

22. Lustofin Krzysztof (2018) Immunoekspresja białek szlaku steroidogenezy po prenatalnej ekspozycji na flutamid samic nornicy rudej. Praca magisterska wykonana pod kierunkiem Pani dr hab. Małgorzaty Kotuli-Balak oraz Pana dr hab. Jerzego Galasa w Zakładzie Endokrynologii, Instytut Zoologii i Badań Biomedycznych, Wydział Biologii UJ w Krakowie.
23. Matsumoto T., Shiina H., Kawano H., Sato T., Kato S. (2008) Androgen receptor functions in male and female physiology. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 109: 236-241.
24. Pepling M.E., Spradling A.C. (2001) Mouse ovarian germ cell cysts undergo programmed breakdown to form primordial follicles. *Developmental Biology*, 234: 339-351.
25. Tripathi A., Dubey P.K., Pandey V.K., Tripathi G., Hazarika S., Sairam K., Sahu A.N. (2018) Di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) and ovarian physiology: A brief review of therapeutic potential of *Asparagus racemosus* on DEHP-induced toxicity. *Journal of Medicinal Plant and Herbal Therapy Research*, 6: 9-18.
26. Wang Y.X., You L., Zeng Q., Sun Y., Huang Y.H., Wang C., Wang P., Cao W.C., Yang P., Li Y.F., Lu W.Q. (2015) Phthalate exposure and human semen quality: Results from an infertility clinic in China. *Environmental Research*, 142: 1-9.

Krzysztof Jakub Lustofin. Instytut Botaniki, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie. E-mail: Krzysztof.lustofin@doctoral.uj.edu.pl

DLACZEGO POWINNIŚMY POZNAĆ KRYSTALKĘ LŚNIĄCĄ?

Adriana Maria Kaproń, Michał Nosek, Marta Śliwa, Zbigniew Miszański (Kraków)

Streszczenie

Szereg roślin, poza szerokim zastosowaniem w przemyśle, wykorzystuje się jako modele doświadczalne w eksperymentach naukowych. Należy zaznaczyć, iż niektóre spośród nich łączą w sobie jednocześnie walory roślin użytkowych oraz cechy dobrego modelu eksperymentalnego, a przykładem takiej rośliny jest kryształka lśniąca (*Mesembryanthemum crystallinum* L.). Chociaż jej pierwotnym siedliskiem były tereny Afryki Południowej i Wschodniej, razem z człowiekiem zawędrowała na kilka kontynentów, dzięki czemu obecnie jej siedliska możemy odnaleźć w basenie Morza Śródziemnego, przybrzeżnych obszarach Ameryki Północnej i Południowej, a także na terenach zachodniej Australii. Dzięki stwierdzeniu w jej tkankach metabolizmu przejściowego C_3/CAM , jest cennym modelem w badaniach z zakresu fizjologii, dotyczących plastyczności metabolizmu fotosyntetycznego oraz jego modyfikacji w warunkach oddziaływania tzw. stresów środowiskowych. Użytkowy charakter kryształki wynika m.in. ze zdolności do funkcjonowania na podłożach o silnym zasoleniu i związanej z tym umiejętności deponowania nadmiaru soli w tzw. komórkach pęcherzykowatych na powierzchni liści i pędów. Wiąże się to z potencjałem fitoremediacyjnym, a więc procesem oczyszczania środowiska (gleb, ale również wód i powietrza), wykorzystującym w tym celu organizmy roślinne, co pozwala m.in. na rekultywację gleb o wysokim zasoleniu, które stanowi jedno z głównych zagrożeń współczesnej produkcji rolnej. Ostatnie badania potwierdzają własności kryształki w obszarze fitoremediacji, związane z możliwością oczyszczania podłoża z metali ciężkich, takich jak nikiel, kadm czy miedź. Może to umożliwić rekultywację skażonych gleb przy pomocy prostych i tanich metod biologicznych, z ograniczoną ingerencją w środowisko. Ponadto kryształka doskonale sprawdza się jako roślina jadalna, znajduje zastosowanie w ziołolecznictwie i może zdobić rabatki i skalniaki.

