

Wpływ preparatów roślinnych na ograniczenie stresu u roślin

The influence of plant preparations on reducing stress in plants

Anna Sikorska¹, Ewelina Pietrzak, Marek Gugła²

¹ Zakład Rolnictwa, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie, ul. Narutowicza 9, 06-400 Ciechanów, Polska, e-mail: anna.sikorska@pansim.edu.pl

² Wydział Nauk Rolniczych, Uniwersytet w Siedlcach, ul. Prusa 14, 08-110 Siedlce, Polska

Słowa kluczowe: biostymulatory, stres biotyczny, stres abiotyczny

Keywords: biostimulants, biotic stress, abiotic stress

Streszczenie

W ostatnich latach obserwuje się wzrost światowej populacji, co determinuje większe zapotrzebowanie na żywność. Organizacja Narodów Zjednoczonych szacuje, że w 2050 r. będzie około 9,7 mld ludzi, zaś w 2080 r. – 10,4 mld. Głównym problemem na świecie jest susza, będąca skutkiem zmian klimatu. Obecnie prowadzone są badania nad mechanizmami obronnymi u roślin podczas wystąpienia czynnika stresowego oraz ich analiza na poziomie morfologicznym, fizjologicznym i biochemicznym. Obserwuje się, że coraz powszechniej stosowane są środki pochodzenia roślinnego określane jako regulatory wzrostu i rozwoju roślin lub biostymulatory. Regulatory wzrostu zastosowane w niekorzystnych dla wzrostu i rozwoju roślin warunkach środowiska wpływają na uzyskanie szybszych i równomiernych wschodów roślin, stymulację wzrostu i rozwoju, lepsze ich przetrwanie. Celem artykułu był przegląd wyników badań dotyczących wpływu naturalnych preparatów roślinnych na ograniczenie stresu wodnego u roślin. W artykule, opierając się na danych naukowych, scharakteryzowano rodzaje stresów występujących u roślin i ich reakcje na deficyt wody oraz wykazano, w jaki sposób naturalne i syntetyczne preparaty roślinne mogą redukować skutki deficytu wodnego. Wyniki dotychczasowych badań wskazują, że biostymulatory łagodzą objawy stresu również w uprawach ogrodniczych. Pozytywne skutki zastosowania hydrolizatów białkowych dowodzą, że mogą być one zastosowane jako środki chroniące rośliny uprawne przed stresorami środowiskowymi, a to ma ogromne znaczenie w obecnym globalnym scenariuszu zmian klimatycznych.

Abstract

In recent years, there has been an increase in the world's population, which determines a greater demand for food. The United Nations estimates that in 2050 there will be approximately 9.7 billion people on Earth, and in 2080 – 10.4 billion. The main problem in the world is

drought, which is the result of climate change. Currently, research is being carried out on the defense mechanisms of plants during the occurrence of a stress factor and their analysis at the morphological, physiological and biochemical level. It is observed that substances of plant origin known as plant growth and development regulators or biostimulants are increasingly used. Growth regulators used when plants are still healthy, participating in the regulation of life processes at the level of a cell, organ or the entire organism, change their metabolism, which makes them stronger and more resistant to attack by a pathogen or other stress factor, and in unfavorable plant growth and development environmental conditions influence faster and more uniform emergence of plants, stimulation of growth and development, and better wintering. Obtaining high and good quality yields in plant production is primarily the ability to prevent or limit the occurrence of biotic and abiotic stresses and regenerate the damage caused by them. The aim of the article was to review research results on the impact of natural plant preparations on reducing water stress in plants. The article, based on scientific data, characterizes the types of stresses occurring in plants, their reactions to water deficit and shows how natural and synthetic plant preparations can reduce the effects of water deficit in plants. The results of current scientific research indicate that biostimulants also alleviate the symptoms of stress in horticultural crops. The positive effects of the use of protein hydrolysates prove that they can be used as agents to protect crop plants against environmental stressors, and this is of great importance in the current global climate change scenario.

Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się wzrost światowej populacji, co determinuje większe zapotrzebowanie na żywność [1]. Organizacja Narodów Zjednoczonych (ONZ) szacuje, że w 2050 r. na Ziemi będzie żyło około 9,7 mld ludzi, zaś w 2080 r. – 10,4 mld.

Niestety produkcja rolnicza często wpływa negatywnie na środowisko przyrodnicze, przyczyniając się do erozji gleby, nadmiernego wylesienia, zanieczyszczenia wód gruntowych i powierzchniowych, gleby, powietrza czy zmniejszenia bioróżnorodności. Obecnie coraz powszechniej stosowane są środki pochodzenia roślinnego określane jako regulatory wzrostu i rozwoju roślin lub biostymulatory [2]. Regulatory wzrostu zastosowane w czasie, gdy rośliny są jeszcze zdrowe, uczestnicząc w regulacji procesów życiowych na poziomie komórki, organu lub całego organizmu, zmieniają ich metabolizm, co powoduje, że są one silniejsze i odporniejsze na atak patogenu czy innego czynnika stresowego, zaś w niekorzystnych dla wzrostu i rozwoju roślin warunkach środowiska wpływają na uzyskanie szybszych i bardziej równomiernych wschodów roślin, stymulację wzrostu i rozwoju, a także lepsze ich przezimowanie. Uzyskanie wysokich i dobrej jakości plonów w produkcji roślinnej to przede wszystkim umiejętność zapobiegania lub ograniczenia występowania stresów biotycznych i abiotycznych oraz regeneracja uszkodzeń przez nie powodowanych.

Głównym problemem na świecie jest susza, będąca skutkiem zmian klimatu. Obecnie prowadzone są badania nad mechanizmami obronnymi u roślin podczas wystąpienia czynnika stresowego oraz ich analiza na poziomie morfologicznym, fizjologicznym i biochemicznym [3–4]. Według prognoz w najbliższych latach zapotrzebowanie na wodę do celów rolniczych zwiększy się średnio o 50% w regionach rozwijających się i o 16% w regionach rozwiniętych [5].

Celem artykułu był przegląd wyników badań dotyczących wpływu naturalnych preparatów roślinnych na ograniczenie stresu wodnego u roślin. W artykule opierając się na danych naukowych, scharakteryzowano rodzaje stresów występujących u roślin i ich reakcje na deficyt wody oraz wykazano, w jaki sposób naturalne i syntetyczne preparaty roślinne mogą redukować skutki deficytu wodnego u roślin.

Podział stresów u roślin

Proces wzrostu i rozwoju roślin, począwszy od zygoty do etapu zamierania organów, może odbywać się w warunkach naturalnych, na które oddziałują czynniki genetyczne i środowiskowe. Jeśli stężenie jednego lub kilku z tych czynników odbiega od optymalnego, następują zakłócenia w funkcjonowaniu rośliny, prowadzące do uszkodzenia jej struktur i zaburzenia metabolizmu, co prowadzi do obumarcia tkanek, organów lub całej rośliny [6]. Zjawiska te określa się jako reakcję stresową rośliny, która prowadzi do stanu stresowego, a źródło tych zaburzeń nazywane jest stresorem lub czynnikiem stresowym. Należy podkreślić, że reakcję stresową u rośliny może wywołać zarówno niedobór, jak i nadmiar danego czynnika. Stresor może mieć charakter pierwotny bądź wtórny i wpływać na roślinę w sposób bezpośredni lub pośredni. Ponadto działanie jednego stresora może przebiegać łącznie z innymi źródłami stresowymi, które nasilają niekorzystne warunki do wzrostu i rozwoju rośliny.

Zmiany wywołane przez stresor mogą być odwracalne lub nieodwracalne. Jest to związane z poziomem intensywności danego czynnika oraz tego, jak długo roślina była poddana działaniu tego czynnika. W pierwszym przypadku po usunięciu stresora i jego działania roślina się regeneruje i uzyskuje większą odporność na ten czynnik. Z kolei zmiany nieodwracalne po zahamowaniu oddziaływania czynnika stresowego pozostają, co skutkuje dysfunkcją zaatakowanych organów rośliny wpływającą na jej dalszy wzrost i rozwój, czasem prowadząc do obumarcia rośliny.

Kozłowska [7] ze względu na różnorodność czynników środowiskowych podaje podział stresów u roślin na abiotyczne i biotyczne. Stresami abiotycznymi są:

- promieniowanie (nadmiar, niedobór, UV),
- temperatura (zbyt wysoka, chłód, mróz),
- woda (suche powietrze, susza glebowa, zatopienie),

- gazy (niedobór O_2 , gazy wulkaniczne),
- składniki mineralne (nadmiar, niedobór, zasolenie, zachwianie równowagi, toksyny i metale ciężkie, zakwaszenie, alkalizacja),
- czynniki mechaniczne (wiatr, pokrywa śnieżna, pokrywa lodowa, zasypanie) [6].

