

KSZTAŁTOWANIE SIĘ PŁONU BURAKA CUKROWEGO W ZALEŻNOŚCI OD WYBRANYCH CZYNNIKÓW ŚRODOWISKOWYCH

Sławomir Podlaski, Danuta Chołuj, Anita Wiśniewska✉

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Nierównomierność wschodów i wzrostu siewek na początku wegetacji jest jednym z podstawowych elementów zmienności plonów na plantacjach buraka cukrowego. Głównym czynnikiem ograniczającym produktywność roślin jest powolny wzrost powierzchni liści w tym okresie. Przyrost powierzchni liści można zwiększyć poprzez przyspieszenie terminu siewu oraz wzrostu roślin w wyniku odpowiedniego przygotowania nasion i gleby. Siewki buraka są najbardziej wrażliwe na przymrozki tuż po pojawieniu się liścieni na powierzchni gleby. W celu uzyskania maksymalnego plonu, buraki muszą wzrastać w warunkach zapewniających efektywną sumę temperatur i odpowiednie natężenie promieniowania słonecznego. Najszybszy wzrost buraków występuje w lipcu i sierpniu, kiedy to wzrost liści zależy szczególnie od dostępności wody w glebie. Względnej tolerancji tego gatunku na suszę sprzyja, gdy w lipcu LAI osiąga maksimum, a długość korzeni buraka osiąga 1 m. W ostatnich kilkudziesięciu latach zwiększył się współczynnik plonowania buraków w wyniku wyeliminowania plonu liści jako jednego z kryterium selekcji w programach hodowlanych.

Słowa kluczowe: fizjologia plonowania, natężenie napromieniowania, temperatura, wilgotność gleby

WSTĘP

Do głównych czynników środowiska wpływających na wzrost i rozwój buraka cukrowego należą: temperatura powietrza i gleby, dostępność wody w glebie i natężenie napromieniowania. Wpływ naturalnych czynników środowiska na wzrost buraków jest zwykle modyfikowany poprzez zabiegi agrotechniczne, głównie uprawę i nawożenie gleby. W początkowej fazie wzrostu duży wpływ na przebieg wegetacji roślin mogą

✉anita_wisniewska@sggw.pl

wywierać również cechy nasion. Oddziaływanie poszczególnych czynników środowiskowych na produktywność roślin zostanie omówione oddzielnie dla poszczególnych faz wzrostu buraka i jego organów.

WPŁYW WARUNKÓW ŚRODOWISKA ORAZ CECH OWOCÓW I SIEWEK NA KIEŁKOWANIE NASION, POCZĄTKOWY WZROST BURAKA I JEGO PŁON

Efekt temperatury i wilgotności gleby

Gleba charakteryzuje się określoną dynamiką zmian temperatury zarówno w okresie dnia i nocy, jak i w czasie kolejnych miesięcy w roku. W styczniu i lutym średnia temperatura gleby na głębokości 0–2 cm jest niższa niż średnia temperatura powietrza. Z kolei w późniejszych miesiącach wegetacji jest już znacznie wyższa, dochodząc lub przekraczając w upalne bezdeszczowe dni czerwca czy lipca do 60°C na powierzchni gleby. W dniu słonecznym promieniowanie słoneczne powoduje prawie natychmiastowy wzrost temperatury gleby i przekazywanie ciepła w głąb profilu glebowego. W dni pochmurne promieniowanie nie dociera bezpośrednio do gleby, co opóźnia jej nagrzewanie. Pod koniec dnia następuje przyspieszenie zmiany kierunku strumienia powietrza z głębi gleby ku powierzchni [Ciaranek 2013].

Generalna zmiana kierunku strumienia ciepła (od powierzchni w głąb gleby) najczęściej występuje w lutym i marcu, a we wrześniu kierunek ten ulega odwróceniu. Istnieje silna dodatnia korelacja między średnią temperaturą powietrza a temperaturą gleby na różnych głębokościach. W latach 2007–2009 średnia temperatura powietrza w styczniu, lutym, marcu i kwietniu w Krakowie osiągała odpowiednio: 1,2, 1,5, 4,8 i 10,7°C, a odpowiadająca temperatura gleby na głębokości 2 cm: 0,8, 1,4, 5,1 i 13,2°C. Wynika z tego, że temperatura gleby w marcu i kwietniu była wyższa od temperatury powietrza [Ciaranek 2013].

Minimalna temperatura gleby, w której zaczyna się kiełkowanie nasion buraka, wynosi około 3°C [Gummerson 1986]. W miarę jak wzrasta temperatura, zwiększa się szybkość kiełkowania, co powoduje skrócenie czasu między wysiewem a pojawieniem się korzenia zarodkowego (tab.), czyli kiełkowaniem oraz między kiełkowaniem a pojawieniem się liści na powierzchni gleby, czyli wschodami roślin [Khan 2013].

Tabela Czas trwania wschodów połowych buraków w zależności od średniej dziennej temperatury gleby [Khan 2013]

Table Effect of mean day temperature of soil on the duration of sugar beet field emergence [Khan 2013]

| Zakres średnich temperatur gleby Range of mean day temperature of the soil [°C] | Czas trwania wschodów połowych [dni] Duration of field emergence [days] |
|--|--|
| 3,3–7,2 | 21 |
| 7,3–11,1 | 10–20 |
| 11,2–15,6 | 7–12 |
| 15,7–21,0 | 5–7 |

Obniżenie wschodów polowych w niższych temperaturach wynika z różnicy między kiełkowaniem nasion w glebie a wschodami polowymi. Według badań przeprowadzonych w Katedrze Fizjologii Roślin SGGW (dane niepublikowane), w dobrych warunkach glebowych wynosi ona około 10%, a przeciętnie około 15–20%. Gdy warunki glebowe nie sprzyjają wschodom, np. w wyniku wystąpienia niskiej temperatury lub suszy, różnica ta może sięgać nawet 30–50%. Z efektami działania niskich temperatur w okresie wschodów spotkali się brytyjscy plantatorzy w 2013 roku [<https://germains.com>], kiedy średnia dzienna temperatura powietrza była o 6°C niższa od średniej wielolecia. W tych warunkach duża część nasion zdolnych do kiełkowania wytworzyła nienormalne korzenie zarodkowe i nie była zdolna do wschodów polowych. Koncern British Sugar sugeruje, że firmy nasienne powinny prowadzić ocenę jakości nasion w temperaturze 8°C [www.germains.com].