Abstract

Plants, like the animals were exploited by human for the millennia and apart from wide application as crop plants, they may be used as models in scientific experiments. It is worth to mention, that some of them simultaneously represent crop and model plants' features. As an example we present the common ice plant (*Mesembryanthemum crystallinum* L.). Though the common ice plant is native to East and South Africa, it has managed to spread with human to almost all continents, and now we can find it in the basin of Mediterranean Sea,

coastal areas of North and South America, and even West Australia. Being a facultative C_3/CAM plant makes it a valuable model in physiological researches, especially these regarding photosynthesis plasticity and its modification with environmental stressors. As the crop plant, one of the ice plant's unique features is the ability to function on soils with high salinity (mostly NaCl); it is related with a presence of so called epidermal bladder cells – a specialized microscopic-size cannisters covering leaves and shoots, where dissolved salts can be stored. It is related also to phytoremediating potential, which may be used for the reclamation of soils polluted with high salt concentrations being a major threat of present agriculture. Moreover, researches confirmed the ice plant's ability for phytoextraction of heavy metals such as nickel, cadmium and copper from contaminated soils. This allows reclamation of heavy metal contaminated soils with simple and cheap biological techniques, providing negligible interference on the environment. Besides, common ice plant is also an edible plant, it can be used in therapy and as ornamental plant forming various flower beds and rockeries.

Wstęp

Jak powszechnie wiadomo, rośliny są jednym z fundamentów życia na Ziemi. Będąc organizmami autotroficznymi, rośliny stworzyły warunki pozwalające na ewolucję złożonych form heterotroficznych, których potrzeby metaboliczne mogły zostać zaspokojone poprzez oddychanie tlenowe. Możemy zatem powiedzieć, że zawdzięczamy roślinom nie tylko życie na Ziemi w jego obecnej postaci, ale także nasze istnienie będące elementem ewolucji zwierząt. Wiele spośród znanych gatunków roślin ma charakter użytkowy, co oznacza, że są to rośliny stanowiące podstawę żywności lub paszy, materiałów opałowych, tekstyliów, leków, barwników itp. Z tego względu bardzo ważne jest, aby w celu lepszej kontroli ich rozwoju i uzyskiwanego plonu dobrze zrozumieć jak „działają”. Oprócz użytkowego charakteru, liczne gatunki roślin są wykorzystywane w badaniach naukowych jako modele, przy pomocy których staramy się rozwiązać nurtujące nas szczegółowe pytania. Ogromną rolę m.in. w badaniach związanych z odpowiedzią roślin na czynniki stresowe odegrał rzodkiewnik pospolity (*Arabidopsis thaliana*). Jego niewielkie rozmiary, łatwa uprawa i dostępność zsekwencjonowanego małego genomu umożliwiły dokonanie postępu w wielu obszarach fizjologii. Jedną z roślin, która podobnie jak rzodkiewnik wykazuje cechy dobrego modelu eksperymentalnego, a jednocześnie posiada walory rośliny użytkowej, jest kryształka lśniąca – *Mesembryanthemum crystallinum* L.

Ogólna charakterystyka kryształki lśniącej

Kryształka lśniąca, znana również jako przypołudnik kryształowy, jest rośliną należącą do rodziny przypołudnikowatych (*Aizoaceae*), rzędu goździkowców (*Caryophyllales*). Nazwa *Mesembryanthemum* pochodzi z połączenia greckich słów: *mesembria* – południe i *antheion* – kwiat. Podobnie jak niemiec-

ka nazwa: Mittagsblume (dosł. roślina południowa), odnosi się do kwiatów, które otwierają się tylko przy dość silnym oświetleniu, a więc zazwyczaj w południe. Kryształka pochodzi z terenu Afryki Południowej i Wschodniej. Do Europy przywędrowała razem z człowiekiem, któremu zawdzięcza rozpowszechnienie w krajach basenu Morza Śródziemnego. Roślina ta zawędrowała także na tereny zachodniej Australii, Stanów Zjednoczonych oraz Wysp Kanaryjskich. Chociaż jej ulubionymi terenami są otwarte prze-



Ryc. 1. Naturalne siedlisko kryształki lśniącej z okolic Betancuria (Fuerteventura, Hiszpania). Fotografia: Michał Nosek.

strzenie, rzadko zamieszkałe przez inne rośliny, to w obszarach przybrzeżnych Chile, Meksyku i Kalifornii zaobserwowano jej gwałtowny rozwój połączony z wypieraniem innych gatunków, jak choćby rodzimej nacyłki (rodzaj: *Coreopsis*). Kryształka tworzy ogromne kolonie, często zajmując znaczny obszar, na którym może dominować poprzez wykorzystanie zjawiska allelopatii, tj. wydzielania do podłoża substancji chemicznych, które oddziałują na inne gatunki bytujące w danym siedlisku. Zjawisko to ma dwojaki charakter i polega z jednej strony na aktywnym wydzielaniu do gleby związków azotowych, z drugiej zaś na uwalnianiu po śmierci rośliny do

podłoża soli (np. NaCl) – oba mechanizmy działają hamująco na rozwój roślinnych sąsiadów (Ryc. 1) [1].