Stresami biotycznymi zaś są:

- mikroorganizmy: wirusy, bakterie i grzyby,
- rośliny – za sprawą: pasożytnictwa, konkurencji (zagęszczenia), allelopatii,
- zwierzęta – poprzez: deptanie, zgryzanie i żerowanie, pasożytnictwo,
- antropogeniczne: zanieczyszczenie przemysłowe, środki ochrony roślin, pożar, ubicie gleby, pole elektromagnetyczne, promieniowanie jonizujące [6].

Według innych doniesień naukowych stres u roślin można podzielić na:

Oksydacyjny – polega on na zachwianiu równowagi w tkankach rośliny między produkcją reaktywnych form tlenu a ich usuwaniem przez systemy antyoksydacyjne.

Radiacyjny – występuje, jeżeli do rośliny dociera w zbyt dużej ilości promieniowanie aktywne fotosyntetyzujące i nie jest ona w stanie wykorzystać go w procesie fotosyntezy lub ma miejsce zwiększona absorpcja promieniowania krótkofalowego bez możliwości jego dalszego przekształcenia.

Termiczny – występuje, gdy na roślinę działa temperatura, której zakres wykracza poza optimum dla jej prawidłowego wzrostu i rozwoju. Stresorem może być zarówno temperatura zbyt wysoka, jak i zbyt niska, tj. przegrzanie i szok cieplny, chłód i mróz.

Wywołany niedoborem tlenu w glebie – stres ten najczęściej występuje w przypadku zalania gleby w wyniku: powodzi, długotrwałego nasiąknięcia wodą, a także pokrycia gleby lodem, kiedy dochodzi do ciśnieniowego wytłoczenia tlenu z gleby, co sprawia, że gleba staje się zbita. Rzadziej niedobór tlenu związany jest z jego zużyciem przez korzenie roślin, inne zwierzęta żyjące w glebie lub namnażanie mikroorganizmów aerobowych [8].

Wodny – spowodowany przez niedobór lub nadmiar wody w tkankach roślinnych, który najpierw prowadzi do rozchwiania podstawowych funkcji poszczególnych tkanek, a następnie do ograniczenia wzrostu i plonowania rośliny. Najczęściej stres ten definiowany jest przez niedobór wody w glebie.

Solny – wywołany przez zbyt duże stężenie łatwo rozpuszczalnych soli w roślinie, co może być efektem zarówno niekorzystnych warunków atmosferycznych czy środowiskowych na danym terenie, jak i działalnością człowieka. Większość roślin uprawnych to tzw. glikofity, czyli rośliny charakterystyczne dla siedlisk niesłonych.

- **Spowodowany zanieczyszczeniami środowiska** – stresory, które mogą oddziaływać na roślinę, występują w atmosferze, glebie i wodzie. Mogą to być toksyny pochodzenia naturalnego (emitowane na skutek aktywności wulkanicznej lub specyfiki danego gatunku rośliny), jak i zanieczyszczenia powiązane z działalnością człowieka: toksyny przemysłowe, pochodzenia rolniczego czy związane ze stosowaniem paliw kopalnych [9].

Deficyt wody

Jeżeli roślina nie ma zapewnionej optymalnej ilości wody do prawidłowego wzrostu i rozwoju, występuje u niej stres wodny. Jest on widoczny na poziomie komórkowym rośliny i ma ogromny wpływ na wszystkie jej funkcje życiowe.

Stresorem dla rośliny może być zarówno deficyt wody, który występuje najczęściej w postaci suszy, jak i jej nadmiar (zalanie). W literaturze naukowej stres wodny dotyczy najczęściej skutków deficytu wody w tkankach roślinnych, natomiast susza – warunków meteorologicznych i glebowych, w których roślina wzrasta.

Kozłowska [7] podaje, że deficyt wody w roślinach to brak ilości wody niezbędnej do optymalnego wysycenia nią tkanek roślinnych. Wielkość niedoboru (ang. *water saturation deficit* – WSD) określa się najczęściej jako stosunek aktualnej zawartości wody do jej maksymalnej zawartości [6]. Gdy wartość WSD zmniejszy się poniżej ustalonego poziomu krytycznego, który uwzględnia odporność danej rośliny na stres wodny oraz warunki środowiskowe, wtedy pojawia się stres wodny. Czynniki te są również ujęte przy obliczeniach dotyczących względnego współczynnika suszy (ang. *relative drought index* – RDI), który pokazuje faktyczny deficyt wody w tkance w stosunku do jej maksymalnego uwodnienia (WSD) względem krytycznego, progowego deficytu wody dla danego gatunku, wywołującego pierwsze widoczne uszkodzenia lub początek zaburzeń funkcji [10].

Deficyt wody wywołany suszą glebową jest jednym z najczęściej występujących stresów środowiskowych w każdej szerokości geograficznej [7]. Eyvazi [11] podaje, że jest to jeden z głównych stresów abiotycznych, negatywnie wpływających na wzrost i rozwój roślin oraz plonowanie. Susza to efekt braku lub znacznie mniejszej sumy opadów atmosferycznych w porównaniu do średniej wieloletniej.

W pierwszej fazie stresu wodnego następuje susza glebowa, czyli brak opadów atmosferycznych. Najczęściej towarzyszy jej susza atmosferyczna, charakteryzująca się wysokimi temperaturami powietrza przy jednocześnie niskiej wilgotności względnej oraz występowaniu ciepłych, wysuszających wiatrów. Badania dotyczące suszy glebowej skupiają się na pomiarach opadów atmosferycznych i zapotrze-

bowaniu roślin w wodę z uwzględnieniem ich fazy wzrostu oraz rodzaju gleby. Karczmarczyk i Nowak [10] podkreślają, że susza atmosferyczna powoduje przejściowe więdnienie roślin, zaś glebowa i fizjologiczna – trwałe.

Należy też wspomnieć o stresie wodnym związanym z brakiem możliwości pobierania wody dostępnej w glebie przez roślinę, czyli tzw. suszy fizjologicznej. Jest to spowodowane przez silne zasolenie (przenawożenie) gleby, brak tlenu, niską temperaturę lub duże zakwaszenie [10].

Przedłużające się okresy bezdeszczowe mogą wywołać suszę hydrologiczną, w przypadku której główną osią badania i monitorowania jest poziom wód powierzchniowych w rzekach i jeziorach w odniesieniu do średniej wieloletniej. Kilka lat suszy hydrologicznej z pogłębiającym się brakiem opadów i wzrostem średniej rocznej temperatury powietrza prowadzi do suszy hydrogeologicznej, która dotyka płytkich, a następnie coraz głębszych złóż wód podziemnych. Skutkami jej wystąpienia jest wysychanie studni oraz konieczność pogłębiania już istniejących lub przeprowadzania nowych odwiertów.

Zmiany w strukturach opadów atmosferycznych wpływają na bilans wodny i w wielu miejscach przyczyniają się do niedoborów wody. W Polsce, podobnie jak w innych krajach, prowadzone są badania i analizy dotyczące występowania suszy. Informacje na temat suszy rolniczej na terenie całego kraju są publikowane przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach – Państwowy Instytut Badawczy (IUNG-PIB). Stały monitoring suszy atmosferycznej i hydrologicznej prowadzi również Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB). Z kolei Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) prowadzi monitoring wód podziemnych na terenie Polski. Oprócz tego dla całego kontynentu europejskiego stworzono Europejskie Centrum Obserwacji Suszy (European Drought Observatory – EDO), które oprócz stałego monitoringu suszy prowadzi także jej prognozowanie oraz publikuje alerty suszowe.

Zapotrzebowanie na wodę zwiększa się wraz z rozwojem rośliny i osiąga maksimum w fazie największego przyrostu biomasy [10]. Bilans wodny odzwierciedla gospodarkę wodną danej rośliny w danych warunkach środowiskowych w konkretnym czasie. Wyraża się go za pomocą porównania ilości wody oddanej przez roślinę do pobranej przez nią, mierzonej na początku i na końcu badanego okresu. W praktyce stan równowagi tego bilansu, czyli sytuacja, gdy ilość utraconej wody jest taka sama jak pobranej, jest trudny do osiągnięcia. Bilans wodny rośliny podlega nieustannym wahaniom zależnym m.in. od procesów biochemicznych w roślinie, dostępności wody w glebie oraz intensywności jej poboru. W okresach długotrwałych posuch oraz w nocy rośliny nie są w stanie wyrównać bilansu wodnego [10].

Reakcje roślin na stres wodny

Obecnie największym zagrożeniem dla rolników jest susza [12]. Według GAR Special Report on Drought w 2015 r. bezpośrednie straty poniesione przez 1,5 mld ludzi w latach 1998–2017 szacowane są na 124 mld USD. Niedobór wody stanowi problem w rolnictwie, wpływając na plony, a tym samym na światową gospodarkę [13].

Odpowiednie zarządzanie zasobami wodnymi na cele rolnicze staje się dziś jednym z najważniejszych celów do osiągnięcia w obecnym i prognozowanym scenariuszu wysokiego ryzyka suszy. Szczegółowe badania nad zarządzaniem i zużyciem wody w tym sektorze mogą przynieść wymierne korzyści w postaci realnych zysków finansowych i ograniczenia strat wody w produkcji rolno-spożywczej [14].

