

Received: 25.03.2024 / Accepted: 23.04.2024

ARTYKUŁ ORYGINALNY

Wpływ krzemu na rozwój i zarodnikowanie grzybów entomopatogenicznych

The influence of silicon on the development and sporulation of entomopathogenic fungi

Oliwia Pietruszyńska*, Danuta Sosnowska , Małgorzata Holka , Jolanta Kowalska 

Streszczenie

Krzem wykorzystywany jest w uprawie roślin rolniczych jako pierwiastek wpływający korzystnie na rozwój roślin i zwiększający ich odporność na stres oraz wspomagający systemy obronne rośliny chroniąc m.in. przed wnikaniem chorobotwórczych patogenów. Szczególne zastosowanie znalazł w uprawach ekologicznych. Nie ma statusu pierwiastka niezbędnego dla rozwoju roślin, jednak jego obecność poprawia ich kondycję. Podczas suplementowania roślin krzemem należy uwzględnić, że jego podwyższona zawartość w środowisku może mieć negatywny wpływ na pozostałe organizmy glebowe. Celem przeprowadzonego doświadczenia było wykazanie wpływu stosowania preparatu krzemowego w różnych dawkach na rozwój i zarodnikowanie grzybów owadobójczych z rodzajów *Beauveria*, *Cordyceps* i *Metarhizium* na pożywkach sztucznych. Wykazano zróżnicowany wpływ preparatu krzemowego na rozwój grzybów. Stwierdzono, że w niskiej dawce preparat wpływa korzystnie na produkcję zarodników u grzybów z rodzajów *Beauveria* sp. i *Cordyceps* sp. W przypadku *Metarhizium* sp. wykazano pozytywny wpływ na wzrost grzywni, przy jednoczesnym silnie ograniczającym działaniu krzemu na zarodnikowanie.

Słowa kluczowe: grzyby owadobójcze, krzem, *in vitro*

Abstract

Silicon is used in the cultivation of agricultural plants as an element that has a positive effect on the development of plants and increases their resistance to stress. It supports the plant's defense systems, protecting against the penetration of pathogens. Increased silicon content in the environment may have a negative impact on other soil organisms. The aim of the experiment was to demonstrate the effect of using a silicon preparation in various doses on the development of entomopathogenic fungi of the genera *Beauveria*, *Cordyceps* and *Metarhizium* on artificial media. A varied effect of the silicon preparation on the development of fungi have been demonstrated. It was found that at a low dose, the preparation had a positive effect on the production of spores in fungi of the genera *Beauveria* sp. and *Cordyceps* sp. In the case of *Metarhizium* sp., a positive effect on the growth of mycelium was demonstrated, with a simultaneous strong limiting effect of silicon on spore formation.

Key words: entomopathogenic fungi, silicon, *in vitro*

Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Władysława Węgorka 20, 60-318 Poznań
*corresponding author: o.pietruszynska@iorpib.poznan.pl