Kryształka charakteryzuje się szeroką tolerancją na czynniki środowiskowe, w tym jako semi-halofit jest zdolna do funkcjonowania na podłożach o znacznym zasoleniu. Może osiedlać się na różnych typach gleb – od suchych piaszczystych, włączając w to wydmy, do gliniastych. Toleruje przy tym gleby

Jeszcze w drugiej połowie XX wieku interesujące własności kryształki były mało znane. Dopiero wzrastająca w latach 90. oraz na przełomie XX i XXI w. uwaga, jaką cieszy się w środowisku naukowym, szczególnie badaczy zajmujących się roślinami CAM sprawiło, że jest ona coraz częściej wybieranym obiektem badań, również tych zmierzających w kierunku praktyki (Ryc. 3).



Ryc. 2. Kwiaty kryształki lśniącej. Fotografia: Ewa Surówka. U kryształki wytworzenie narządów generatywnych w postaci kwiatów, wymaga bodźca stresowego, zwykle w postaci ograniczenia dostępności wody. Z tego powodu w warunkach naturalnych kwitnienie ma miejsce wyłącznie wiosną lub wczesnym latem, zawsze po okresie pory suchej.

ubogie w składniki odżywcze. Tak jak wiele innych introdukowanych gatunków, wegetuje na terenach zurbanizowanych: przydrożach, wysypiskach śmieci czy gospodarstwach rolnych. Jest ponadto sukulentem, co oznacza w praktyce, że może rozwijać się w środowisku o ograniczonej dostępności wody. W warunkach naturalnych zwykle jest rośliną jednoroczną, a jej cykl życiowy zamyka się w okresie kilku miesięcy, jednak w zależności od panującego klimatu może być również rośliną dwu- a nawet wieloletnią. Kwitnienie w warunkach naturalnych następuje wiosną lub wczesnym latem i poprzedzone jest działaniem któregoś z wymienionych czynników stresowych, zwykle deficytu wody, któremu towarzyszy indukcja specyficznego typu fotosyntezy CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*). Rozwój kapsuł z nasionami (odpowiednik owocu) następuje zwykle po około pięciu tygodniach od momentu zaistnienia epizodu stresowego [2] (Ryc. 2).

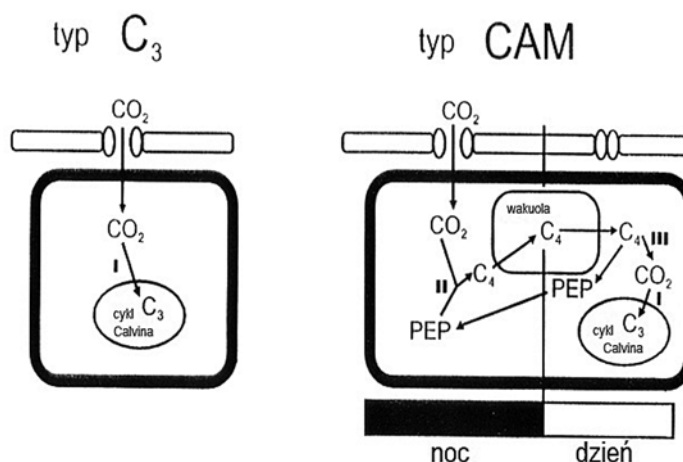


Ryc. 3. Hodowla kryształki lśniącej. Fotografia: Paulina Supel. Uprawa w warunkach szklarniowych *M. crystallinum* L. na potrzeby eksperymentalne. Stanowi pewne wyzwanie z uwagi na wysokie wymagania co do warunków panującego światła, szczególnie w doświadczeniach, w których inicjuje się przejście z fotosyntezy C_3 do CAM.

