá vyšší koncentraci auxinu v buňkách. A) Pokud je slunce či zdroj světla v nadhlavníku, jsou molekuly auxinu soustředěny v buňkách stonkové apikální části a jejich koncentrace ubývá rovnoměrně po celém obvodu stonku se vzdáleností od vrcholového dělivého pletiva – meristému. Stonek pak roste svisle směrem ke slunečnímu záření. B) Když na stoněk dopadá světelné záření v úhlu jiném, např. kolmo v 90°, pak se molekuly auxinu transportují na stranu stonku odvrácenou od světla a vyvolávají tam prodlužovací růst buněk. Zvýšené prodlužování buněk na odvrácené straně stonku má pak za následek ohnutí stonku směrem ke zdroji světelného záření. Upraveno podle <https://www.dreamstime.com/stock-illustration-auxins-plant-hormones-plant-body-development-image64150353>.

Pokus 1 – Vliv vlnové délky světelného záření na růst stonku rostlin: pozitivní fototropismus

První pokus zkoumá, zda rostlina ve své pozitivní fototropické reakci stonku reaguje na určitou barvu světla, vlnovou délku záření, směrem ke které-

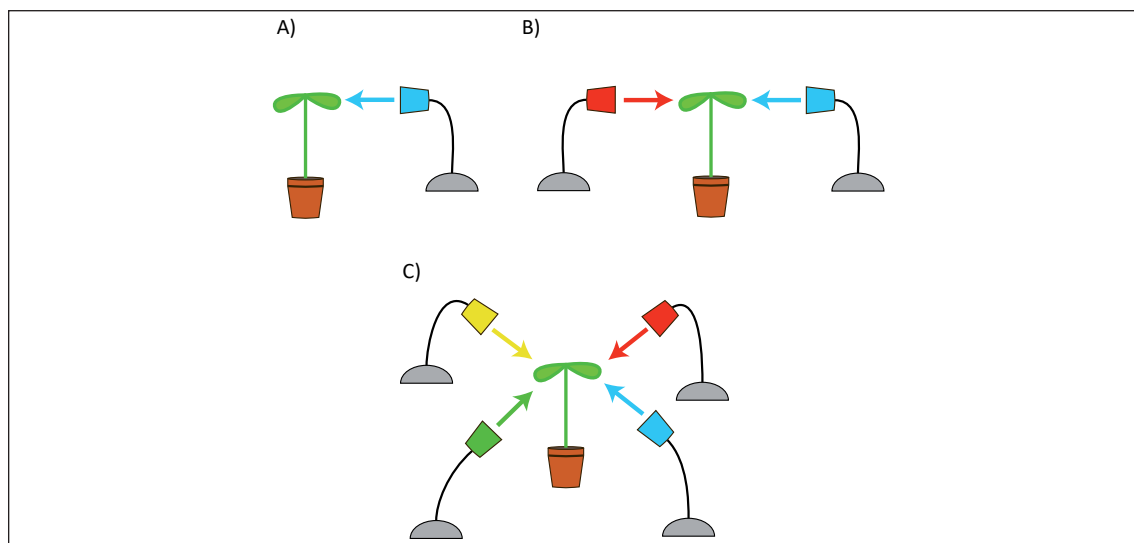
mu roste. To pak poukáže na funkci příslušných fotosenzorů aktivních v dané barevné oblasti světla. K pokusu se využívají rostliny řeřichy seté (*Lepidium sativum*), které necháme vyklíčit ve tmě či na světle na buničnině uložené v Petriho misce – např. o průměru 7–12 cm. První dva dny semena klíčí pod překlopenou druhou Petriho miskou a poté se

již rostliny nechají růst bez poklopu s případným občasným doléváním vody do misky, aby buničitá vata zůstala stále vlhká. Po celou dobu klíčení a růstu 5–7 dní při pokojové teplotě se rostliny nacházejí na stanovišti s přirozeným osvětlením, třeba na parapetu okna. Rostliny musí mít plně vyvinuté zelené listy s patrnou fotosyntetickou aktivitou.