Wschody polowe drastycznie obniżały się, gdy wilgotność objętościowa gleby osiągała wartości poniżej 17,5%, czyli przy potencjale wodnym gleby około $-0,6$ MPa. Niewielkie zmniejszenie wschodów obserwowano, gdy wilgotność objętościowa gleby gliniastej wahała się między 20 a 25% [Jalilian i in. 2012]. Potencjał wody w glebie w granicach $-0,4$ MPa obniżał jedynie wschody polowe, ale nie wpływał na szybkość kiełkowania nasion buraka, a całkowite zahamowanie kiełkowania obserwowano przy potencjale wody niższym od $-0,7$ MPa [Akson i in. 1980]. Obniżone kiełkowanie nasion buraka w warunkach mniejszej dostępności wody w glebie było wyższe przy temperaturze niższej od 10°C [Yonts i in. 1983].

Wpływ wielkości owoców i siewek na plon buraka

Dla prawidłowego przebiegu wschodów polowych istotne znaczenie ma zdolność hypokotyli do pokonywania oporów mechanicznych, w tym zaskorupienia gleby. Badania Podlaskiego [1999] wskazują, że hypokotyl siewek wyrastających z nasion owoców buraka o średnicy 4,0–4,5 mm charakteryzuje się blisko 1,5 razy większą zdolnością do przezwycięzania oporów mechanicznych niż hypokotyl siewek powstających z nasion owoców o średnicy 3,0–3,5 mm. Stwierdzono ponadto, że wysoka zawartość jonów potasu oraz izotopu ^{15}N w owocni [Podlaski 1999, Dürr i in. 2000] lub w podłożu kiełkowania (gleba) stymulowała szybkość wydłużania hypokotyli i zwiększała ich zdolność do pokonywania oporów mechanicznych.

Wielkość siewek na początku wegetacji zależy od:

- genetycznie determinowanego wigoru nasion i roślin, co powoduje, że buraki o wyższym wigorze mogą lepiej plonować,
- wpływu środowiska (np. konieczności pokonywania przez hypokotyl oporów mechanicznych, nierównomiernej głębokości siewu i innych czynników) na przebieg wschodów roślin. W takich przypadkach występujące na początku wegetacji różnice w wielkości siewek mogą nie wpływać na wielkość plonu [dane własne autorów, niepublikowane].

Podstawowym czynnikiem wpływającym na zmienność masy siewek i powierzchni liści jest data wschodów. Rośliny wschodzące szybciej przed roślinami-sąsiadami osiągają większą masę na początku wegetacji. Różnice te w wielu przypadkach zachowują się do czasu zbioru roślin [Orzeszko-Rywka 1995, Podlaski 1999]. Podobnie Dürr i inni

[1992] stwierdzili, że podstawowa zmienność wielkości buraków na plantacjach tworzy się we wczesnych etapach wzrostu.

Dotychczas nie uzyskano jednak jednoznacznego dowodu na to, że populacja złożona wyłącznie z dużych siewek dałaby wyższy plon [Jaggard i in. 2009]. Jednocześnie należy podkreślić, że każdy czynnik, który zmniejsza wielkość siewek na początku wegetacji, może obniżać końcowy plon. Orzeszko-Rywka [1995] wykonała doświadczenie, w którym co 18 cm w rzędzie wysiewano 5 nasion buraków w odległości około 2 cm od siebie. Data wschodów każdego buraka w punkcie była oznaczona, co po wykonaniu przerwy w fazie liścieni pozwoliło utworzyć poletka, na których buraki wschodziły we wczesnym, średnim, mieszanym i późnym terminie wschodów. Średnia masa jednego korzenia z poletka wynosiła odpowiednio: 0,89, 0,85, 0,81 i 0,75 kg.

Dürr i inni [1992] wykazali, że zmienność cech w fazie wschodów (czas termiczny od momentu siewu do wschodów, liczba wzeszłych buraków, masa roślin) w 20% określa różnice w końcowym plonie roślin.

Podsumowując podane wyżej wyniki badań można stwierdzić, że na plantacjach część potencjalnego plonu jest utracona w wyniku niewyrównanej wielkości siewek na początku wegetacji. Przestrzeń na polu jest nieefektywnie wykorzystana przez słabsze siewki. Gdyby populacja składała się w większości z dużych siewek, plon korzeni mógłby być wyższy o około $1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ [Jaggard i in. 2009].

Wpływ przymrozków na wschody buraka

Bezpośrednie uszkodzenia roślin przez mróz występują wtedy, gdy kryształy lodu powstają wewnątrz komórek i uszkodzają tkanki. Największa wrażliwość tkanek na niską temperaturę występuje bezpośrednio po wschodach roślin, kiedy to siewka pobiera materiały zapasowe z nasienia, a intensywność fotosyntezy liścieni jest niewielka. Wraz z wydłużeniem okresu trwania fotosyntezy tolerancja roślin na niską temperaturę ulega zwiększeniu. Buraka cukrowego można uznać za gatunek dość tolerancyjny na kilkustopniowe przymrozki na początku wegetacji – do około -3°C . Wrażliwość buraka na ujemne temperatury gleby zależy od czynników genetycznych oraz od warunków środowiska, wpływających na fizjologiczny stan młodej siewki, szczególnie po jej pojawieniu się na powierzchni gleby.