Kryształka lśniaca jako roślina przejściowa C_3 – CAM

Kryształka zaliczana jest do gatunków o tzw. metabolizmie przejściowym C_3 /CAM lub tzw. fakultatywnych roślin CAM. Rosnące zainteresowanie, jakim cieszy się wśród fizjologów i biochemików, jest związane przede wszystkim z plastycznością jej metabolizmu fotosyntetycznego. Oznacza to możliwość odwracalnego przejścia pomiędzy szeroko rozpowszechnionym metabolizmem C_3 (około 90% wszystkich gatunków roślinnych) oraz tzw. metabolizmem CAM (Ryc. 4). CAM to szczególny typ

że w przeciwieństwie do powszechnie występującego metabolizmu typu C_3 , w którym dwutlenek węgla wiązany jest w ciągu dnia i wykorzystywany „na bieżąco” w procesie fotosyntezy, rośliny CAM asymilują atmosferyczny CO_2 w nocy. Dzięki zastosowanej modyfikacji aparaty szparkowe pozostają w ciągu dnia zamknięte, co w porównaniu z metabolizmem C_3 pozwala na znaczące ograniczenie utraty wody drogą transpiracji (czynnego parowania wody z nadziemnych części roślin). Uzyskana tym sposobem oszczędność wody umożliwia podtrzymanie fotosyntezy, a co za tym idzie, innych procesów życiowych, nawet w warunkach skrajnej suszy. Należy przy tym



Ryc. 4. Schemat porównujący szlak metabolizmu fotosyntetycznego C_3 i CAM [9]. U zdecydowanej większości roślin prowadzona jest fotosynteza typu C_3 – nazwa pochodzi od pierwszego trwałego produktu wiązania dwutlenku węgla w ciągu reakcji nazywanych cyklem Calvinia. Tym produktem jest 3-węglowy kwas fosfoglicerynowy. U roślin typu C_3 aparaty szparkowe są otwarte w ciągu dnia, czego efektem jest stały dopływ CO_2 . U roślin przejawiających typ CAM aparaty szparkowe są zamknięte w ciągu dnia, a dwutlenek węgla pobierany jest wyłącznie w nocy w celu ograniczenia utraty wody, wiązany pierwotnie z fosfoenolopirogronianem (PEP) za sprawą karboksylazy fosfoenolopirogronianowej (PEPC), a następnie przechowywany w wakuoli w postaci 4-węglowego jabłczanu. W ciągu dnia jabłczan przedostaje się z wakuoli do cytoplazmy, gdzie ulega dekarboksylacji, czyli odłącza się od niego dwutlenek węgla, który kierowany jest do chloroplastu i bierze udział w cyklu Calvinia, podobnie jak u roślin typu C_3 .



Ryc. 5. Etapy cyklu życiowego kryształki. Fotografia: Ewa Niewiadomska. Młode rośliny realizujące fotosyntezę typu C_3 (po lewej stronie); charakteryzują się dużymi rozłożystymi liśćmi wyrastającymi ze słabo rozgałęzionych pędów. W konsekwencji epizodu stresowego (zwykle suszy) następuje przestawienie na fotosyntezę typu CAM (po stronie prawej). Zmianom metabolicznym towarzyszą modyfikacje w morfologii. Pędy ulegają rozgałęzieniu, rozwijają się liście boczne, które różnią się od liści głównych wielkością i pokrojem. Na powierzchni rośliny pojawiają się słabo zaznaczone wcześniej tzw. komórki pęcherzykowate.

fotosyntezy, który występuje u około 6% gatunków roślin wyższych. Do grupy tej należą rośliny prowadzące oszczędną gospodarkę wodną, wynikającą z jej ograniczonej dostępności w otoczeniu. W dużym uproszczeniu, fotosynteza typu CAM polega na tym,

zaznaczyć, że rośliny CAM mają większe zapotrzebowanie na energię świetlną, konieczną do przeprowadzenia procesu fotosyntezy (Ryc. 5). Rośliny prowadzące fotosyntezę CAM nie są grupą jednorodną i reprezentują aż 36 rodzin. Oprócz wspomnianych

fakultatywnych roślin CAM, można tu wyróżnić gatunki, u których indukcja tego typu metabolizmu jest częścią tzw. rozwoju osobniczego i pojawia się w dojrzałych organach roślinnych, niezależnie od warunków środowiskowych, a zmiany metabolizmu fotosyntetycznego zachodzące wraz z wiekiem są nieodwracalne (konstytutywne lub obligatoryjne rośliny CAM) [2].