Przejściowe lub wydłużone okresy suszy są powszechne w rolnictwie w suchych i półsuchych rejonach i będą występowały coraz częściej wraz z postępującymi zmianami klimatycznymi [15–16].

Niedostateczna ilość wody, powodująca stres wodny, prowadzi do tego, że rośliny reagują na poziomie pojedynczych komórek, tkanek i całego organizmu. Tolerancja roślin na suszę obejmuje szereg mechanizmów obronnych zarówno na poziomie morfologicznym, jak i fizjologicznym rośliny [17–18]. Na proces zmian wpływają: szybkość utraty wody, stopień odwodnienia rośliny oraz jej wrażliwość na czynnik stresowy. Reakcje roślin na stres wodny zależą od ich odporności na suszę, co jest cechą gatunkową, a nawet odmianową [19], jak również od warunków środowiskowych [20]. W warunkach niedoboru wody w podłożu występują zakłócenia w gospodarce wodnej roślin, a ich efektem są m.in. ograniczenie transpiracji i zamykanie aparatów szparkowych [21]. To z kolei ogranicza pobieranie tlenu węgla (IV) i tym samym spowalnia proces fotosyntezy [22]. Rośliny reagują na suszę aktywacją hormonów stresu i mechanizmów antyoksydacyjnych, co prowadzi do zmniejszenia biomasy roślin. Bertamini [23] podkreśla, że skutki łagodnego niedoboru wody nie są tak drastyczne jak te powodowane przez dotkliwą suszę. Łagodny deficyt wody wywołuje w roślinach najczęściej zmiany biochemiczne, które umożliwiają przystosowanie do życia w zmienionych warunkach. Drastyczny niedobór wody w glebie może prowadzić do funkcjonalnych i strukturalnych zmian w aparacie fotosyntetycznym. W efekcie ogranicza to wzrost i tym samym produktywność roślin [22, 24].

Kozłowska [7] podaje, że większość roślin uprawnych należy do mezofitów, tzn. roślin mogących znosić okresowe braki wody, które powodują zmiany metabolizmu prowadzące do uruchomienia mechanizmów dostosowawczych. Najczęściej rośliny uodporniają się na suszę przez aklimatyzację. Na przykład wytwarzanie osmolitów lub związków osmoprotekcyjnych, takich jak: prolina, betaina glicynowa i związki fenolowe, jest dobrze regulowanym mechanizmem biochemicznym zwiększającym tolerancję roślin na stres wodny. Ponadto często rośliny ograniczają straty wody

przez zmianę budowy, powierzchni i kształtu liści (mała powierzchnia, gruba kutykula) oraz zrzucanie liści. Uruchamiają również mechanizmy ograniczające transpirację i zwiększające zdolność gromadzenia wody [10]. Przejawem obronnym rośliny może być także zmieniona dystrybucja produktów fotosyntezy, które trafiają w pierwszej kolejności do młodych korzeni rośliny, zawiązków owocników oraz do stożków wzrostu. Lewak i Kopcewicz [6] stwierdzili, że jednym ze sposobów unikania odwodnienia jest przystosowanie cyklu rozwojowego rośliny do sezonowo występujących okresów suszy.

Odporność na suszę to jeden z najważniejszych czynników determinujących rozmieszczenie geograficzne gatunków, w tym roślin uprawnych. To właśnie stres wodny decydował w dużej mierze o kierunku ewolucji roślin lądowych na przestrzeni minionych epok. Dzisiaj wyznacza on kolejne kroki do realizacji trudnego zadania, którym jest wyżywienie rosnącej populacji świata w obliczu zmieniającego się klimatu. Jednym z strategicznych celów na najbliższe lata i dekady dla rolnictwa oraz gałęzi z nim związanych jest efektywne zarządzanie zasobami wodnymi na cele rolnicze. Postęp technologiczny, nauka i bioinżynieria to sprzymierzeńcy w osiąganiu kolejnych sukcesów na drodze do nowoczesnego rolnictwa opartego na najnowszej wiedzy, szacunku do ograniczonych zasobów planety, a także do zmieniającego się świata [22].

Najbardziej dotknięte suszą tereny obejmują: południowo-centralną Azję, Azję Południowo-Wschodnią, część Ameryki Południowej, Europę Środkową i południowo-wschodnią część Stanów Zjednoczonych [25].

Występowanie suszy rolniczej zależy od ewapotranspiracji i od dostępności wilgoci w glebie [26]. Na całym świecie uprawa opierająca się na opadach deszczu obejmuje 80% ogólnej powierzchni rolniczej [27]. Nawadnianie jest pierwszym rozwiązaniem w przypadku suszy rolniczej, ale nie jest ono pozbawione kosztów i problemów (zrównoważony rozwój i zasolenie). W niektórych regionach już dziś stanowi poważny problem środowiskowy oraz stwarza realne zagrożenie dla zasobów wód podziemnych wykorzystywanych dla zaspokojenia potrzeb lokalnych społeczności.

Poza sztucznym nawadnianiem strategię nastawioną na zwiększenie tolerancji upraw na deficyty wody koncentrują się na specjalizacji upraw, tradycyjnej hodowli roślin i modyfikacjach genetycznych w celu uzyskania odmian wysoce odpornych na suszę.

Bardzo znanym sposobem na zwiększenie plonów w warunkach stresu wodnego jest wprowadzanie genetycznie zmodyfikowanych upraw z tolerancją na suszę [28]. Pierwsza roślina odporna na deficyt wodny została komercyjnie wprowadzona na rynek w 2012 r. i zatwierdzona w USA i Kanadzie. Pionierem była firma, która opracowała genetycznie zmodyfikowaną odmianę kukurydzy o zwiększonej odpor-

ności na stres wodny poprzez ekspresję genów bakteryjnych. Kukurydza Drought-Gard™ jest jedyną odporną na suszę genetycznie zmodyfikowaną rośliną uprawną zatwierdzoną w wielu regionach w 2017 r., a jej nasadzenia wzrosły 15-krotnie – z 50 tys. ha w 2013 r. do 810 tys. ha w 2015 r. [29].

W cyklu wegetacyjnym każda roślina jest narażona na różne czynniki stresowe. Dostarczanie roślinom odpowiedniej dawki mikro- i makroelementów może wpływać korzystnie na ich reakcje na takie stresory. Może się to przełożyć na zdolność poszczególnych roślin do adaptacji, przetrwania i zwiększania tolerancji w określonych warunkach środowiska.

Badania naukowe potwierdzają, że wśród 94 pierwiastków chemicznych, które występują w środowisku, ponad 70 jest obecnych w biomase roślin, a tylko 17 z nich identyfikuje się jako niezbędne składniki mineralne. Wśród nich istnieją makro- i mikroelementy, które sklasyfikowano na podstawie względnej ich zawartości w roślinach. Należy podkreślić, że podział ten jest umowny, zaś poziom niektórych z nich wykracza poza przyjęte przy dokonywaniu podziału normy. Szmidt-Jaworska i Kopcewicz [30] podają, że makroelementy to pierwiastki, których zawartość w roślinie wynosi powyżej 0,1% s.m., natomiast mikroelementy – poniżej tej wartości.

Makroelementy to niezbędne dla rozwoju każdej rośliny składniki odżywcze, biorące udział w jej najważniejszych procesach życiowych, takich jak: fotosynteza, oddychanie i przewodzenie wody. Zalicza się do nich: azot (N), fosfor (P), potas (K), siarkę (S), wapń (Ca) i magnez (Mg). Ich odpowiedni poziom w komórkach roślinnych warunkuje optymalny wzrost i prawidłowy rozwój roślin. Z kolei ich niedobór lub nadmiar może wywoływać u roślin objawy stresowe, wpływając negatywnie na rozwój oraz plonowanie roślin.

Mikroelementy, określane także jako pierwiastki śladowe, uczestniczą w wielu procesach metabolicznych w roślinie, są także ważnym składnikiem enzymów odpowiedzialnych m.in. za transport elektronów czy procesy wiązania azotu w komórkach. Brak mikroelementów może sprzyjać rozwojowi wielu chorób, które prowadzą do nieprawidłowości w procesie wzrostu i rozwoju całej rośliny, w tym upośledzenia procesu fotosyntezy w komórkach. Hinsinger [31] podaje, że mikroelementy to: żelazo (Fe), miedź (Cu), cynk (Zn), mangan (Mn), molibden (Mo) i bor (B).

Azot jest budulcem podstawowych związków organicznych, dzięki czemu bierze udział we wszystkich reakcjach biochemicznych zachodzących w roślinach. Bez udziału azotu nie zachodzi produkcja chlorofilu ani proces fotosyntezy. Pierwiastek ten umożliwia prawidłowy wzrost roślin, rozwój systemu korzeniowego i uzyskanie optymalnej zawartości białka w roślinie oraz zwiększa odporność roślin na porażenie grzybicze.