Wood [1952] wykazał, że istnieje genetycznie determinowana wrażliwość różnych genotypów na niskie temperatury, występujące w okresie wschodów i w początkowym okresie wzrostu buraka. Obecnie ten problem nie jest badany i nie wiadomo czy istnieją odmiany bardziej tolerancyjne na przymrozki w czasie wschodów.

Biorąc pod uwagę warunki środowiska można stwierdzić, że każdy czynnik, który utrudnia lub opóźnia pojawienie się liścieni na powierzchni gleby, sprzyja uszkodzeniom wzeszłych roślin przez przymrozki. Do takich czynników należą: mała wielkość nasion botanicznych, duża głębokość siewu, opory mechaniczne gleby w czasie wschodów, mała zawartość składników mineralnych w glebie i generalnie długi czas trwania wschodów [Dürr i in. 1999].

Stwierdzono, że genotypy buraka różnią się zdolnością wykorzystania związków zapasowych nagromadzonych w nasieniu botanicznym. Dotyczy to szczególnie

azotu. Zawartość węgla w siewkach, w stosunku do zawartości węgla w nasionach botanicznych, była podobna u różnych genotypów, natomiast zawartość azotu była różna [Dürr i in. 2000]. Rozkład związków zapasowych do substancji niskocząsteczkowych, osmotycznie czynnych oraz wysoka zawartość potasu przeciwdziała powstawaniu lodu w komórkach i zwiększa mrozoodporność [Loel i Hoffman 2015]. Wynika to z ujemnej korelacji między potencjałem osmotycznym soku komórkowego a tolerancją roślin na niskie temperatury.

Duży wpływ na tolerancję siewek ma stopień hartowania roślin warunkowany niską temperaturą w czasie kiełkowania. W przypadku gdy nasiona kiełkowały w temperaturze 23°C, a po wschodach w fazie liścieni i pierwszej pary liści zastosowano temperaturę -1,5°C przez 24 godziny – przeżywało tylko 21% siewek. Natomiast gdy kiełkowanie prowadzono w cyklach temperaturowych od 2 poprzez 15 do 23°C przeżywalność siewek wzrastała do 97%. Na podstawie tych danych można stwierdzić, że największa wrażliwość roślin na przymrozki występuje, gdy zjawisko to pojawia się nagle po okresie względnie cieplej pogody [Dürr i in. 2000].

Podsumowując, siewki buraka są najbardziej wrażliwe na przymrozki tuż po pojawieniu się liścieni na powierzchni gleby. Każdy czynnik zwiększający potencjał osmotyczny soku komórkowego w czasie pojawienia się liścieni na powierzchni gleby (małe nasiona, opory mechaniczne gleby, głęboki siew, niepoprawne nawożenie) zmniejsza tolerancję siewek na mróz.

WPŁYW CZYNNIKÓW ŚRODOWISKOWYCH NA WZROST LIŚCI BURAKA

Charakterystyka powstawania powierzchni liściowej

Zwiększanie powierzchni liści zależy od szybkości ich powstawania i powiększania oraz długości ich życia na roślinie. Wszystkie te elementy są silnie determinowane przez czynniki środowiska: klimat, nawadnianie i nawożenie. Charakterystyka sposobu tworzenia powierzchni liściowej [Milford i in. 1985b]:

- liście tworzą się przez cały okres wegetacji rośliny buraka, która wytwarza 5 okółków po 13 liści w każdym z nich,
- latem, co tydzień pojawiają się 2–3 liście w przedziałach czasowych co 30°Cd jednostek termicznych (termin wyjaśniono niżej),
- pierwsza para wytworzonych liści zamiera w połowie czerwca,
- długość życia liści rośnie wraz z opóźnieniem czasu ich powstawania, ze względu na szybkie zamieranie pierwszych liści [Milford i in. 1985a],
- wytwarzane liście, do mniej więcej dwunastego, w każdym okółku są coraz większe; największe liście osiągają powierzchnię około 500 cm²; pod koniec okresu wegetacji wytwarzane są mniejsze liście,
- wytworzone liście od piątego do dwudziestego odpowiadają w głównej mierze za aktywność fotosyntetyczną aparatu liściowego; różnice w szybkości wzrostu i ostatecznej wielkości powierzchni liści bardziej zależą od wzrostu i indywidualnej powierzchni pojedynczych liści niż od różnic w ich liczbie,

- podczas wzrostu liście wymagają około $30 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ jednostkę LAI^{-1} (LAI – stosunek powierzchni liści do powierzchni gleby, wskaźnik powierzchni liściowej) oraz około $100 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$, aby całkowicie zakryć międzyrzędzia [Malnou i in. 2006],
- większość wytworzonych na początku wegetacji związków organicznych zużywana jest na wzrost liści; w konsekwencji zmniejsza się udział korzenia w całkowitej suchej masie rośliny [Malnou i in. 2006],
- istnieje wysoka zmienność między genotypami dotycząca liczby, kształtu, ustawienia i powierzchni liści; podobny plon korzeni można uzyskać przy różnych cechach morfologicznych liści [Milford i in. 1985b].