Czy kryształka lśniąca może pomóc w odsalaniu gleb?

Kationy i aniony budujące sole mineralne są naturalnym i niezbędnym do rozwoju roślin składnikiem gleb. Stanowią istotny komponent szlaków sygnałowych, wchodzą w skład błon komórkowych, kwasów nukleinowych i enzymów, pomagają utrzymać turgor w roślinie, mogą także uczestniczyć w fotosyntezie, oddychaniu komórkowym i innych procesach biochemicznych. W zwiększonej ilości sole pojawiają się w podłożu w wyniku naturalnych procesów, takich jak przenoszenie soli morskiej przez wiatr czy zalewanie terenów przybrzeżnych wodą morską, ale także jako efekt działania człowieka, wynikający z nawożenia terenów rolniczych lub „solenia” ulic i chodników w okresie zimowym [5]. Aż 831 milionów hektarów na Ziemi posiada nadmiar soli mineralnych, z czego prawie połowa tych ziem zawiera w dużej ilości kation sodu (Na^+). Wysokie zasolenie podłoża może w niekorzystny sposób wpływać na roślinę, zarówno z uwagi na oddziaływanie poszczególnych jonów na roślinę, jak i przekroczenie granicy tolerancji roślin na ogólną koncentrację soli, co prowadzi do zmiany ciśnienia osmotycznego i ograniczenia poboru wody z podłoża. W efekcie zwiększone zasolenie negatywnie wpływa na funkcjonowanie organizmu roślinnego na różnych poziomach jego organizacji: w komórkach zmienia właściwości błon komórkowych, w organach zaburza produkcję i regulację hormonalną i w konsekwencji procesy fizjologiczne, tj. oddychanie czy transpirację, a w kontekście całego organizmu zaburza realizację programu rozwojowego (zahamowanie kiełkowania czy wytwarzania organów generatywnych). Wysoka koncentracja soli w podłożu prowadzi także do powstania w komórce roślinnej dużych ilości tak zwanych reaktywnych form tlenu (RFT, ang. *ROS – Reactive Oxygen Species*). Ich nadmiar powoduje zakłócenie wielu procesów metabolicznych, co może prowadzić do śmierci rośliny. Należy zaznaczyć, że stężenie soli, w zależności od jej charakteru, może powodować zamieranie roślin (rośliny warzywne i ozdobne są bardziej odporne na zasolenie, niż rośliny sadownicze). W tolerancji ro-

ślin na obecność soli istotna jest ich faza fizjologiczna – osobniki młode są często bardziej wrażliwe niż te dojrzałe.

Rozwój kryształki lśniącej na terenach zasolonych skutkuje akumulacją dużych ilości jonów Na^+ i chloru Cl^- w jej tkankach (co prowadzi jednocześnie do indukcji metabolizmu typu CAM). W odpowiedzi na powstały stres roślina produkuje i magazynuje w swoich organach tzw. osmolity – substancje, których zadaniem jest równoważenie wysokich wartości potencjału osmotycznego, na jakie narażone są komórki. Jednym z ważniejszych osmolitów jest aminokwas prolina, którego zadaniem jest ochrona enzymów przed denaturującym wpływem wolnych rodników, których powstawanie może następować na skutek zasolenia, ale także w przypadku innych stresów, np. niedoboru wody, czyli fizjologicznej suszy. Długoterminowy stres solny indukuje bardzo wyraźne zmiany w wyglądzie kryształki – przede wszystkim na powierzchni liści pojawiają się wspomniane wcześniej komórki pęcherzykowate (Ryc. 6). Dochodzi do rozgałęzienia pędu, a nowo rozwijające się liście są drobniejsze i bardziej mięsiste. W obrębie korzeni, a więc organie wystawionym na bezpośrednie działanie nadmiaru soli, produkowane są sygnały, które zapoczątkowują zmiany metabolizmu fotosyntetycznego w części nadziemnej rośliny. Ponieważ kryształkę zalicza się do grupy roślin efektywnie usuwających sól z gleby, przeprowadzane są także testy z wykorzystaniem jej jako warzywa lub paszy uprawianej na podłożach bogatych w sole. Należy zwrócić jednak uwagę na fakt, że kryształka, jak i inne halofity, może być toksyczna dla konsumentów ze względu na bardzo duże stężenie soli zakumulowanych w jej organach. Ponadto zrozumienie mechanizmów, dzięki którym halofity rozwijają się na terenach bogatych w sole, może być użyteczne w celu rozwoju tolerancji na zasolenie konwencjonalnych upraw, które w chwili obecnej są zagrożone podłożami o zwiększonym zasoleniu. Dodatkowo halofity mogą, obok plonów konwencjonalnych, wzbogacać ofertę rynkową [9].