Fosfor odpowiada za prawidłowy przebieg przemian bioenergetycznych i metabolicznych w komórkach roślinnych. Bierze udział w syntezie i rozpadzie związków organicznych. Jest niezbędny do przekazywania informacji genetycznej. Fosfor odpowiada za budowę i prawidłowe funkcjonowanie błon komórkowych rośliny. Epstein [32] podaje, że odpowiednia ilość tego pierwiastka wpływa na zdolności adaptacyjne roślin w okresach suszy.

Potas pełni funkcję regulacyjną w procesach metabolicznych zachodzących w roślinach (aktywuje enzymy i bierze udział w biosyntezie białek). Pierwiastek ten odpowiada też za prawidłową osmoregulację komórek oraz regulację bilansu wodnego rośliny. Potas zwiększa zakres tolerancji danej rośliny na stresory biotyczne i abiotyczne, w tym te związane z niedoborami wody.

Wapń jest ważnym budulcem struktur ścian i błon komórkowych rośliny, dzięki czemu reguluje procesy wnikania do komórek cząsteczek i mikroorganizmów. Jest także wtórnym przekaźnikiem informacji podczas procesów metabolicznych w roślinie. Niedobór tego pierwiastka obniża zdolność roślin do właściwych reakcji na czynniki stresów środowiskowych [33].

Magnez warunkuje właściwy poziom przepuszczalności błon komórkowych. Jest ważny dla prawidłowego przebiegu oddychania, fotosyntezy i syntezy kwasów nukleinowych. Dzięki jego obecności rośliny lepiej znoszą stresy abiotyczne [34].

Żelazo jest obecne w komórkach roślinnych w stosunkowo dużym stężeniu w porównaniu do innych mikroelementów. Pierwiastek ten aktywuje wiele enzymów, które pomagają w przenoszeniu elektronów. Jego działanie jest też niezbędne do prawidłowego przebiegu procesu biosyntezy chlorofilu. Okresowe niedobory żelaza sprzyjają rozwojowi chlorozy, czyli zaburzenia zdolności rośliny do fotosyntezy i wytwarzaniu chlorofilu.

Cynk jest niezbędny dla prawidłowego przebiegu procesów metabolicznych, takich jak synteza hormonów roślinnych czy biosynteza chlorofilu. Jest ważnym budulcem błon komórkowych. Pełni też rolę katalityczną i strukturalną w reakcjach enzymatycznych. Niedobór cynku objawia się zaburzonym rozwojem korzeni i liści roślin.

Mangan wykazuje właściwości oksydoredukcyjne. Wpływa na enzymy, które biorą udział w oddychaniu komórkowym, biosyntezie lipidów, aminokwasów oraz cukrów. Jego dobroczynne działanie jest widoczne także w procesie syntezy pierścieni pirolowych i budowaniu struktur chloroplastów i dlatego jest on ważnym ogniwem w prawidłowym przebiegu procesu fotosyntezy. Jego właściwy poziom w komórkach roślinnych redukuje stres oksydacyjny. Mangan bierze udział w rozkładzie wody na poziomie komórkowym, dlatego jego obecność może wspierać reakcje roślin na niedobory wody.

Bor bierze udział w budowie ścian komórkowych roślin, wpływając na ich stabilność i właściwe przenikanie substancji przez błony komórkowe. Jest to pierwiastek ważny dla rozwoju brodawek korzeniowych roślin. Reguluje też gospodarkę hormonalną roślin. Optymalny poziom boru może wspomagać rośliny w szybszym przystosowaniu się do obecności stresorów i łagodzić ich wpływ [35].

Wpływ naturalnych i syntetycznych preparatów roślinnych na redukcję skutków deficytu wodnego u roślin

We współczesnym rolnictwie kładzie się nacisk zarówno na wielkość, jak i jakość plonu. Dlatego nie tylko coraz więcej uwagi poświęca się nawożeniu i ochronie roślin, ale również stosuje liczne preparaty kwalifikowane jako regulatory rozwoju roślin lub biostymulatory, stymulatory odporności czy szczepionki bakteryjne. Analitycy szacują, że do 2025 r. globalny rynek tego typu produktów osiągnie wartość ponad 4,2 mld USD, a pogarszające się warunki klimatyczne będą działały stymulująco na dalszy dynamiczny rozwój tego sektora [36].

Według Europejskiego Konsorcjum Przemysłu Biostymulatorów „biostymulatory to produkty zawierające substancje i/lub mikroorganizmy, których funkcją po zastosowaniu do roślin lub ryzosfery jest stymulowanie naturalnych procesów w celu zwiększenia/uzyskania korzyści w zakresie pobierania składników odżywczych, wydajności składników odżywczych, tolerancji na stres abiotyczny i jakości upraw”.

Definicja biostymulatorów roślin zawarta w rozporządzeniu UE przyjętym w 2019 r. podaje, że jest to „produkt, który stymuluje procesy odżywiania roślin niezależnie od zawartości składników odżywczych w produkcie, wyłącznie w celu poprawy co najmniej jednej z następujących cech rośliny lub ryzosfery rośliny:

- (a) efektywności wykorzystania składników odżywczych;
- (b) tolerancji na stres abiotyczny;
- (c) cech jakościowych; lub
- (d) dostępności ograniczonych składników odżywczych w glebie lub ryzosferze” [37].

Szeroki zakres pochodzenia surowców wykorzystywanych do produkcji biostymulatorów powoduje, że mogą one występować w postaci stałej, płynnej a nawet gazowej. To z kolei wpływa na klasyfikację biostymulatorów według różnych kryteriów. Du Jardin [38] wprowadził podział biostymulatorów na:

- 1) substancje humusowe,
- 2) złożone materiały organiczne,
- 3) korzystne pierwiastki chemiczne,

- 4) sole nieorganiczne,
- 5) ekstrakty z wodorostów,
- 6) pochodne chityny i chitozanu,
- 7) antytranspiranty,
- 8) wolne aminokwasy i inne substancje zawierające azot,
- 9) mikroorganizmy.

Mimo że biostymulatory nie zastępują nawozów, mogą istotnie zwiększyć wydajność upraw poprzez lepsze wykorzystanie przez rośliny składników odżywczych dostarczanych przez nawozy [39].

Ze względu na ukierunkowane działanie wśród biostymulatorów można wyróżnić:

Hormony wzrostu roślin – substancje pochodzenia naturalnego lub syntetycznego, które pobudzają rośliny do wzmożonego wzrostu, co może skutkować lepszą ich zdolnością do radzenia sobie z czynnikami stresu abiotycznego. Przykładem mogą być auksyny, cytokininy i gibereliny [40].

Kwas salicylowy, który jest dobrym stymulantem obrony roślinnej w warunkach stresu abiotycznego [38].

Kwas abscysynowy (ABA) – to substancja pochodzenia roślinnego, która odpowiada za regulację wewnętrznej gospodarki organizmu roślinnego w warunkach suszy. Badania nad tym hormonem potwierdzają pozytywne wyniki w zakresie zwiększania tolerancji roślin poddanych preparatom zawierającym ABA na niedobór wody [41].

Ekstrakty roślinne – są to wyciągi z glonów morskich, wodorostów czy ekstrakty pochodzenia ziołowego. Stirk [42] podkreśla, że naturalne biopreparaty roślinne wpływają korzystnie na kwitnienie, wzrost roślin, zawiązywanie owoców, wydajność upraw i efektywność wykorzystania składników odżywczych oraz pomagają roślinom przetrwać w warunkach stresowych.

Aminokwasy, które regulują procesy przystosowawcze w roślinach, dzięki czemu wspomagają ich odporność na czynniki stresowe. Przykładem mogą być: prolina, glutaminian i arginina.

Biostymulatory mineralne, które pomagają wzmocnić strukturę komórek roślinnych i regulują najważniejsze procesy metaboliczne, co ma znaczenie w przypadku niekorzystnych warunków zewnętrznych podczas wzrostu i rozwoju roślin. Są to: krzem, bor oraz żelazo [43].

Zainteresowanie naukowców wzbudza również chitozan, fulwokwasy oraz mikroorganizmy, które wykazują potencjalny wpływ na budowanie odporności i wzrost roślin uprawnych [44].

Ekstrakty z wodorostów zajmują znaczącą pozycję na rynku biostymulatorów, stanowiąc najszybciej rozwijającą się kategorię produktów biostymulujących [45]. Korzystny wpływ ekstraktów z wodorostów na wzrost rośliny został zbada-ny przez Chaskiego [46], który wykazał ich pozytywny wpływ na rozwój roślin w warunkach stresowych. Biostymulatory zawierające ekstrakty z wodorostów nie są kategorią jednorodną. Różnią się one w zależności od gatunku wodorostów użytych do ich produkcji (tj. brązowe, zielone lub czerwone), przestrzenno-cza-sowego źródła surowca wodorostów i procesu stosowanego do ich produkcji czy ekstrakcji [44, 47]. Większość takich biostymulatorów jest wytwarzana z gatun-ków alg brunatnych. *Ascophyllum nodosum* Le Jol jest gatunkiem dominującym ze względu na korzystny wpływ na plonowanie upraw [48]. Również aplikacja *Asco-phyllum nodosum ex tract* (ANE) zwiększała tolerancję traw i upraw na stres wy-wołany suszą [49–50].