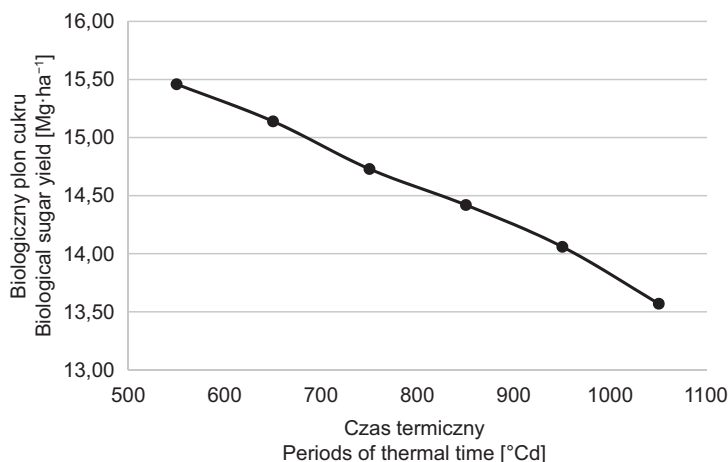
Wpływ temperatury powietrza, natężenia napromieniowania i wilgotności gleby na wzrost liści

Burak cukrowy do momentu kwitnienia może nieprzerwanie kontynuować wzrost i akumulację cukru. Najważniejszym czynnikiem środowiskowym determinującym plon od czasu wytworzenia liścieni do uzyskania całkowitego zakrycia międzyrzędzi przez część nadziemną rośliny jest temperatura powietrza. Istnieje ścisły dodatni liniowy związek między szybkością wytwarzania i zwiększania powierzchni nowych liści a temperaturą powietrza [Lemaire i in. 2008]. W konsekwencji, aż do pełnego zakrycia międzyrzędzi, czyli do osiągnięcia wskaźnika powierzchni liściowej (LAI) rzędu 2,5–3,0, obserwuje się ścisłą zależność między LAI a ilością pochłoniętego promieniowania słonecznego z jednej strony oraz ilością pochłoniętego promieniowania a plonami suchej masy korzeni i cukru z drugiej strony [Draycott 2006]. Z tego względu każdy czynnik środowiska czy agrotechniki, który ogranicza rozwój liści, wpływa negatywnie na końcowy plon. Jednocześnie podstawowym zadaniem agrotechniki, prowadzącym do uzyskania większego plonu, jest stymulacja rozwoju powierzchni liści.

U buraka cukrowego w fazie 4–10 liści występuje mniej więcej stała względna szybkość wzrostu (RGR , ang. *relative growth rate*). Gdy dostępność wody i składników pokarmowych jest optymalna, podstawowymi czynnikami środowiskowymi wpływającymi na wzrost są przede wszystkim temperatura, a następnie natężenie napromieniowania [Boiffin i in. 1992]. Scott i Jaggard [1979] uważają, że gdy średnia temperatura powietrza w okresie od kwietnia do lipca będzie niższa od wieloletniej o 10°C , to plon cukru obniży się o około 10% na skutek wolniejszego rozwoju liści. W Wielkiej Brytanii roczny przyrost plonu cukru biologicznego na plantacjach produkcyjnych w latach 1976–2006 wynosił $110 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, a w doświadczeniach odmianowych $202 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ [Jaggard i in. 2009]. W tych badaniach cieplejsze lata i wcześniejszy siew odpowiadały za 68% przyrostu plonów cukru, a postęp hodowlany i agrotechniczny tylko w 32%.

Powyższe dane wskazują, że w praktyce istnieją dwa sposoby zwiększenia szybkości wzrostu powierzchni liści: poprzez modyfikację agrotechniki, tak aby rośliny wschodziły szybciej oraz zwiększanie szybkości wytwarzania liści na jednostkę czasu termicznego (ang. *thermal time* $^\circ\text{Cd}$). *Czas termiczny jest to suma temperatur w określonym czasie (np. czasie wschodów, okresie wegetacji) ponad temperaturę podstawową determinującą początek rozwoju buraków. Najczęściej przyjmowaną wartością są 3°C określające początek kiełkowania.*

Obecne odmiany potrzebują około 1050 jednostek °Cd od siewu do uzyskania powierzchni liści obejmującej 90% powierzchni gleby. Zależność między czasem termicznym od wschodów do uzyskania 90% pokrycia powierzchni gleby przez liście a plonem cukru przedstawiono na rysunku. Jednym ze sposobów przyspieszenia wytwarzania liści jest pobudzenie nasion.



Rys. Teoretyczne plony cukru biologicznego buraka charakteryzującego się zróżnicowanym czasem termicznym od wschodów do uzyskania 90% pokrycia powierzchni gleby przez liście

Fig. Simulated biological sugar yield of beet having different periods of thermal time from sowing to 90% foliar cover

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Jaggard i in. 2009.

Source: Own study based on Jaggard et al. 2009.

Ze względu na powolne zwiększanie powierzchni liści na początku wegetacji buraki są zdolne wykorzystać nie więcej niż 30% dostępnego promieniowania słonecznego w okresie od początku kwietnia do października [Draycott 2006].