Kryształka potrafi usuwać metale ciężkie z gleby

Gleby zasolone często stanowią tereny akumulacji odpadów przemysłowych i miejskich, co oznacza, że zwykle są zanieczyszczone metalami ciężkimi. Liczne prace i eksperymenty potwierdzają zdolność halofitów do fitoekstrakcji, czyli usuwania metali ciężkich z gleby. Potencjał kryształki, jak i innych halofitów, do adaptacji do zasolonego środowiska wynika głównie ze zdolności deponowania toksycznych jonów w metabolicznie nieaktywnych organach lub przedziałach

komórkowych, przy jednoczesnej syntezie osmotolów i indukcji systemu antyoksydacyjnego – te cechy decydują o możliwości wykorzystania halofitów

ważniejszych zagrożeń dla środowiska naturalnego. Rozbudowa systemu antyoksydacyjnego, zwiększenie zawartości proliny, brak zaburzeń w aktywności fo-



Ryc. 6. Komórki pęcherzykowane. Fotografia: Ewa Surówka. Kryształka jest przedstawicielem halofitów – roślin zamieszkujących gleby o wysokim zasoleniu. Unieczynnienie i separacja toksycznych jonów, m.in. Na^+ i Cl^- , zachodzi z wykorzystaniem wypełnionych roztworem wody i soli mineralnych przezroczystych cystern, tzw. komórek pęcherzykowatych. Powstają one na powierzchni łodygi i liści po epizodzie stresowym (funkcjonalny metabolizm CAM), przypominając zamrażniętą rosę, od czego pochodzi jej niemiecka nazwa Eiskraut, podobnie jak angielska ice plant (dosł. roślina lodowa).

w procesie fitoremediacji. Metody fitoremediacji oparte są na wykorzystaniu zdolności niektórych roślin do eliminowania lub unieszkodliwiania zanieczyszczeń w środowisku. Zdolności te polegają między innymi na rozwoju roślin w środowisku skażonym (może to być wzrost roślin na zanieczyszczonej w metale ciężkie glebie, w pobliżu skażonych wód gruntowych i powierzchniowych lub też rozwój w miejscu, gdzie jest obecne zanieczyszczone powietrze). W procesie fitoremediacji użyteczne są więc rośliny charakteryzujące się szybkim wzrostem, dużym plonem łatwym do zbioru oraz zdolnością do akumulacji metali ciężkich w częściach nadziemnych – większość z tych cech posiada także kryształka lśniąca. Dowiedziono, że roślina ta wykazuje tolerancję na obecność w podłożu niklu (Ni) i na tej podstawie stwierdzono, że jest ona dobrym gatunkiem fitostabilizacyjnym - redukującym ryzyko związane z prawdopodobieństwem przemieszczania się metali do głębszych warstw gleby [3]. Badania prowadzone przez nasz zespół potwierdziły wysoką tolerancję kryształki eksponowanej na działanie wysokich dawek kadmu (Cd), stanowiącego obecnie jedno z po-

tosyntetycznej, a przede wszystkim zdolność do akumulacji tych pierwiastków w organach – te wszystkie czynniki sprawiają, że roślina ta może być stosowana do oczyszczania zanieczyszczonych terenów [7].