Substancje biostymulujące mogą pochodzić z różnych źródeł (np. być efektem przetwarzania produktów ubocznych produkcji żywności), ich zastosowanie w rol-nictwie może również ukierunkować ten sektor na rozwój gospodarki w obiegu zamkniętym, a zatem może też zwiększyć wartość dodaną poszczególnych upraw. Dlatego propagatorzy zrównoważonego rolnictwa zwracają szczególną uwagę na wykorzystanie korzystnych mikroorganizmów, np. grzybów, jako kluczowych produktów biostymulujących. Grzyby wykazują zdolność do wchodzenia w in-terakcje z roślinami poprzez ich system korzeniowy zarówno w formie symbiozy mutualistycznej, jak i pasożytnictwa. Grzyby mikoryzowe potrafią wytworzyć sym-biozę z ponad 90% gatunków roślin i dzięki temu znajdują szerokie zastosowanie w ogrodnictwie.

Biostymulatory coraz częściej są przedstawiane jako jedna z potencjalnych, nowoczesnych dróg wsparcia gospodarki wodnej [51], wpływającej na ogranicza-nie strat wydajności pól uprawnych poddawanych stresowi suszy. Ich stosowanie w rolnictwie jest zgodne z aktualną europejską filozofią ekologiczną [52], ponieważ większość stosowanych substancji pochodzi ze źródeł naturalnych i łatwo ulega roz-kładowi w glebie [53].

Zastosowanie biostymulatorów w agrotechnice rolniczej wpływa na poprawę odporności roślin na czynniki stresowe, takie jak: niedobór lub nadmiar wody, ekstremalne temperatury, skażenie związkami chemicznymi i inne stresory pocho-dzenia nieorganicznego. Biostymulatory mogą pochodzić ze źródeł naturalnych, jak i syntetycznych. Ich oddziaływanie na rośliny to przede wszystkim stymulacja procesów fizjologicznych, która pozwala roślinie przetrwać w trudnych warunkach środowiskowych. Badania naukowe potwierdzają korzystny wpływ biostymulato-rów na tolerancję roślin na szeroki zakres biotycznych i abiotycznych czynników stresowych. W związku z tym mogą być one stosowane do łagodzenia niekorzyst-

nych skutków zmian klimatycznych i do zwiększenia odporności upraw na stresory abiotyczne. Biostymulatory stanowią dzisiaj duże wsparcie dla technologii produkcji w przypadku wielu rodzajów upraw rolniczych [54].

García-García i in. [51] badali wpływ glicyny betainy (GB) i kwasu L-pirolutaminowego (PG) na łagodzenie stresu związanego z suszą u kukurydzy (*Zea mays* L.). Glicyna betaina to rozpuszczalna substancja, która gromadzi się w wielu roślinach. Najczęściej stosuje się ją do zwiększania tolerancji roślin na stresy abiotyczne, w tym związane z zamarzaniem, zasoleniem i suszą. Glicynę betainę stosuje się dolistnie, dzięki temu jest szybko wchłaniana, a następnie translokowana do poszczególnych narządów roślinnych. Substancja ta wpływa korzystnie na zwiększenie obrony antyoksydacyjnej, powoduje wzmożoną wymianę gazów liściowych i wzrost rośliny, pomimo działania czynników stresowych. Z kolei kwas L-pirolutaminowy jest zaliczany do aminokwasów nieproteinogennych, wykazujących właściwości biostymulujące.

Wyniki badań Jiménez-Arias i Alby [55] wykazały zwiększenie tolerancji roślin na suszę w warunkach działania stresu związanego z niedoborem wody. Zastosowanie biostymulatora do sadzonek poddanych czynnikowi stresogennemu wpływało na zmniejszenie stopnia redukcji wzrostu badanych sadzonek średnio od 65 do 85%. Zastosowanie glicyny wykazało jednak wyraźną zależność od stężenia. Najkorzystniejsze stężenie (0,1 mM) wpłynęło na zwiększenie tolerancji na niedobór wody średnio o 77%. Rośliny poddane działaniu kwasu L-pirolutaminowego potrzebowały dawek o większym stężeniu (1 mM), aby wytworzyć tę tolerancję na poziomie 80% [55].

Poliaminy (PA) są naturalnymi związkami wywołującymi korzystne reakcje u roślin poddanych stresowi z powodu suszy. Badania Jimnez-Arias [56] dotyczyły kukurydzy, uprawianej w warunkach dobrego nawodnienia (WW) lub deficytu wody (WD), na którą aplikowano biostymulatory takie jak: putrescyna (Put) i spermidyna (Spd). W trakcie doświadczenia zaobserwowano różne mechanizmy działania Put i Spd w odniesieniu do uprawy kukurydzy oraz poprawę bilansu wodnego roślin. Zastosowanie Put poprawiło jakość i wielkość plonu w warunkach dobrego nawodnienia, a Spd – w warunkach deficytu wody. Poliaminy zwiększały zawartość węglowodanów, podczas gdy udział w zawartości białka zmieniał się w zależności od interakcji między związkiem a warunkami wzrostu. Na zawartość składników mineralnych w ziarnie duży wpływ miały również warunki wodne i zastosowanie poliamin, przy czym najkorzystniejsze wyniki uzyskano po zastosowaniu Spd, kończąc na mące bogatszej w Zn, Cu i Ca, które są powszechnie uznawane za ważne dla zdrowia ludzkiego. Badania potwierdzają, że wprowadzenie poliamin do zabiegów agrotechnicznych może być skuteczną metodą biofortyfikacji roślin uprawnych [58].

Jiménez-Arias [57] przedstawiła wykaz biostymulatorów, stosowanych, gdy na roślinę działa abiotyczny czynnik stresowy. Rabêlo [59] stwierdził, że tylko dolistne zastosowanie mieszanych pochodnych chitozanu zwiększa wydajność ziarna – średnio o 35%. Shemi [60] podał dolistnie mieszaną glicyny, betainy i kwasu salicylowego w celu zwiększenia tolerancji kukurydzy na stres wynikający z suszy. W tym przypadku dolistna aplikacja mieszanych pochodnych chitozanu [59], zwiększana wraz z rosnącym stresem, będącym efektem suszy, wpływała na wzrost plonu ziarna odpowiednio o 40,52%. Inne doświadczenia z kukurydzą [60] dotyczyły możliwości zastosowania dwóch biostymulatorów: glicyny betainy i kwasu L-pyroglutaminowego przez fertirrygację w celu radzenia sobie ze stresem suszy. Dzięki aplikacji tych substancji plon ziarna zwiększył się średnio o 40,52% [56].

Rabêlo, Jiménez-Arias i Shemi [57–60] badali wpływ glicyny betainy i kwasu L-pyroglutaminowego na stan zdrowotny korzeni roślin uprawnych. Autorzy stwierdzili, że dodanie biostymulatorów do systemu nawadniania nawożącemu na polach kukurydzy zmniejszyło koszty zabiegów agrotechnicznych. Ponadto, po optymalizacji dawek, badanie wykazało, że 0,01 mM glicyny i 1 mM kwasu L-pyroglutaminowego zmniejszyły straty plonu, gdy zastosowano o 20% mniej wody do nawadniania. Zabiegi te poprawiły efektywność wykorzystania wody [57–60].

Pomidor (*Solanum lycopersicum* L.) jest szczególnie wrażliwy na stresy środowiskowe, w tym suszę. Reakcja pomidorów na stres wodny zależy od kilku czynników, w tym czasu trwania i dotkliwości okresu suszy, a także od jego wrodzonych mechanizmów tolerancji [61].

Colla [62] wykazał korzystny wpływ biostymulatorów i nawadniania deficytowego na charakterystykę biochemiczną i właściwości bioaktywne owoców pomidora. System nawadniania i zastosowanie biostymulatora wpłynęły również na skład wolnych cukrów, podczas gdy zawartość kwasów organicznych i tokoferolu była zależna od zabiegu, w którym zastosowano rafinozę (TWW+). Zawartość kwasów tłuszczowych (palmitynowego, linolowego i oleinowego) różniła się w zależności od zastosowanego zabiegu, podczas gdy najwyższe wartości β -karotenu i likopenu odnotowano odpowiednio dla zabiegów CW– (sacharoza) i NW+ (fruktoza). W przypadku aktywności przeciwutleniającej obróbka TWW+ (rafinoza) wykazała wysoką aktywność dla obu testowanych próbek (TBARS i OxHLIA), podczas gdy większość badanych ekstraktów wykazała niższą aktywność przeciwbakteryjną przeciwko testowanym bakteriom w porównaniu z próbkami kontrolnymi w warunkach normalnego nawadniania (W+) i nawadniania z niedoborem wody (W–). Próbkę uzyskaną z zabiegów CW+ (sacharoza) wykazały wyższą aktywność przeciwgrzybiczą (wartości MIC) niż próbki kontrolne [63]. Badania dowiodły, że pomimo pozytywnych efektów dla określonych kombinacji biostymulatorów i nawadniania niezbędne będą dalsze szczegółowe badania w celu lepszego zidentyfikowania me-

chanizmów działania i procesów fizjologicznych, zanim testowane biostymulatory będą wykorzystane w powszechnej uprawie pomidorów [36]. Wprowadzenie sztucznego nawadniania deficytowego dało obiecujące wyniki w zrównoważonym zarządzaniu zasobami naturalnymi w uprawie pomidorów, podczas gdy jego połączenie z biostymulatorami można uznać za efektywną i przyszłościową metodę oszczędzania wody bez negatywnych skutków dla jakości owoców pomidora [64].