Większość zmienności plonów suchej masy, uzyskanych na dobrze nawożonych, nawadnianych i „zdrowych” plantacjach, może być powiązana z ilością pochłoniętego promieniowania słonecznego. Niezależnie od miejsca i lat badań uzyskuje się podobną produkcję suchej masy w przeliczeniu na jednostkę pochłoniętego promieniowania słonecznego z zakresu fotosyntetycznie aktywnej radiacji (PAR, ang. *photosynthetic active radiation*) [Werker i Jaggard 1998]. Typowa wartość tego wskaźnika (RUE, ang. *radiation use efficiency*) dla buraków cukrowych kształtuje się na poziomie około 1,5 g suchej masy na MJ fotosyntetycznie aktywnej radiacji [Richter i in. 2001]. W Anglii wartości sezonowe RUE w zależności od genotypu, roku badań i dostępności wody wahały się od 1,15 aż do 2,04 g MJ PAR⁻¹ [Ober i in. 2004]. W tych badaniach średnia wartość RUE wynosiła 1,72 g·MJ⁻¹. Analizując kilka genotypów buraka cukrowego uprawianych w północnej Francji uzyskano wyższe wartości tego wskaźnika, średnio

w granicach $2,31 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ [Damay i Le Guis 1993]. W literaturze z ostatnich lat nie ma dowodów na to, aby metodami hodowlanymi czy agrotechnicznymi można było modyfikować bezpośrednio RUE przez rośliny buraka.

Jak opisano powyżej, istnieje bezpośrednia zależność między wzrostem buraków a pochłoniętą energią świetlną i także podobny związek istnieje między wzrostem i zużyciem wody. We wschodniej Anglii stosunek nagromadzonej suchej masy na jednostkę zużytej wody (WUE, ang. *water use efficiency*) wahał się w zakresie 5–7 g s.m. $\text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O}^{-1}$. Dla porównania w Kalifornii wartość tego wskaźnika wynosiła tylko $2,3 \text{ g s.m. kg} \cdot \text{H}_2\text{O}^{-1}$ [Draycott 2006]. W warunkach suszy obserwowano różnicowanie genotypowe sezonowego WUE [Rajabi i in. 2008]. Z kolei wskaźnik wykorzystania wody [WUE], wyliczany jako stosunek intensywności fotosyntezy do intensywności transpiracji [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$], kształtował się w warunkach nawadniania u kilku genotypów buraka cukrowego między 3,3 a 4,5 i był wyraźnie podwyższony w wyniku niedoboru wody, głównie na skutek obniżenia intensywności transpiracji [Ober i in. 2005]. Ze względu na inną metodykę wyliczania WUE trudno jest bezpośrednio porównywać wartości tego wskaźnika przedstawianego w g s.m. $\text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ i $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$.

Część nadziemna buraka jest bardzo wrażliwa na suszę [Shaw i in. 2002, Chołuj i in. 2004]. Nawet niewielkie zmiany potencjału wody liści rzędu 0,2–0,3 MPa skutkują zahamowaniem ich wzrostu, a ich wydłużanie całkowicie ustaje przy potencjale wody około $-1,5 \text{ MPa}$ [Milford i Lawlor 1976]. Niedobór wody występujący we wczesnych fazach wegetacji buraka w większym stopniu negatywnie wpływa na wzrost powierzchni liściowej niż gdy susza wystąpi w fazie intensywnego wzrostu korzenia spichrzowego [Chołuj i in. 2004, Mohammadian i in. 2005]. W badaniach prowadzonych na kilku genotypach buraka cukrowego wartości LAI u roślin nawadnianych osiągały $4 \text{ m} \cdot \text{m}^{-2}$ między 56. a 163. dniem po wschodach, a w warunkach suszy wskaźnik ten obniżał się średnio 2,5-krotnie [Chołuj i in. 2014]. Zmienność w zakresie szybkości zwiększania powierzchni liści w okresie suszy występuje między odmianami [Ober i Luterbacher 2002], jak i w obrębie odmian. Dotychczas nie osiągnięto znaczącego postępu w przyspieszeniu rozwoju powierzchni liściowej na drodze hodowlanej [Bosemark 2006].

W warunkach niedoboru wody obserwuje się obniżenie RUE [Ober i in. 2004] nie tylko na skutek zmniejszenia powierzchni liści, ale także efektywności funkcjonowania fazy świetlnej fotosyntezy mierzonej na podstawie parametrów fluorescencji chlorofilu *a* [Mohammadian i in. 2003]. Zmniejszanie efektywnej wydajności kwantowej fotosystemu II pod wpływem suszy jest cechą genotypową [Ober i in. 2004, Chołuj i in. 2014]. Nie powinien więc dziwić fakt, że tolerancja buraka na suszę zależy istotnie od zmienności genetycznej, która jest skorelowana dodatnio z wielkością RUE [Ober i in. 2004].

Podsumowując, powolny przyrost liści na początku wegetacji w największym stopniu ogranicza wzrost plonu korzeni. W praktyce przyrost powierzchni liści można zwiększyć poprzez przyspieszenie terminu siewu oraz wzrostu roślin na początku wegetacji w wyniku odpowiedniego przygotowania nasion i gleby. Część nadziemna buraka jest wrażliwa na suszę, szczególnie gdy wystąpi ona we wczesnych fazach wegetacji. W warunkach niedoboru wody obniża się RUE.

ROZWÓJ SYSTEMU KORZENIOWEGO BURAKA A WARUNKI ŚRODOWISKOWE

Od mniej więcej 40. dnia od siewu zasięg strefy korzeniowej zwiększa się w tempie 1,6 cm na dzień. Ta względnie stała szybkość jest zachowana w czasie lata i jesieni. Gdy rośliny osiągną fazę 2–4 liści, korzenie sięgają 20 cm w głąb gleby, a powierzchnia liści osiąga 30% pokrycia powierzchni gleby (LAI). Siedemdziesiąt dni od siewu korzenie dorastają do głębokości 50 cm gleby. Do końca lipca, gdy osiągnięte jest całkowite pokrycie gleby przez liście, system korzeniowy sięga do 1 m w głąb gleby [Draycott 2006]. Oprócz wzrostu w głąb następuje rozrost korzeni w poprzek profilu glebowego. Od fazy 2 liści do 80. dnia od siewu korzenie rozrastają się swobodnie na boki w tempie 0,4 cm na dzień. Po około 80 dniach od siewu systemy korzeniowe roślin rosnących w sąsiednich rzędach zaczynają się przerastać [Draycott 2006].