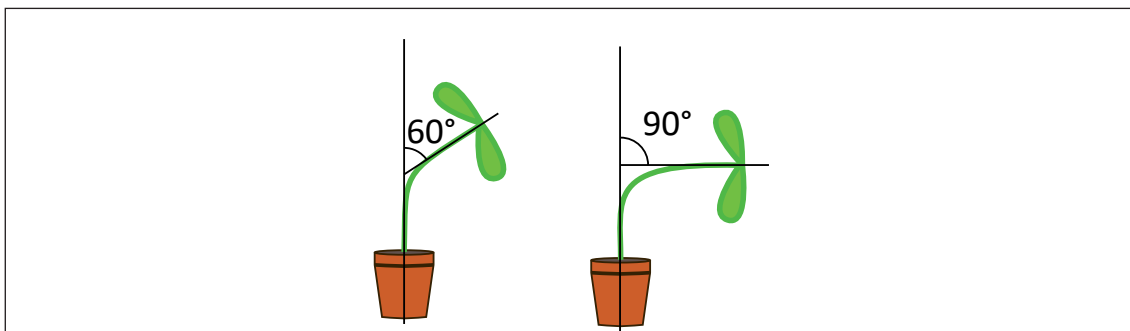
Pokus se provádí tak, že se na každou rostlinnou sadu v Petriho misce nechá působit světlo o různé barvě, tj. různé vlnové délky po dobu 80 minut. Na rostliny v Petriho misce umístěné na vyvýšené podložce se pod úhlem 90° nechá dopadat záření ze světelného zdroje, nebo zdrojů o různé vlnové délce. Aparatura může obsahovat jednu stolní lampu ve vzdálenosti 20 cm, nebo dvě stolní lampy umístěné proti sobě, nebo čtyři lampy rozestavěné do čtverce (Obr. 2A-C). Jako zdroj světla se použijí LED – diodové žárovky RGB vyzařující záření o různé barvě: červené, žluté, modré a zelené,

které odpovídají velmi úzkému rozmezí vlnových délek, obvykle 10 nm⁶. Po ukončení experimentu se provede pomocí úhloměru analýza změny úhlu růstu stonku od svislé polohy (obvyklého směru růstu stonku) alespoň u deseti rostlin z rostlinné sady (Obr. 3). Pokud se používá aparatura s více světelnými zdroji, pak se určí směr, ke kterému se stonek díky růstu ohnul. Průběh pokusu je možné zaznamenat na nahrávací či fotografické zařízení (kamera, fotoaparát, mobil), ale je třeba pořizovat fotodokumentaci z fixovaného bodu a vzdálenosti, která umožní rozeznat jednotlivé rostliny a jejich růstové pohyby.

6 Například rozmezí vlnových délek LED diod pro červenou je 620-630 nm, pro modrou je 460-470 nm, pro zelenou je 515-525 nm (<http://www.svetsvetla.cz/led-pasek-modry-ip20-300diod-smd3528-12v-24w-2a-5m-vhodny-do-profilu.html>). LED žárovky je možno zakoupit i v internetových obchodech (např. www.elim.cz, www.t-led.cz), cena těchto žárovek nepřesahuje 200 Kč. Na zahraničním trhu je momentálně situace příznivější, nabídka je širší s cenou do 10 € za kus. Je třeba si ohlídat barvu světla a patiči žárovky, aby žárovka byla použitelná pro dostupnou stolní lampu (vlnovou délku).



Obr. 2 Pokus 1: Rozmístění aparatury pro sledování pozitivního fototropismu u stonků rostlin. Zdroje světelného záření různé vlnové délky a barvy jsou umístěny 20 cm od rostliny pod úhlem 90°, expozice trvá 80 min. A) aparatura s jednou stolní lampou s LED žárovkou různé barvy – modré, červené, zelené či žluté; B) aparatura se dvěma lampami s červeným a modrým světlem; C) aparatura se čtyřmi světelnými zdroji modré, červené, zelené a žluté barvy rozmístěnými do čtverce. Upraveno podle Sedleckého (2013).



Obr. 3 Pokus 1: Schéma měření ohybu stonku. Ohyb rostliny po 80 minutách expozice světelným zářením. Úhel se měří jako odchylka od svislice běžného růstu stonku.

Zkušenosti s realizací pokusu

Prvním krokem bylo nalezení vhodného rostlinného materiálu, který by vytvářel v dostatečně krátkém čase patřičné fototropické odezvy. Jako ideální rostlinný materiál byla vybrána řeřicha setá, která má velmi krátkou dobu kultivace i reakční čas během samotného experimentu, což umožňuje její začlenění do výuky na školách. Řeřicha totiž vytvoří pozorovatelnou odezvu již po 20 minutách a při délce ozáření 80 minut dojde ke změně ohybu stonku větší než 45° . Taktéž její semena jsou snadno a finančně dobře dostupná.