Biostymulatory i ich wpływ na rośliny poddane stresowi wodnemu zbadano także pod kątem oddziaływania na wzrost i rozwój siewek pomidora. Na potrzeby badań stworzono warunki łagodnego niedoboru wodnego dla sadzonek pomidora. W toku doświadczenia wykazano znaczące zmniejszenie wzrostu sadzonek i RGR (25%) po 7-dniowym eksperymencie. Parametry wymiany gazowej (P_n , G_s i E) miały znacznie niższe wartości (o 30–50%) w stosunku do siewek kontrolnych. Metabolit związany ze stresem, ABA, wykazywał znaczną akumulację w sadzonkach pomidorów (24 h), co było zgodne z ekspresją genu *SINCE2*. Analiza wyników wykazała, że poziom proliny był dwukrotnie wyższy w sadzonkach poddanych działaniu niedoboru wody i pozostał na tym poziomie do końca badań. Jednak całkowita zawartość węglowodanów była znacznie niższa w sadzonkach poddanych działaniu niedoboru wody. Analiza jakościowa i ilościowa wykazała, że zastosowanie zmiennej „akumulacji biomasy siewek” może uprościć metodologię badania. W tym przypadku testowano 12 różnych biostymulatorów, a wprowadzenie tego uproszczenia spowodowało, że wszystkie one wykazały wyższą akumulację biomasy w siewkach poddanych obróbce niż w sadzonkach niepoddanych obróbce w warunkach deficytu wody. Wśród zastosowanych biostymulatorów najskuteczniejszymi były: putrescyna, spermina i spermidyna [55].

Na roślinach pomidora przeprowadzono także badania dotyczące biostymulatorów Seed+ i Crop+ w różnych warunkach wodnych. Doświadczenie założono w szklarni, z dwoma terminami stosowania biostymulatorów, tj. w czasie kwitnienia i owocowania, w dwóch warunkach wodnych gleby (50 i 100% pojemności wodnej gleby) i przy użyciu sześciu biostymulatorów (kontrola; Seed+; Seed+ + Crop+ 1x; Seed+ + Crop+ 2x; Crop+ 1x; + Crop+ 2x). Biostymulatory Seed+ i Crop+ zwiększyły wydajność kwantową fotosystemu II (F_v/F_m), niezależnie od czasu aplikacji i stanu wody w glebie. Biostymulatory Seed+ + Crop+ 2x i Crop+ 2x wyróżniały się w okresie przedpołudniowym, ze średnim F_v/F_m wynoszącym 0,813 w badanych warunkach. Najwyższą aktywność SOD zanotowano przy użyciu biostymulatora Crop+ 2x w okresie owocowania i przy deficycie wody. W przypadku POD w warunkach deficytu wody najlepsze wyniki uzyskano z biostymulatorami Seed+ + Crop+ 2x, Crop+ 1x i Crop+ 2x w okresie kwitnienia. Badanie nad biostymulatorami Seed+ i Crop+ może przynieść korzystne skutki w łagodzeniu szkód spowodowanych deficytem wody w uprawie pomidorów [61].

W eksperymencie polowym przeprowadzonym na roślinach pomidora badano wpływ biostymulatora zawierającego betainę glicynową (CycoFlow) aplikowanego w warunkach stresu wodnego. Badania wykazały mniejszy plon u roślin poddanych stresowi suszy w porównaniu z roślinami nawadnianymi. Po aplikacji biostymulatora zarówno rośliny dobrze nawadniane, jak i te poddane stresowi wodnemu charakteryzowały się lepszym plonowaniem. Obecność betainy glicynowej w CycoFlow poprawiła zakres tolerancji roślin pomidora na niedobór wody. Wcześniej udowodniono, że betaina glicynowa stosowana egzogenie przez aplikację dolistną znacząco poprawiła przewodnictwo szparkowe roślin pomidora uprawianych w warunkach optymalnego nawodnienia, niedoboru wody lub zasolenia [65]. W badaniu tym zaobserwowano wyższą przewodność szparkową u roślin pomidora traktowanych biostymulatorem. Wolne aminokwasy obecne w biostymulatorze mogły działać jako cząsteczki sygnałowe i promować endogenną biosyntezę fitohormonów, stymulując w ten sposób wzrost, a także zawiązywanie owoców [66]. Po zastosowaniu CycoFlow odnotowano także wyższą żywotność pyłku kwiatowego, co pozwoliło roślinom poddanym stresowi wodnemu uzyskać poziom żywotności pyłku podobny do tego występującego w roślinach dobrze nawodnionych. Osiągnięty poziom może wynikać z wysokiego stężenia proliny obecnej w biostymulatorze, czyli aminokwasu, którego naturalna zawartość w organach kwiatowych jest 10 razy wyższa w porównaniu do liści. Ponadto należy zaznaczyć, że prolina sprzyja translokacji składników odżywczych w kierunku rozwijających się kwiatów [67].

Jak już wcześniej wspomniano, typową reakcją na stres oksydacyjny w warunkach suszy jest zmniejszenie zawartości chlorofilu. Degradacja chlorofilu i/lub niedobór jego syntezy jest ściśle powiązany z poddawaniem rośliny stresowi wodnemu [66]. Zdolność do utrzymania optymalnej zawartości chlorofilu w sytuacjach niedoboru wody może być kluczową cechą determinującą tolerancję na suszę w uprawie pomidorów. Zastosowanie biostymulatora CycloFlow przyniosło pozytywny skutek dla aktywności przeciwutleniaczy w liściach pomidora uprawianego w warunkach ograniczonej dostępności wody. Badania wykazały, że ogólna zawartość karotenoidów i likopenu była wyższa w owocach traktowanych biostymulatorem w porównaniu do owoców na obiektach kontrolnych w dobrze nawodnionych roślinach. Korzystny wpływ CycoFlow na związki fitochemiczne (tj. likopen) może być wynikiem aktywacji określonych mechanizmów molekularnych i fizjologicznych związanych z metabolizmem azotu [68]. Wyższa produkcja i akumulacja likopenu przy zastosowaniu biostymulatora może być postrzegana jako wartość dodana wspierająca zdrowie ludzi [69].

Goñi [70] badała wpływ biostymulatorów z grupy *Ascochyllumnodosum* (ANE) na zwiększanie tolerancji upraw pomidora na stres suszy. Badania wykazały, że bio-

stymulatory ANE zapewniły różne poziomy tolerancji dla roślin pomidora poddanych niedoborom wody. Poziom tolerancji na suszę był związany ze zmianami stężenia osmolitów. Zaobserwowano także wyraźne różnice fenotypowe między formacjami ANE pod koniec okresu suszy, przy czym ANE A utrzymywała lepszy wzrost roślin bez objawów niedoboru wody. Fizjologiczne pomiary osmolitów potwierdzały metaboliczne/fizjologiczne podstawy tego efektu. Transkrypcja genów i analiza proteomiczna białek chroniących przed stresem wspierały potencjalny sposób działania dla zapewnienia tej tolerancji. Badanie wykazało, że chociaż istniały podobieństwa między dwoma ANE pod względem ich wpływu na mierzone markery, zakres tolerancji był różny, przy czym ANE A zapewnił większą tolerancję niż ANE C. Podsumowując, należy stwierdzić, iż mimo że wszystkie biostymulatory ANE zostały wyprodukowane z tego samego surowca, ich zdolność do utrzymania produktywności upraw podczas i po ustaniu działania niedoboru wody nie była taka sama [70].

Stres wodny negatywnie wpływa także na sadzonki cząbrzu. Warunki umiarkowanego i silnego niedoboru wody doprowadziły do zmniejszenia produkcji suchej masy o 11% i 33%. Dolistna aplikacja aminokwasów zwiększyła ilość suchej masy o 22%, zawartość olejku eterycznego o 31% i plon cząbrzu o 57% w porównaniu z zabiegiem bez nawożenia biostymulatorami. Zastosowanie aminokwasów poprawiło jakość olejku eterycznego cząbrzu: zwiększyła się zawartość składników olejku eterycznego, w tym karwakrolu, gamma-terpinenu, alfa-terpinenu i p-cymenu. Dolistne stosowanie aminokwasów może skutecznie zwiększać tolerancję roślin na stres wodny, jednocześnie zwiększając ilość i podnosząc jakość olejku eterycznego u roślin leczniczych i aromatycznych [71].