Kryształka lśniąca zawiera duże ilości betalain

Betalainy to zawierające azot, rozpuszczalne w wodzie związki, które podobnie jak chlorofile, karotenoidy i antocyjany zaliczane są do najpopularniejszych barwników roślinnych. Kryształkę wyróżnia na tle innych roślin ich duża zawartość w kwiatach, owocach, a nawet w nasionach i liściach. Jednak w przeciwieństwie do pozostałych pigmentów, zwykle występujących w plastydach, betalainy rozpuszczone są w soku wakuolarnym. W ich skład wchodzi między innymi czerwone betaniny, czerwono-purpurowe betacyjaniny i żółte betaksantyny. Podobnie jak antocyjany, nadają one roślinom kolory od żółto-pomarańczowego poprzez czerwony i purpurowy aż do niebieskiego [8]. Dotychczas potwierdzono ich działanie jako antyoksydantów komórkowych. Znana jest także ich rola w wabieniu owadów,

co wspomaga dystrybucję pyłku i tym samym ułatwia rozmnażanie. Ponadto betalainy mogą spełniać szereg innych ról, jak np. rezerwuuar azotu lub jako czynnik zmniejszający potencjał osmotyczny wakuoli. U krysztalki lśniącej silne natężenie światła powoduje intensywną generację betalain. Szczególnie jest to widoczne na wierzchołku młodych liści, jak i tych w pełni rozwiniętych. Już po 48 godzinach w następstwie naświetlania można zaobserwować zmiany w zabarwieniu, wywołane akumulacją barwników (Ryc. 7). Synteza i akumulacja betalain (szczególnie w liściach) jest prawdopodobnie związana z ochroną przeciwko szkodliwemu działaniu promieniowania UV [4].



Ryc. 7. Synteza betalain w liściach krysztalki może być stymulowana światłem. Fotografia: Marta Libik-Konieczny. Betalainy to jedne z podstawowych barwników komórek roślinnych. Poza walorami dietetycznymi (naturalne antyoksydanty), mogą być one wykorzystywane w przemyśle spożywczym jako substytut sztucznych barwników czy wzmacniaczy smaku. U krysztalki lśniącej silne natężenie światła powoduje intensywną produkcję betalain. Akumulowane w liściu barwniki powodują zmianę jego zabarwienia na kolor niebiesko-czerwony.

Betalainy wykorzystywane są w przemyśle spożywczym jako naturalne pigmenty do barwienia produktów spożywczych, takich jak choćby napoje orzeźwiające lub do wzmocnienia smaku niektórych słodczy, deserów czy soków owocowych. Są one lepszą alternatywą dla barwników syntetycznych, które budzą zastrzeżenia konsumentów z uwagi na ich potencjalnie niekorzystne działanie.

Krysztalka lśniąca na talerzu i w tabletkach – czyli o jej zastosowaniu konsumpcyjnym

Krysztalka jest rośliną jadalną. Jej liście i łodygi mogą być spożywane na surowo (jako sałata) lub po ugotowaniu jako substytut szpinaku. Liście mają kwaśny smak i podobnie jak ogórki, mogą być marynowane. Jadalne są także nasiona. W celach konsumpcyjnych krysztalka hodowana jest przede wszystkim

w Indiach, Kalifornii, Australii i Nowej Zelandii. W Europie jest znana jako szybkie w przyrządzeniu, delikatne warzywo. Z uwagi na ograniczoną trwałość, liście krysztalki przechowuje się w suchych i chłodnych warunkach. Z uwagi na ograniczoną dostępność, liście krysztalki to produkt nie tani – na niemieckich bazarach kilogram kosztuje około 25 euro. W Polsce roślina ta była uprawiana w latach międzywojennych. Doniesienia naukowe z tych czasów wskazują, iż jest wdzięcznym warzywem uprawnym, a po spełnieniu jej nieco wygórowanych wymagań, z hektara można uzyskać plon w wysokości 20 do 30 ton; może ona więc być stosowana także jako pasza dla zwierząt [1, 2].

Krysztalka znana jest również ze swoich właściwości leczniczych, m. in. ze względu na obecność takich składników jak rutozyd (poprawia funkcjonowanie układu krążenia), hiperozyd (działa moczopędnie i przeciwzapalnie), kwas ferulowy (zapobiega starzeniu się skóry), koniugaty flawonolu (mają właściwości przeciwutleniające i przeciwzapalne), propelargonidyny (działanie antyoksydacyjne) i procyjanidyny (pomagają w obrzękach). Krysztalka może być więc stosowana w leczeniu infekcji grzybiczych i bakteryjnych, infekcji dziecięcych, gorączki czy biegunki. Wykorzystywana jest także jako remedium w leczeniu szkorbutu, gruźlicy, zapalenia zatok, wodobrzusza, chorób wątroby i nerek. W Tunezji krysztalka była wykorzystywana także w leczeniu stanów zapalnych oczu. Poza tym w wielu krajach jest rośliną ozdobną, tworzącą zarówno rabatki, jak i skalniaki, a jej zgniecione liście mogą służyć jako substytut mydła [6].