Druhým krokem bylo zvolení vhodného zdroje světelného záření. Ve fotomorfogenetických reakcích je potřeba na rostlinu působit zářením o poměrně úzkém rozpětí vlnových délek a znát jeho fyzikální vlastnosti. Dříve se k dosažení potřebné vlnové délky využívalo nejrůznějších filtrů, nicméně v současnosti jsou nejvhodnější LED diody (z anglického „light-emitting diod“). Hlavní výhodou u nich je emise velmi úzkého intervalu vlnových délek, čehož je dosaženo jejich samotnou technologickou podstatou. Odpadá tak náročná filtrace záření, kdy filtr nemusí odstínit veškeré nechtěné záření a dochází ke zkreslení výsledku, neboť

rostliny mohou reagovat již na velmi malou dávku ozáření světlem jiné vlnové délky, než je testováno. Další výhodou oproti klasické žárovce je nízká spotřeba energie a velmi vysoká životnost. Výhodou je také skutečnost, že LED diodové žárovky nevyzařují téměř žádné teplo, takže je možné i relativně těsné přiblížení diody k rostlině bez potřeby odstínění přicházejícího tepla. LED diody se úspěšně používají ve skleníkové rostlinné výrobě pro zlepšení vlastností pěstovaných rostlin (více v přehledu Davis & Burns (2016)).

Při pozorování reakce rostlin je možno pořídit fotodokumentaci či videonahrávku. Video může být získáno pomocí konzistentního záznamu z videokamery, mobilu či metodou časosběrného snímání (tzv. time-lapse). Pro tuto metodu mohou být využity fotoaparáty, které tuto metodu poskytují, anebo lze využít webkamery a snímky ukládat přímo na disk počítače.

Pokus byl opakován celkem pětkrát s LED diodami emitujícími záření různé barvy (červené, žluté, modré a zelené) vždy se stejným výsledkem, tedy že rostliny reagovaly pouze na zdroj modrého světelného záření, vůči kterému měly patřičnou fototropickou odezvu a ohnuly se při růstu ve smě-

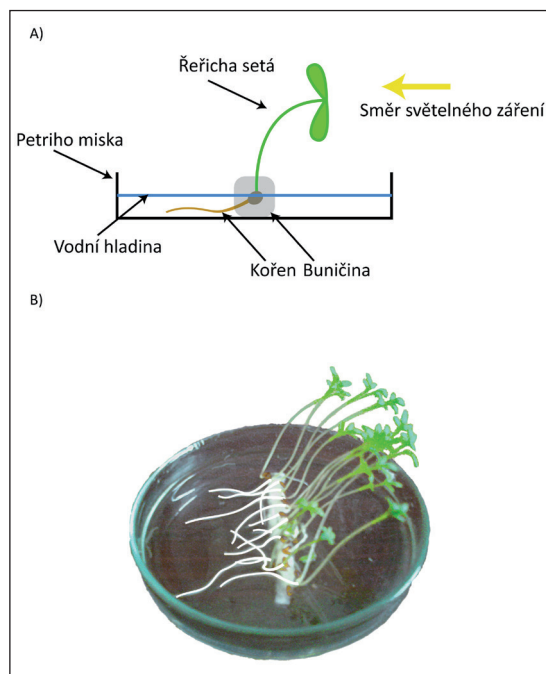
ru jeho působení. Naopak na ostatní zdroje světla, které vyzařovaly jinou barvu než modrou, rostliny nereagovaly jako na fototropický signál a rostly nadále směrem svisle vzhůru, tj. ve směru negativního gravitropismu. Tím lze nepřímou dokázat, že za fototropismem stojí fotoreceptory modrého světla, především fototropiny phot1 a phot2 (Takemiya et al., 2005). Mírný ohyb stonku byl zaznamenán i u působení ostatních vlnových délek, avšak tento ohyb můžeme přisoudit vlivu přicházejícího záření z okolí. Toto by případně mohlo být minimalizováno umístěním pokusu do temného boxu.

Na základě úspěšnosti zmíněného experimentu byly vypracovány výukové materiály, které zajistí jak teoretické zázemí pro žáky, tak i protokol k vypracování pokusu a jeho shrnutí. Výukové materiály (pracovní listy pro žáky i metodické poznámky pro učitele) je možné získat na www.Prirodovedci.cz.