Podsumowanie

Brak wody i zwiększona konkurencja o jej zasoby między rolnictwem a innymi sektorami wymagają poszukiwania alternatywnych i nowoczesnych strategii zarządzania uprawami, które mogą pozwolić na oszczędzanie wody do nawadniania i utrzymywać zadowalający poziom produkcji roślinnej. Jedną z nowych metod, które można wykorzystać do poprawy reakcji roślin na stresory środowiskowe, jest zastosowanie biostymulatorów. Dotychczasowe badania naukowe wskazują na korzystny wpływ takich substancji na odżywianie i wzrost oraz rozwój roślin. Kluczowa rola biostymulatorów podkreśla znaczenie poszerzenia wiedzy na temat ich funkcji fizjologicznych, które wciąż pozostają niejasne i stanowią szeroki obszar do prowadzenia dalszych prac naukowych. Wyniki dotychczasowych badań naukowych wskazują, że biostymulatory łagodzą objawy stresu również w uprawach ogrodniczych. Pozytywne skutki zastosowania hydrolizatów białkowych do-

wodzą, że mogą być one zastosowane jako środki chroniące rośliny uprawne przed stresorami środowiskowymi, a to ma ogromne znaczenie w obecnym globalnym scenariuszu zmian klimatycznych.

Biostymulatory w ostatnich latach stają się realną korzyścią dla rolnictwa, ponieważ stanowią ekologiczną alternatywę dla tradycyjnych środków ochrony roślin, zyskując coraz większą akceptację rolników, którzy doceniają ich wpływ na zwiększenie tolerancji roślin na stresy biotyczne i abiotyczne.

Literatura

- [1] Searchinger T., Hanson C., Ranganathan J., Lipinski B., Waite R., Winterbottom R., Dinshaw A., Heimlich R., Installment 1 of “Creating a Sustainable Food Future” The Great Balancing Act, World Resources Institute, Washington 2013.
- [2] Povero G., Mejia J.F., Di Tommaso D., Piaggese A., Warrior P.A., Systematic approach to discover and characterize natural plant biostimulants, *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7, s. 435.
- [3] Waskiewicz A., Gładysz O., Beszterda M., Goliński P., Water stress and vegetable crops, *Water Stress Crop Plants Sustain, Approach*, 2016, 2, s. 393–411.
- [4] Giordano M., Petropoulos S.A., Response and Defence Mechanisms of Vegetable Crops against Drought, Heat and Salinity Stress, *Agriculture*, 2021, 11, s. 463.
- [5] Sierra S., Borges A.A., Herrera A.J., Luis J.C., New Biostimulants Screening Method for Crop Seedlings under Water Deficit Stress, *Agronomy* 2022, 12, 728. DOI: [org/10.3390/agronomy12030728](https://doi.org/10.3390/agronomy12030728).
- [6] Kopcewicz J., Lewak S., *Fizjologia roślin*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [7] *Fizjologia roślin. Od teorii do nauk stosowanych*, (red.) M. Kozłowska M., PWRiL, Poznań 2007.
- [8] Blum A. Drought Resistance, Water-Use Efficiency, and Yield Potential – Are They Compatible, Dissonant, or Mutually Exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*, 2005, 56, 1159–1168.
- [9] Bray E., Bailey-Serres J., Weretlińsk E., Responses to Abiotic Stresses, [w:] *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*, (red.) B. Buchanan, W. Gruissem, R. Jones, American Society of Plant Physiology, 2000, s. 1158–1203.
- [10] Karczmarczyk S., Nowak L., *Nawadnianie roślin*, PWRiL, Poznań 2006.
- [11] Eyvaz M., *Drought: effects and management*, IntechOpen, Londyn 2022.
- [12] He Y., Fang J., Xu W., Shi P., Substantial Increase of Compound Droughts and Heatwaves in Wheat Growing Seasons Worldwide, *International Journal of Climatology*, 2021, 10(42), s. 5038–5054.
- [13] Dolan F., Lamontagne J., Link R., Hejazi M., Reed P., Edmonds J., Evaluating the Economic Impact of Water Scarcity in a Changing World, *Nature Communications*, 2021, 12, s. 1915.

- [14] Lopez-Nicolas A., Pulido-Velazquez M., Macian-Sorribes H., Economic Risk Assessment of Drought Impacts on Irrigated Agriculture, *Journal of Hydrology*, 2017, 550, s. 580–589.
- [15] Barnabas B., Jager K., Feher A., The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals, *Plant, Cell & Environment*, 2008, 31, s. 11–38.
- [16] Costa J.M., Ortuño M.F., Chaves M.M., Deficit irrigation as a strategy to save water: Physiology and potential application to horticulture, *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49, s. 1421–1434.
- [17] Wilkinson S., Davies W.J., Drought, ozone, ABA and ethylene: new insights from cell to plant to community, *Plant, Cell & Environment*, 2010, 33(4), s. 510–525. doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02052.x.
- [18] Fang Y., Xiong L., General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants, *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2015, 72, s. 673–689. doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0.
- [19] Roohi E., Tahmasebi-Sarvestani Z., Modarres-Sanavy S.A.M., Siosemardeh A., Comparative study on the effect of soil water stress on photosynthetic function of triticale, bread wheat, and barley, *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15, s. 215–228.
- [20] Galon L., Concenço G., Ferreira E.A., Aspiázú I., da Silva A.F., Giacobbo C.L., Andres A., Influence of biotic and abiotic stress factors on physiological traits of sugarcane varieties, [w:] *Photosynthesis*, (red.) Z. Dubinsky, InTech, Rijeka, Croatia 2013.
- [21] Jastrzębska M., Kostrzewska M.K., Wanic M., Wpływ deficytu wody i interakcji międzygatunkowych na wybrane parametry fizjologiczne roślin jęczmienia jarego i koniżyny czerwonej, *Fragmenta Agronomica*, 2016, 33(4), s. 44–59.
- [22] Akıncı Ş., Lösel D.M., Plant water-stress response mechanisms, [w:] *Water Stress*, (red.) I.Md.M. Rahman, InTech, Rijeka, Croatia, 2012.
- [23] Bertamini M., Zulini L., Muthuchelian K., Nedunchezian N., Effect of water deficit on photosynthetic and other physiological responses in grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Riesling) plants, *Photosynthetica*, 2006, 44, s. 151–154.
- [24] Lawlor D.W., Tezara W., Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in waterdeficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes, *Annals of Botany*, 2009, 103, s. 561–579.
- [25] Carrão H., Naumann G., Barbosa P., Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-nationalestimates of hazard, exposure, and vulnerability, *Global Environmental Change*, 2016, 39, s. 108–124.
- [26] Wilhite D.A., Quantification of agricultural drought for effective drought mitigation and preparedness, Key issues and challenges, [w:] (red.) M.V.K. Sivakumar, R.P. Mutha, D.A. Wilhite, D.A. Wood, *Agricultural Drought Indices: Proceedings of an Expert Meeting*, June 2–4, 2010, Murcia, Spain, World Meteorological Organization, Geneva 2011, s. 13–21.
- [27] Monneveux P., Okono A., Ribaut J.M., Facing the challenges of global agriculture today: what can we do about drought?, *Frontiers Physiology*, 2013, 4, s. 289. doi.org/10.3389/fphys.2013.00289.