Sposób rozrastania się korzeni umożliwia korzystanie z coraz większej objętości gleby. Brown i Biscoe [1985] stwierdzili, że większość systemu korzeniowego znajduje się w warstwie ornej gleby – do 30 cm. Do końca lata całkowita długość korzeni jednej rośliny w warstwie 0–30 cm przekracza 600 m. Biorąc pod uwagę powierzchnię 1 m², całkowita długość systemu korzeniowego jednej rośliny buraka w okresie sierpień–wrzesień wynosi od 8 do 15 km [Windt i Märlander 1994, Jaggard i in. 1996].

Jeżeli w okresie wegetacji występuje brak opadów, to obserwuje się przesuszenie wierzchniej warstwy gleby nawet do głębokości 60 cm, co powoduje potrzebę pobierania przez rośliny wody z głębszych warstw gleby. W takich warunkach korzenie w wierzchniej warstwie gleby mogą zamierać, lecz równie szybko mogą ulegać regeneracji po ponownym nawilgoceniu gleby [Jaggard i in. 1996].

Stwierdzono, że istnieje duża zmienność genetyczna pod względem szybkości wzrostu korzeni buraka w głąb profilu glebowego i zdolności korzeni do pobierania wody z głębszych warstw gleby. Wykazano jednocześnie, że nie ma różnic między nowymi i starymi odmianami buraków pod względem wykorzystania wody, szczególnie z głębszych warstw gleby, co sugeruje, że nie brano tego parametru pod uwagę w procesach hodowlanych [Jaggard i in. 1996]. Jednak w warunkach suszy obserwowano u tolerancyjnego genotypu buraka znaczne podwyższenie intensywności wzrostu korzeni przybyszowych w porównaniu z genotypem wrażliwym na ten stres [Shaw i in. 2002]. W badaniach prowadzonych w Katedrze Fizjologii Roślin SGGW na siewkach buraka genotypy bardziej tolerancyjne na niedobór wody charakteryzowały się dłuższym bądź bardziej rozgałęzionym systemem korzeniowym w porównaniu do genotypów bardziej podatnych na ten stres [dane niepublikowane]. U kilku genotypów buraka plon korzeni spichrzowych był dodatnio skorelowany z szybkością wydłużania korzeni przybyszowych, ich długością i powierzchnią [Stevanato i in. 2010].

WPŁYW WARUNKÓW ŚRODOWISKA NA WSPÓŁCZYNNIK PŁONOWANIA (HARVEST INDEX)

Burak cukrowy składa się z trzech podstawowych organów: blaszek liściowych wraz z ogonkiem, korzenia spichrzowego oraz systemu korzeni właściwych zaopatrujących roślinę w wodę i substancje mineralne. Dystrybucja asymilatów kierowanych do tych

trzech akceptorów determinuje dynamikę wzrostu plonu korzeni spichrzowych. Stosunkowo niewiele wiadomo na temat mechanizmów dystrybucji asymilatów w roślinie buraka [Bell i in. 1996]. Sugeruje się, że znaczenie ma długość dnia, genotyp i czynniki środowiskowe, głównie susza w końcowej fazie wegetacji [Webb i in. 1997, Kenter i in. 2006]. Udział suchej masy w korzeniu waha się od 47 do 77% w stosunku do całkowitej masy rośliny [Bell i in. 1996]. Prawdopodobnie kombinacja różnych czynników środowiska we współdziałaniu z genotypem wpływa na dystrybucję asymilatów [Webb i in. 1997].

Analizując wielkość biomasy części nadziemnej i korzeni spichrzowych, można stwierdzić, że w ostatnich latach występuje wyraźne zwiększenie współczynnika plonowania buraka. W latach 70. w Wielkiej Brytanii współczynnik plonowania wynosił 0,45, a obecnie zbliża się do 0,6 [Draycot 2006]. Jest prawdopodobne, że jednym z czynników wzrostu plonów w Europie było wyhodowanie odmian efektywnie wytwarzających asymilaty w procesie fotosyntezy nawet w późniejszych fazach ontogenezy i akumulujących je przede wszystkim w korzeniu spichrzowym.

Dwa czynniki decydują o wzroście liści w końcowym okresie wegetacji, tj. dostępność azotu i wody w glebie. Ciągłe pobieranie azotu zwiększa wzrost liści. Armstrong i inni [1986] wykazali, że w wielu lokalizacjach i latach badań pobieranie azotu było zahamowane w połowie sierpnia w czasie, gdy masa liści osiągnęła maksimum. Gdy dostępność wody jest ograniczona, wzrost liści jest hamowany, a asymilaty przemieszczają się do korzenia spichrzowego.

Ostatnio coraz większą rolę odgrywa identyfikacja genów zaangażowanych w akumulację cukru i suchej masy korzeni spichrzowych w końcowym okresie wegetacji w celu ukierunkowania hodowli na zwiększenie wartości tych parametrów [Bellin i in. 2007].

Podsumowując, wzrost plonowania buraka jest hamowany przez początkowo powolny, a pod koniec wegetacji często nadmierny wzrost liści. Nieuwzględnianie plonu liści, jako kryterium selekcji, doprowadziło w ostatnich kilkudziesięciu latach do ograniczenia wytwarzania liści i zwiększenia współczynnika plonowania buraków.