Pokus 2 – Vliv světelného záření na směr růstu kořenů rostlin: negativní fototropismus

Cílem tohoto pokusu je demonstrace negativního fototropismu kořenů rostlin. Jednotlivá semena řeřichy seté se nechají vyklíčit na úzkém pruhu buničiny o rozměrech 1 × 7 cm na Petriho misce (deset semen vedle sebe ve vzdálenosti cca 6 mm). Pod překlopenou druhou průhlednou Petriho miskou semena klíčí první dva dny a poté se již rostliny nechají růst v otevřeném prostoru. V místnosti, kde je pokus prováděn, je Petriho miska s rostlinami umístěna v kolmé horizontální vzdálenosti asi 3 metry od okenní tabule – zdroje světelného záření. Růst rostlin probíhá za pokojové teploty 7 dní a po celý čas pokusu na ně dopadá světelné záření z jednoho směru, tedy pozor na umělé osvětlení (Obr. 4). Kořeny musí být neustále ponořeny pod vodní hladinou – čistou vodu z vodovodu bez jakýchkoliv přísad je nutné průběžně doplňovat. Po ukončení pokusu se hodnotí směr růstu kořenů vzhledem

ke směru dopadajícího záření – negativní směr růstu v případě růstu směrem pryč od zdroje záření, nebo pozitivní směr ve směru ke zdroji záření.



Obr. 4 Pokus 2: A) Nákres aparatury. Rostliny byly umístěny na Petriho misce. Semena klíčila na pruhu buničiny 1 cm širokém a 7 cm dlouhém. V místnosti byla rostlina umístěna v kolmé horizontální vzdálenosti tři metrů od okenní tabule – zdroje světelného záření. B) Ukázka experimentálního uspořádání rostlin v Petriho misce na konci pokusu. Stonky s listy jsou ohnuty směrem ke zdroji záření, zatímco kořeny vykazují negativní směr růstu, tj. negativní fototropismus směrem od zdroje záření. Zdroj: Sedlecký (2013).

Zkušební s realizací pokusu

Druhý pokus byl vymyšlen jako kontrastní fototropická reakce k pokusu prvnímu. Zatímco u prvního experimentu rostlina orientovaným růstem získává ze světelného zdroje maximum pro fotosyntézu listů, ve druhém pokusu kořeny z dosahu světla orientovaným růstem unikají. Žáci se tak seznámí s negativním fototropismem kořenů rostlin, kdy růst kořenů je orientován směrem od zdroje světelného záření.

Pokus jsme navrhli tak, aby růst kořenů byl vizuálně snadno detekovatelný, ale zároveň, aby růstu kořenů nic nebránilo. Rostliny se nechaly vyklíčit na úzkém pruhu buničiny, aby nastalo jejich zafixování v Petriho misce a kořeny nemohly růst po směru gravitace, nýbrž pouze do stran. Tím byl minimalizován vliv pozitivního gravitropismu a projevil se negativní fototropismus kořene, který směřoval růst kořenů od zdroje světelného záření.

Pro zachování co nejnižší náročnosti jsme použili jako zdroj směrově orientovaného světla přirozené sluneční záření. Po několika pokusech v těsné blízkosti okna se ukázalo, že v tomto místě se okno nejvíce jako bodový zdroj záření, a proto jsme vzdálenost zvětšovali až na optimální tři metry. V této vzdálenosti již okno pro rostlinu působí podobně jako bodový zdroj světelného záření. S použitím bodového zdroje světla ze stolní lampy může být potíž s interferencí okolního záření, kterou je třeba minimalizovat. V tomto případě však doporučujeme použít klasickou tavnou žárovku a ne LED diodu. Klasická žárovka produkuje rozžhavením svého vlákna záření ve všech vlnových délkách, proto její světlo vnímáme jako bílé. Jednou z nevýhod LED diod je jejich obtížná emise tzv. bílého světla, které vzniká skládáním záření různých vlnových délek. K produkci bílého LED světla se používají dva způsoby: fotoluminiscence nebo aditivní mísení barev⁷. Nicméně složení vlnových délek v záření může ovlivnit výsledky pokusů, kde chceme nechat působit světlo bílé barvy. Z těchto technologických důvodů doporučujeme pro pokusy, kde nerozhoduje přímá vizualizace barvy záření, používat přirozené sluneční záření nebo klasické žárovky s tavným vláknem.