Wstęp / Introduction

Ważnym aspektem prowadzenia zrównoważonego rolnictwa jest przestrzeganie zasad integrowanej ochrony roślin (IPM – Integrated Pest Management). Opiera się ona na pierwszeństwie stosowania niechemicznych metod ochrony roślin oraz działań profilaktycznych mających na celu zapobieganie występowaniu i namnażaniu się organizmów szkodliwych (Pruszyński i wsp. 2012). Jednym z takich działań jest stosowanie krzemu (Si) w uprawach rolniczych, które cieszy się coraz większym zainteresowaniem ze strony producentów rolnych (Artyszak 2022). Dostępnych jest wiele badań sugerujących zastosowanie krzemu jako naturalnego środka wspomagającego ochronę roślin (Kowalska i wsp. 2023). Wykazano, że krzem jest pierwiastkiem wpływającym korzystnie na kondycję roślin poprzez wzmacnianie struktur ich ścian komórkowych, co skutkuje wyższą odpornością na biotyczne i abiotyczne czynniki stresogenne (Coskun i wsp. 2019; Verma i wsp. 2020). Jedną z ważniejszych funkcji krzemu jest poprawa funkcjonowania gospodarki wodnej w roślinach (El-Sayed i wsp. 2019). Odnotowano łagodzący wpływ krzemu na stres suszy w uprawach pszenicy, kukurydzy, ryżu, soi i rzepaku (Gong i wsp. 2005; Kaya i wsp. 2006; Shen i wsp. 2010; Ming i wsp. 2011; Habibi 2014; Wang i wsp. 2021). Stwierdzono, że rośliny nawożone krzemem wykazują wyższą mrozoodporność, lepiej tolerują obecność metali ciężkich w glebie oraz są mniej narażone na wyleganie (Guntzer i wsp. 2012; Bhatt i Sharma 2018). W swoich doświadczeniach Guntzer i wsp. (2012) oraz Sakr (2016a, 2016b) odnotowali wyższą odporność roślin uprawnych na patogeny chorobotwórcze, takie jak: grzyby *Blumeria graminis*, *Phaeosphaeria nodorum*, *Alternaria* spp., *Fusarium* spp., *Oculimacula yallundae*, bakterie: *Xanthomonas translucens* pv. *undulosa*, *Pseudomonas syringae*, czy wirusy mozaiki ogórka. Ferreira i wsp. (2015) zaobserwowali, że krzem nie ma bezpośredniego wpływu na rozwój bakterii z rodzaju *Acidovorax* w warunkach *in vitro*, choć stwierdzono pozytywne działanie tego pierwiastka w uprawie melona, wynikające z funkcji, jaką krzem pełni w roślinie. Na roślinach nawożonych krzemem obserwuje się również mniej śladów żerowania szkodników, m.in. mszyc, ze względu na barierę, jaką tworzy zakumulowana krzemionka w blaszkach liściowych (Goussain i wsp. 2005). Krzem jest prawdopodobnie jedynym pierwiastkiem o tak zróżnicowanym działaniu ochronnym na rośliny, co ma wpływ na wzrost zainteresowania jego stosowaniem w zrównoważonym rolnictwie (Ma 2004; Artyszak 2022).

Istotnym elementem biologicznych metod ochrony roślin jest wykorzystywanie mikroorganizmów pasożytniczych do zwalczania szkodników, sprawców chorób i chwastów. Na rynek środków ochrony roślin wprowadzane są biopreparaty, w tym biostymulatory, mikrobiologiczne nawozy oraz bioinsektycydy, zawierające w swoim składzie m.in. grzyby i bakterie. Są to organizmy odgry-

wające w środowisku ważną rolę bioregulatorów szkodników roślin, a ich występowanie i aktywność jest w dużym stopniu warunkowana systemem użytkowania gleby, występującą roślinnością oraz wilgotnością i temperaturą środowiska (Sierpińska i wsp. 2012). Pierwszymi poznanymi patogenami owadów były grzyby owadobójcze. Obecnie najczęściej wykorzystywanymi w biologicznej ochronie roślin grzybami są gatunki grzybów entomopatogenicznych z rodzajów *Beauveria*, *Cordyceps* (*Isaria*), *Metarhizium*, *Hirsutella*, *Nomuraea* i *Lecanicillium* (Tkaczuk i wsp. 2012). Warunki środowiskowe mogą mieć wpływ na ich zarodnikowanie oraz wirulentność, co ma znaczenie w zwalczaniu szkodników roślin w środowisku, w tym w glebie.

Celem badań było określenie wpływu zastosowania zróżnicowanych dawek krzemu na wzrost i zarodnikowanie grzybów entomopatogenicznych z rodzaju *Beauveria*, *Cordyceps* i *Metarhizium* w warunkach *in vitro*.