LITERATURA

- Akson W.R., Henson M.A., Fretag A.H., Westfall D.G., 1980. Sugar beet germination and emergence under moisture and temperature stress. *Crop Sci.* 20, 735–739.
- Armstrong M.J., Milford G.F.J., Pocock T.O., Last P.J., Day W., 1986. The dynamics of nitrogen uptake and its re-mobilization during the growth of sugar beet. *J. Agr. Sci. (Camb)*. 107, 145–154.
- Bell C.H.I., Milford G.F.J., Leigh R. A., 1996. Sugar beet. W: Photoassimilate distribution in plants and crops source-sink relationships. Red. E. Zamski i A.A. Schaffer, Marcel Dekker Inc. USA, New York.
- Bellin D., Schultz B., Soersen T.R., Salamini F., Schneider K., 2007. Transcript profiles at different growth stages and tap-root zones identify correlated developmental and metabolic pathways of sugar beet. *J. Exp. Bot.* 58, 699–715.
- Boiffin J., Dürr C., Fleury A., Matrin-Lafleche A., Maillet J., 1992. Analysis of the variability of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) growth during the early stages. I. Influence of various conditions on crop establishment. *Agronomie* 12, 515–525.

- Bosemark N.O., 2006. Genetics and breeding. W: Sugar beet Red. A.P. Draycott, Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK, 50–88.
- Brown K.F., Biscoe P.V., 1985. Fibrous root growth and water use of sugar beet. *J. Agr. Sci. (Camb.)* 105, 679–691.
- Ciaranek D., 2013. Wpływ warunków pogodowych na przebieg temperatury gleby w Ogrodzie Botanicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. *Prace Geograficzne* 133, 77–99.
- Chołuj D., Karwowska R., Jasińska M., Haber G., 2004. Growth and dry matter partitioning in sugar beet plants (*Beta vulgaris* L.) under moderate drought. *Plant Soil Environ.* 50, 265–272.
- Chołuj D., Wiśniewska A., Szafrąński K.M., Cebula J., Gozdowski D., Podlaski S., 2014. Assessment of physiological responses to drought in different sugar beet genotypes in connection with their genetic distance. *J. Plant Physiol.* 171, 1221–1230.
- Damay N., Le Gouis J., 1993. Radiation use efficiency of sugar beet in Northern France. *Eur. J. Agron.* 2(1), 179–184.
- Draycott A.P., 2006. Sugar beet. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK, 474.
- Dürr C., Boiffin J., Fleury A., Coulomb I., 1992. Factors influencing seedling size in field conditions. *Agronomie* 12, 527–535.
- Dürr C., Guérif M., Brochery F., Ferré F., 1999. Study of crop establishment effects on subsequent growth using a crop growth model (SUCROS). W: Materiały międzynarodowego sympozjum ESA “Modelling Cropping Systems”, Lleida, Hiszpania.
- Dürr C., Guevaer F., Guillet J.M., 2000. Pre-emergence growth of genotypes of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) tolerant to Rhizomania. *Ann. Bot.* 85, 197–202.
- Gummerson R.J., 1986. The effect of constant temperatures and osmotic potential on the germination of sugar beet. *J. Exp. Bot.* 37, 729–741.
- <https://germains.com>, Germains Seed Technology. 2013 Sugar Beet Emergence (dostęp: 25.10.2017). <https://germains.com/wp-content/uploads/2012/07/Final-sugar-beet-2013-emergence.pdf> (dostęp: 25.10.2017).
- Jaggard K.W., Dunham R.J., Brown K.F., Werker A.R., 1996. Season and soil type effects on sugar beet root development. W: Materiały 59-ego kongresu IIRB, Bruksela, Belgia, 213–228.
- Jaggard K.W., Oi A., Ober E.S., 2009. Capture and use of solar radiation, water and nitrogen by sugar beet (*Beta vulgaris* L.) *J. Exp. Bot.* 60, 1919–1925.
- Jalilian A., Dabiri V., Khurgami A.J., Basati J.V., Uosefabadi V., 2012. Study of germination and emergence of monogerm sugar beet cultivars under moisture stress. *J. Sugar Beet* 27, 15–19.
- Kenter C., Hoffmann C.M., Märlander B., 2006. Effect of weather variables on sugar beet yield development (*Beta vulgaris* L.). *Eur. J. Agron.* 24(1), 62–69.
- Khan M., 2013. Projections for 2013 Sugarbeet Crop plus Soil Temperature and Sugarbeet Seed Emergence. NDSU & University of Minnesota Extension Service.
- Lemaire S., Maupas F., Cournede P.H., Reffye P., 2008. A morphogenetic crop model for sugar beet (*Beta vulgaris* L.). W: International symposium on crop modeling and decision support. ISCMDS, Nanjing, China, 19–22.
- Loel J., Hoffman C.M., 2015. Relevance of osmotic and frost protecting compounds for the winter hardiness of autumn sown sugar beet. *J. Agron. Crop Sci.* 201, 301–311.
- Malnou C.S., Jaggard K.W., Sparkes D.L., 2006. A canopy approach to nitrogen fertilizer recommendations for sugar beet crop. *Eur. J. Agron.* 25, 254–263.
- Milford G.F.J., Lawlor D.W., 1976. Water and physiology of sugar beet. W: Proc. of 39 Congress IIRB, Brussels, Belgium, 95–108.
- Milford G.F.J., Pocock T.O., Riley J., 1985a. An analysis of leaf growth in sugar beet. II. Leaf appearance in field crops. *Ann. Appl. Biol.* 106, 173–185.