Pokus byl opakován celkem pětkrát a vždy došlo k očekávanému výsledku – kořeny rostly směrem od zdroje světelného záření. Z padesáti zkoumaných

rostlin směřovaly pouze kořeny čtyř rostlin jiným směrem. Tuto skutečnost lze nejspíše vysvětlit zvýšeným odporem kořenové čepičky v místě nahloučení buničiny, který vedl k vychýlení růstu kořene. Celkový výsledek pokusu splňuje podmínky funkčnosti a spolehlivosti a může být doporučen pro realizaci ve školních podmínkách. Výukové materiály (pracovní listy pro žáky i metodické poznámky pro učitele) je možné získat na www.Prirodovedci.cz.

Závěr

V příspěvku jsme uvedli náměty na dva pokusy orientované na fototropismus rostlin. Úvodem jsme poskytli přehled růstových ohybových pohybů u rostlin – směrově orientovaných tropizmů a uvedli jsme i příklady nesměrovaných pohybových reakcí – nastií. Shrnuli jsme teoretické vysvětlení navrhovaných pokusů a poznatky z jejich experimentálního vývoje a testování. Na základě opakovaného ověřování realizovatelnosti a funkčnosti pokusů jsme vybrali takové, které jsou demonstrativní, jednoduché, funkční, snadno opakovatelné a v přiměřené míře i finančně a materiálově nenáročné, což je pro učitele důležité.

Prezentované pokusy byly součástí diplomové práce Libora Sedleckého (Sedlecký, 2013), vypracované pod vedením Jany Albrechtové a Věry Čížkové. Návodů a doporučené postupy pro praktická cvičení, které mají učitelé k dispozici, nebývají vždy dostatečně kvalitně popsány, proto Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze postupně zpřístupňuje pro učitele na serveru www.prirodovedci.cz řadu výukových materiálů vytvořených v rámci svých výzkumů. Na tomto serveru lze najít i podrobné návody pro žáky i metodické poznámky pro učitele pro zde popisované pokusy.

⁷ Pro doplnění této informace možno použít odkaz: http://www.osram.cz/osram_cz/novinky-a-znalosti/led-domov/technicke-informace/zakladni-prehled-led/barvy-svetla/index.jsp

Poděkování Tato práce byla sepsána s podporou projektu NPUI LO1417 Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky. Děkujeme kolegům Dr. Zuzaně Lhotákové a Dr. Janu Kolářovi, kteří byli další konzultanti diplomové práce Libora Sedleckého, za konzultace při vypracovávání jeho diplomové práce. Miroslavu Bartákovi děkujeme za grafickou pomoc s tvorbou obrázků. Dále děkujeme oponentům a kolegyni Haně Konrádové za přínosné připomínky.

Literatura

- ALBRECHTOVÁ, J., SEDLECKÝ, L., & ČÍŽKOVÁ V. (2017). Fotomorfogeneze – teoretické základy pro výuku biologie rostlin na školách. *Biologie, chemie, zeměpis*, 26/4: 26–37.
- BRIGGS, W. R. (2014). Phototropism: some history, some puzzles, and a look ahead. *Plant Physiology*, 164(1), 13–23. <https://doi.org/10.1104/pp.113.230573>
- CELAYA, B., & LISCUM, E. (2005). Phototropins and associated signaling: Providing the power of movement to higher plants. *Photochemistry and Photobiology*, 81, 73–80. <https://doi.org/10.1562/2004-08-22-IR-282.1>
- DARWIN, C., & DARWIN, F. (1880). *The Power of Movement in Plants* (London: John Murray). Sekundární citace z Rivière et al. (2017).
- DAVIS, P. A., & BURNS, C. (2016). Photobiology in protected horticulture. *Food and Energy Security*, 5(4), 223–238. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120221>
- KOLÁŘ, J. (2013). Jak se slunečnice otáčejí za Sluncem? A pohybují se i v noci? Zdroj: www.prirodovedci.cz: <https://www.prirodovedci.cz/zeptajte-se-prirodovedcu/403>
- RIVIÈRE, M., DERR, J., & DOUADY, S. (2017). Motions of leaves and stems, from growth to potential use. *Physical Biology*. <https://doi.org/10.1088/1478-3975/aa5945>
- SEDLECKÝ, L. (2013). Fotomorfogeneze: vliv světla na procesy vývoje rostlin ve výuce biologie na školách (diplomová práce). Nепublikováno. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Praha. <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/download/120139034>
- TAKEMIYA, A., INOUE, S. I., DOI, M., KINOSHITA, T. & SHIMAZAKI, K. I. (2005). Phototropins promote plant growth in response to blue light in low light environments. *The Plant Cell*, 17(4), 1120–1127. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.030049>