Materiały i metody / Materials and methods

Badanie przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych w Zakładzie Metod Biologicznych Instytutu Ochrony Roślin – Państwowego Instytutu Badawczego (IOR – PIB) w Poznaniu. W celu przeprowadzenia doświadczenia przygotowano podłoże hodowlane PDA (Potato Dextrose Agar) z dodatkiem krzemu w postaci kwasu ortokrzemowego (preparat ZumSil, 8,81% Si). Dla poszczególnych wariantów doświadczenia zastosowano krzem w ilości 0,1%, 0,2% oraz 0,4% preparatu w pożywce. Doświadczenie przeprowadzono w czterech powtórzeniach. W badaniu wykorzystano następujące szczepy grzybów:

- Bb-21-VI-A/309/R1 (*Beauveria* sp.),
- PFR-21-V-A/112/R1 (*Cordyceps* sp.),
- 22-V-A/108/R4(2) (*Metarhizium* sp.).

Szczepy wykorzystane w doświadczeniu były wyizolowane z gleby z poletek doświadczalnych Polowej Stacji Doświadczalnej IOR – PIB w Winnej Górze i są własnością Zakładu Metod Biologicznych IOR – PIB w Poznaniu. W celu przygotowania badań grzyby posiano na pożywkę PDA i inkubowano w termostacie w temperaturze 25°C przez okres 10 dni, stwarzając optymalne warunki do prawidłowego wzrostu grzybni i rozwoju zarodników. Po tym czasie z rozwiniętej kolonii grzyba wycięto krążki o średnicy 6 mm i wyłożono na pożywkę krzemową, po czym ponownie umieszczono w termostacie. Po 7 dniach inkubacji zmierzono średnicę grzybni, a następnie ją zebrano i poddano homogenizacji z dodatkiem 10 ml wody destylowanej. Z powstałej zawiesiny pobrano próbkę do określenia liczby zarodników za pomocą hemocytometru. Aby porównać zarodnikowanie poszczególnych obiektów, uzyskane wyniki podstawiono do wzoru:

$$Kz = Lz/P,$$

gdzie: Kz – koncentracja zarodników na 1 cm² powierzchni grzybni, Lz – liczba zarodników w 1 ml roztworu, P – powierzchnia grzybni. Po uzyskaniu wyników koncentracji zarodników na 1 cm² wyliczono średnią z powtórzeń. Wyniki opracowano statystycznie wykorzystując program Statistica 12.0 (StatSoft Polska, Kraków, Polska). Założenia analizy wariancji wymagają normalności rozkładu badanych cech, dlatego przed przystąpieniem do analizy wykonywano test Shapiro-Wilka na normalność rozkładu. W przypadku danych reprezentujących rozkład normalny, wyniki opracowano statystycznie za pomocą jednoczynnikowej lub dwuczynnikowej analizy wariancji, a średnie porównano stosując test NIR (Fisher's Least Significant Difference – LSD) na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Dane, które nie reprezentowały rozkładu normalnego poddano wcześniej transformacji (przez $\log(x+1)$), która zmienia skalę liczb, ale nie zmienia relacji między nimi, przez co pozwala na uzyskanie dla nich rozkładu bliskiego normalnemu.

Wyniki i dyskusja / Results and discussion

Grzyby entomopatogeniczne charakteryzują się szerokim zasięgiem występowania – mają zdolność do zasiedlania środowisk o niekorzystnym klimacie oraz infekowania wielu gatunków owadów (Mantzoukas i wsp. 2014; Abdul Qayyum i wsp. 2021). Mogą pozostać w środowisku długi czas

bez żywiciela, a ich zdolności epizootyczne warunkowane są przez szereg czynników biotycznych i abiotycznych (Mudgal i wsp. 2013). W przeprowadzonym doświadczeniu badano wpływ podwyższonej zawartości krzemu w podłożu hodowlanym na wzrost i rozwój trzech szczepów grzybów owadobójczych.