- [28] Reguera M., Peleg Z., Blumwald E., Targeting metabolic pathways for genetic engineering abiotic stress-tolerance in crops, *Biochimica Biophysica Acta-Gene Regulatory Mechanism*, 2012, 1819(2), s. 186–194. doi.org/10.1016/j.bbagr.2011.08.005.
- [29] James C., 20th Anniversary (1996 to 2015) of the Global Commercialization of Biotech Crops and Biotech Crop Highlights in 2015, ISAAA Brief nr 51, ISAAA, Ithaca, NY, 2015.
- [30] Szmidt-Jaworska A., Kopcewicz J., *Fizjologia roślin*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2021, s. 191–194.
- [31] Hinsinger P., Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review, *Plant and Soil*, 2001, 237(2), s. 173–195.
- [32] Epstein E., Bloom A.J., *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*, Sinauer Associates Inc. Sunderland, 2005.
- [33] Gupta N., Gaurav S.S., Kumar A., Molecular Basis of Aluminium Toxicity in Plants A Review, *American Journal of Plant Sciences*, 2013, 4, s. 21–37.
- [34] Taiz L., Zeiger E., *Plant Physiology*, Sinauer Associates Inc., Sunderland 2010.
- [35] Marschner H., *Mineral Nutrition of Higher Plants*, Academic Press, Australia, 2012.
- [36] Van Oosten M.J., Pepe O., De Pascale S., Silletti S., Maggio A., The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants, *Chemical Biological Technologies Agriculture*, 2017, 4, s. 5.
- [37] Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019.
- [38] Du Jardin P., Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation, *Scientia Horticulturae*, 2015, 16, s. 3–14.
- [39] Mackiewicz-Walec E., Olszewska M., Biostimulants in the Production of Forage Grasses and Turfgrasses, *Agriculture*, 2023, 13, s. 1796. doi.org/10.3390/agriculture13091796.
- [40] Kulkarni M., Nikam T., Biostimulants: Definition, classification and role in horticulture, *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2019, 8(2), s. 245–252.
- [41] Colla G., Rouphael Y., Canaguier R., Svecova E., Cardarelli M., Bonini P., Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis, *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5, s. 448.
- [42] Stirk W.A., Tarkowska D., Turečová V., Strnad M., Van Staden J., Absciscic acid, gibberellins and brassinosteroids in Kelpak, a commercial seaweed extract made from *Ecklonia maxima*, *Journal of Applied Phycology*, 2014, 26(1), s. 561–567.
- [43] Bulgari R., Franzoni G., Ferrante A., Biostimulants and crop responses: a review, *Biological Agriculture & Horticulture*, 2015, 31(1), s. 1–17.
- [44] Sharma H.S.S., Fleming C., Selby C., Suppression of water stress-induced absciscic acid accumulation by exopolysaccharides from *Piriformospora indica* is dependent on pattern recognition receptors and mitogen-activated protein kinases, *Plant Physiology*, 2014, 164(4), s. 1686–1698.
- [45] Calvo P., Nelson L., Kloepper J.W., Agricultural uses of plant biostimulants, *Plant and Soil*, 2014, 383(1–2), s. 3–41.

- [46] Fernandes Â., Chaski C., Pereira C., Kostić M., Roupheal Y., Soković M., Barros L., Petropoulos S.A., Water Stress Alleviation Effects of Biostimulants on Greenhouse-Grown Tomato Fruit, *Horticulturae*, 2022, 8, s. 645. doi.org/10.3390/horticulturae8070645.
- [47] Khan W., Rayirath U.P., Subramanian S., Jithesh M.N., Rayorath P., Hodges D.M., Critchley A., Craigie J., Norrie J., Prithiviraj B., Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development, *Journal Plant Growth Regulation*, 2009, 28, s. 386–399. doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x.
- [48] Craigie J., Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture, *Journal Applied Phycology*, 2011, 23, s. 371–393. doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4.
- [49] Spann T.M., Little H.A., Applications of a commercial extract of the brown sea-weed *Ascophyllum nodosum* increases drought tolerance in container-grown ‘Hamlin’ sweet orange nursery trees, *Hortscience*, 2011, 46(4), s. 577–582.
- [50] Elansary H.O., Skalicka-Woźniak K., King I.W., Enhancing stress growth traits as well as phytochemical and antioxidant contents of *Spiraea* and *Pittosporum* under seaweed extract treatments, *Plant Physiology Biochemistry*, 2016, 105, s. 310–320. doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.024.
- [51] García-García A.L., García-Machado F.J., Borges A.A., Morales-Sierra S., Boto A., Jiménez-Arias D., Pure Organic Active Compounds Against Abiotic Stress: A Biostimulant Overview, *Frontiers Plant Science* 2020, 11, s. 1839.
- [52] Rai N., Rai S.P., Sarma B.K., Prospects for Abiotic Stress Tolerance in Crops Utilizing Phyto- and Bio-Stimulants, *Frontiers Sustainable Food Systems*, 2021, 5, s. 754–853. doi: 10.3389/fsufs.2021.754853.
- [53] Sible C.N., Seebauer J.R., Below F.E., Plant Biostimulants: A Categorical Review, Their Implications for Row Crop Production, and Relation to Soil Health Indicators, *Agro-nomy*, 2021, 11, s. 1297.
- [54] Sikorska A., Gugała M., Biostymulatory – moda czy potrzeba?, *Mazowiecki Ośrodek Doradztwa Rolniczego*, Siedlce, 2017.
- [55] Hernandez A.E., Jiménez-Arias D., Morales-Sierra S., Borges A.A., De Diego N., Addressing the contribution of small molecule-based biostimulants to the biofortification of maize in a water restriction scenario, *Frontiers in Plant Science*, 13, 944066, 2022.
- [56] Jiménez-Arias D., García-Machado F.J., Morales-Sierra S., Luis J.C., Suarez E., Hernández M., Valdés F., Borges A.A., Lettuce Plants Treated with L-Pyroglutamic Acid Increase Yield under Water Deficit Stress, *Environmental Experimental Botany*, 2019, 158, s. 215–222.
- [57] Jiménez-Arias D., García-Machado F.J., Morales-Sierra S., Suárez E., Pérez J.A., Luis J.C., Garrido-Orduña C., Herrera A.J., Valdés F., Sandalio L.M., Borges A.A., Mena-dione sodium bisulphite (MSB): Beyond seed-soaking. Root pretreatment with MSB primes salt stress tolerance in tomato plants, *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 157, s. 161–170. doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.10.009.

- [58] Jiménez-Arias D., Morales-Sierra S., Borges A.A., Díaz D.D., Biostimulant Nanoencapsulation: The New Keystone to Fight Hunger, *Journal Agricultural Food Chemistry*, 2020, 68, s. 7083–7085.
- [59] Rabêlo V.M., Magalhães P.C., Bressanin L.A., Carvalho D.T., dos Reis C.O., Karam D., Doriguetto A.C., dos Santos M.H., Santos Filho P.R.d.S., de Souza T.C., The Foliar Application of a Mixture of Semisynthetic Chitosan Derivatives Induces Tolerance to Water Deficit in Maize, Improving the Antioxidant System and Increasing Photosynthesis and Grain Yield, *Scientific Reports*, 2019, 9, s. 8164.
- [60] Shemi R., Wang R., Gheith E.S.M.S., Hussain H.A., Hussain S., Irfan M., Cholidah L., Zhang K., Zhang S., Wang L., Effects of Salicylic Acid, Zinc and Glycine Betaine on Morpho-Physiological Growth and Yield of Maize under Drought Stress, *Scientific Reports*, 2021, 11, s. 3195.
- [61] Peripolli M., Dornelles S.H.B., Lopes S.J., Tabaldi L.A., Trivisoli V.S., Rubert J., Application of biostimulants in tomato subjected to water deficit: Physiological, enzymatic and production responses, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25 (2), 2021.
- [62] Colla G., Rouphael Y., Biostimulants in horticulture, *Scientia Horticulturae*, 2015, 196, s. 1–134.
- [63] Fernandes Â., Figueiredo S., Finimundy T.C., Pinela J., Tzortzakis N., Ivanov M., Sokovi M., Ferreira I.C.F.R., Petropoulos S.A., Chemical Composition and Bioactive Properties of Purple French Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) as Affected by Water Deficit Irrigation and Biostimulants Application, *Sustainability*, 2021, 13, s. 68–69.
- [64] Sharma A., Shahzad B., Rehman A., Bhardwaj R., Landi M., Zheng B., Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress, *Molecules*, 2019, 24, s. 2452.
- [65] Rigano M.M., Lionetti V., Raiola A., Bellincampi D., Barone A., Pectic enzymes as potential enhancers of ascorbic acid production through the d-galacturonate pathway in Solanaceae, *Plant Science*, 2018, 266, s. 55–63.
- [66] Guo Y.Y., Yu H.Y., Kong D.S., Yan F., Zhang Y.J., Effects of drought stress on growth and chlorophyll fluorescence of *Lycium ruthenicum* Murr. seedling, *Photosynthetica*, 2016, 54, s. 1–7.
- [67] Sato S., Kamiyama M., Iwara T., Makita N., Furukawa H., Ikeda H., Moderate increase of mean daily temperature adversely affects fruit set of *Lycopersicon esculentum* by disrupting specific physiological processes in male reproductive development, *Annals Botany*, 2006, 97, s. 731–738.
- [68] Ertani A., Pizzeghello D., Francioso O., Sambo P., Sanchez-Cortes S., Nardi S., *Capsicum chinensis* L. growth and nutraceutical properties are enhanced by biostimulants in a long-term period: Chemical and metabolomic approaches, *Frontiers Plant Science*, 2014, 5, s. 375.
- [69] Erba D., Casiraghi M.C., Ribas-Agustí A., Cáceres R., Marfà O., Castellari M., Nutritional value of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) grown in greenhouse by different agronomic techniques, *Journal Food Composition Analysis*, 2013, 31, s. 245–251.

- [70] Goñi O., Quille P., O'Connell S., *Ascophyllum nodosum* extract biostimulants and their role in enhancing tolerance to drought stress in tomato plants, *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 126, s. 63–73.
- [71] Rezaei-Chiyaneh E., Mahdavia H., Alipour H., Dolatabadian A., Battaglia M.L., Harrison M.T., Biostimulants alleviate water deficit stress and enhance essential oil productivity: a case study with savory, *Scientific Reports*, 2023, 13, s. 720.