- Milford G.F.J., Pocock T.O., Jaggard K.W., Biscoe P.V., Armstrong M.J., Last P.J., Goodman P.J., 1985b. An analysis of leaf growth in sugar beet. IV. The expansion of leaf canopy in relation to temperature and nitrogen. *Ann. Appl. Biol.* 107, 335–347.
- Mohammadian R., Rahimian H., Moghaddan M., Sadehian S.Y., 2003. The effect of early season drought on chlorophyll a fluorescence in sugar beet (*Beta vulgaris* L). *Pak. J. Biol. Sci.* 6, 1763–1769.
- Mohammadian R., Moghaddan M., Rahimian H., Sadehian S.Y., 2005. Effect of early season drought stress on growth characteristics of sugar beet genotypes. *Turc. J. Agric. For.* 29, 357–368.
- Ober E.S., Luterbacher M.C., 2002. Genotypic variation for drought tolerance in sugar beet. *Ann. Bot.* 89, 917–924.
- Ober E.S., Clark C.J.A., Lebloa M., Royal A., Jaggard K.W., 2004. Assessing the genetic resources to improve drought tolerance in sugar beet: agronomic traits of diverse genotypes under droughted and irrigated conditions. *Field Crops Res.* 90, 213–234.
- Ober E.S., Bloa M.I., Clark C.J.A., Royal A., Jaggard K.W., Pidgeon J.D., 2005. Evaluation of physiological traits as indirect selection criteria for drought tolerance in sugar beet. *Field Crops Res.* 91, 231–249.
- Orzeszko-Rywka A., 1995. Wpływ terminu wschodów na plon buraka cukrowego. *Por. Plant. Bur. Cukr.* 5, 23–25.
- Podlaski S., 1999. Właściwości owoców buraka cukrowego wpływające na kiełkowanie nasion, wschody i wzrost roślin. *Rozprawy Naukowe i Monografie*, Wyd. SGGW, Warszawa, 105.
- Rajabi A., Griffiths H., Ober E.S., Kromdijk W., Pidgeon J.D., 2008. Genetic characteristic of water-use related traits in sugar beet. *Euphytica* 160, 175–187.
- Richter G.M., Jaggard K.W., Mitchell R.A.C., 2001. Modelling radiation interception and radiation use efficiency for sugar beet under variable climatic stress. *Agr. Forest Meteorol.* 109, 13–25.
- Scott R.K., Jaggard K.W., 1979. Theoretical criteria for maximum yield. W: *Proc. of 42 IIRB Congress*, Brussels, Belgium, 56–73.
- Shaw B., Thomas T.H., Cook D.T., 2002. Responses of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) to drought and nutrient deficiency stress. *Plant Growth Regul.* 37, 77–83.
- Stevanato P., Trebbi D., Saccomani M., 2010. Root traits and yield in sugar beet: identification of AFLP markers associated with root elongation rate. *Euphytica* 173, 289–298.
- Webb C.R., Werke A.R., Gilligan C.A., 1997. Modelling the dynamical components of sugar beet crops. *Ann. Bot.* 80, 427–436.
- Werker A.R., Jaggard K.W., 1998. Dependence of sugar beet yield on light interception and evapotranspiration. *Agr. Forest Meteorol.* 89, 229–240.
- Windt A., Märlander B., 1994. Root growth of sugar beet under special consideration of water relations. *Zuckerindustrie* 119, 659–663.
- Wood R.R., 1952. Selection for cold tolerance and low temperature germination in sugar beets. *Am. Soc. Sugar Beet Technologists.* 7, 407–410.
- Yonts C.D., Fornstron K.J., Eding R.J., 1983. Sugar beet emergence affected by soil moisture and temperature. *J. Am. Soc. Sugar Beet Tech.* 22, 119–134.

DEVELOPMENT OF SUGAR BEET YIELD IN RELATION TO SELECTED ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Summary. Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants are biennials and during the first growing season their roots accumulate sucrose. This species provides about 30% of world's sugar production. Sugar beets can be cultivated in the temperate latitudes of between 30–60°N, mostly in the European Union, North America and Russia. The yield of sugar beet is mainly determined by the amount of radiation captured and the agronomic strategy applied. A multitude of other agronomic factors can influence the yield. The goal of this review is to characterize several yield-conditioning factors of sugar beet like: soil conditions, features and size of seeds, seed germination, thermal time (°Cd) after emergence, early seedlings growth, leaf area index (LAI) and root growth. Temperature of soil is of prime importance at the beginning of seed germination. Generally, the higher is a temperature of soil, the faster is a seed emergence. Simultaneously, sugar beet seedlings are most susceptible to ground frost during emergence of cotyledon above soil surface. Each factor decreasing the osmotic potential of cells during cotyledon elongation increases the seedling tolerance to freezing. The heterogenic emergence and subsequent asynchronous growth of seedlings are the basic elements affecting variability of sugar beet yielding. In consequence, slower expansion of leaf area limits solar radiation interception and decreases plant productivity. In practice, leaf area expansion can be increased by early sowing and acceleration of seedling growth as a result of appropriate seed and soil preparation. To obtain maximal yield, sugar beet need to grow under the conditions providing a given sum of effective temperature and solar radiation. Nowadays, sugar beet cultivars need about 1050°Cd from sowing until the achievement of 90% of leaf area index (LAI). Radiation use efficiency (RUE) can thus reach about 1.5 g dry weight MJ. In July and August the growth of sugar beet is the fastest, but may be limited by soil water availability. The full ground cover by leaves and rooting depth of up to 1 m in July promote relative drought tolerance. The root system of sugar beet is subject to fast cycles of renewal and decay within the growing season. In water stress conditions, the ability to fast regeneration is strategic for plant survival and productivity. The impact of nitrogen fertilization is crucial for a yield of sugar beet – the highest influence of this element is observed on root and leaf dry matter production. During last decades, the harvest index of sugar beet has been increased by reducing the leaf yield as one of the selection criteria in breeding programmes.

Key words: crop physiology, soil moisture, solar radiation, temperature