Krysztalka w dydaktyce

Warto również wspomnieć, że krysztalka lśniąca jest bardzo dobrym modelem wykorzystywanym w dydaktyce. Jej hodowla jest stosunkowo prosta, a jej cykl życiowy jest dość krótki. Na jej przykładzie można wskazać widoczny wpływ czynników abiotycznych (wysokie natężenie światła, zasolenie gleby, niska i wysoka temperatura) oraz biotycznych (wpływ grzybów lub bakterii) na zmiany fizjologiczne. Możliwe jest także kontrolowane zaindukowanie fotosyntezy typu CAM poprzez podlewanie roślin wodnym roztworem NaCl, a następnie dokonywanie porównań fizjologicznych i biochemicznych pomiędzy roślinami C_3 i roślinami typu CAM przy identycznym genomie [2].

Podsumowanie

Kryształka lśniąca zyskuje coraz większą popularność w badaniach fizjologicznych i biochemicznych. Ten semi-halofit pozostaje jednym z najbardziej wszechstronnie analizowanych gatunków reprezentujących metabolizm typu przejściowego C₃/CAM. Do chwili obecnej opublikowano aż 317 artykułów naukowych z nazwą kryształki w tytule (Web of Science, 2018). Ze względu na stopniowe ocieplanie

się klimatu, zwiększa się obszar środowiska naturalnego dla kryształki, co zapewne ułatwi hodowlę tego gatunku w Polsce.

Finansowanie

Badania zostały sfinansowane z projektu naukowego OPUS11 2016/21/B/NZ9/00813.

Bibliografia

1. Abd El-Gawad A.M., Shehata H.S. (2014). Ecology and development of *Mesembryanthemum crystallinum* L. in the Deltaic Mediterranean coast of Egypt. "Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences" 29-37.
2. Adams P., Nelson D.E., Yamada S., Chmara W., Jensen R., Bohnert H.J., Griffiths H. (1998). Growth and development of *Mesembryanthemum crystallinum* (Aizoaceae). "The New Phytologist" 138, 171-190.
3. Amari T., Debez A., Taamali M., Youssef N.B., Lucchini G., Sacchi G.A., Abdelly Ch. (2014). Comparative Ni tolerance and accumulation potentials between *Mesembryanthemum crystallinum* (halophyte) and *Brassica juncea*: Metal accumulation, nutrient status and photosynthetic activity. "Journal of Plant Physiology" 171, 1634-1644.
4. Ibdah M., Krins A., Seidlitz H.K., Heller W., Strack D., Vogt T. (2002). Spectral dependence of flavonol and betacyanin accumulation in *Mesembryanthemum crystallinum* under the enhanced ultraviolet radiation. "Plant, Cell and Environment" 25, 1145-1154.
5. Kotuby-Amacher J., Koenig R., Kitchen B. (2000). Salinity and Plant Tolerance. "Utah State University Extension" 3, 1-8.
6. Ksouri R., Ksouri W.M., Jallali I., Debez A., Magné C., Hiroko I., Abdelly Ch. (2012). Medicinal halophytes: potent source of health promoting biomolecules with medical, nutraceutical and food applications. "Critical Reviews in biotechnology" 2, 289-326.
7. Shevyakova N.I., Netronina I.A., Aranova E.E., Kuznetsov V. (2003). Compartmentation of Cadmium and Iron in *Mesembryanthemum crystallinum* Plants during the Adaptation to Cadmium Stress. "Russian Journal of Plant Physiology" 50, 678-685.
8. Strack D., Vogt T., Schliemann W. (2003). Recent advances in betalain research. "Phytochemistry" 62, 247-269.
9. Ślesak I., Miszalski Z. (1999). Reakcje stresowe u *Mesembryanthemum crystallinum* L. "Wiadomości Botaniczne" 43, 47-58.

Adriana Maria Kaproń, Doktorantka w Instytucie Fizjologii Roślin im. F. Górskiego PAN w Krakowie. E-mail: adrkapron@gmail.com

Michał Nosek, Instytut Biologii, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie.

Marta Śliwa, Instytut Biologii Roślin i Biotechnologii, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie.

Zbigniew Miszalski, Instytut Fizjologii Roślin im. F. Górskiego PAN w Krakowie.