W badaniach własnych stwierdzono zróżnicowany poziom wrażliwości grzybów entomopatogenicznych na obecność krzemu w pożywce. W przypadku *Beauveria* sp. wykazano jego negatywny wpływ na wzrost powierzchni grzybni w każdym z wariantów doświadczenia (tab. 1). Dodatek krzemu do pożywki bez względu na jego koncentrację skutkowało istotnym zmniejszeniem się powierzchni grzybni względem obiektów kontrolnych. Wykazano również ograniczenie zarodnikowania przy dawkach 0,2% i 0,4% preparatu w pożywce (tab. 2). Obecność 0,1% krzemu wpłynęła pozytywnie na zwiększenie produkcji zarodników, jednak nie były to różnice istotne statystycznie.

W swoich badaniach Swathi i wsp. (2018) przedstawiają negatywny wpływ żeluz krzemionkowego na zarodnikowanie *Beauveria bassiana* oraz tendencję do ograniczania wzrostu powierzchni kolonii. Podobną reakcję zaobserwowała Kowalska i wsp. (dane niepublikowane) w doświadczeniach na roślinach ziemniaka, gdzie wykazano, że łączne zastosowanie preparatu Naturalis (s.cz. *B. bassiana*) wraz z krzemem skutkowało wytworzeniem CFU w liczbie $7,6 \times 10^3$ na liść ziemniaka, podczas gdy kontrola bez krzemu była na poziomie $12,3 \times 10^3$ CFU/liść. Shakir i wsp.

Tabela 1. Powierzchnia grzybni w 7. dniu prowadzenia doświadczenia [cm²]

Table 1. Mycelial surface on the 7th day of the experiment [cm²]

Rodzaj grzyba Fungi genus	Dawka krzemu – Dose of silicon				Średnia Mean
	kontrola control	0,1% Si	0,2% Si	0,4% Si	
<i>Beauveria</i> sp.	5,43 bc	4,56 a	4,17 a	3,99 a	4,54 a
<i>Cordyceps</i> sp.	5,12 bc	6,17 bc	5,11 bc	5,02 bc	5,36 ab
<i>Metarhizium</i> sp.	4,03 a	6,17 bc	6,20 bc	7,19 c	5,90 b

Wartości w wierszach oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy $p = 0,05$

Values in lines followed by the same letter do not differ significantly at $p = 0.05$

Tabela 2. Koncentracja zarodników na 1 cm² grzybni w 7. dniu prowadzenia doświadczenia [$\times 10^9$]

Table 2. Spore concentration per 1 cm² of mycelium surface on the 7th day of the experiment [$\times 10^9$]

Gatunek grzyba Fungi genus	Dawka krzemu – Dose of silicon				Średnia Mean
	kontrola control	0,1% Si	0,2% Si	0,4% Si	
<i>Beauveria</i> sp.	0,36 bc	0,44 b	0,25 ab	0,20 a	0,31 a
<i>Cordyceps</i> sp.	0,18 a	0,25 ab	0,16 a	0,16 a	0,19 a
<i>Metarhizium</i> sp.	3,02 e	1,56 d	1,13 c	0,93 c	1,66 b

Wartości w wierszach oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy $p = 0,05$

Values in lines followed by the same letter do not differ significantly at $p = 0.05$

(2015) wykazali, że łączne zastosowanie krzemianu potasu i *B. bassiana* oraz imidaklopyrydu (po 20 dniach) pozwoliło osiągnąć 61,91% skuteczności w zwalczaniu *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera). Zastosowanie 50% dawki krzemu w pożywce hodowlanej wpłynęło na zwiększenie powierzchni grzybni, jak i koncentracji zarodników grzyba *Cordyceps* sp. na 1 cm² kolonii, jednak nie były to różnice istotne statystycznie. Według Sabbour i wsp. (2012) grzyb *Isaria fumosorosea* (obecnie *Cordyceps fumosorosea*) w połączeniu z ziemią okrzemkową wykazał się niższą o 16% śmiertelnością larw ciem z rodzajów *Plodia* i *Ephestia* niż w kontroli bez dodatku ziemi okrzemkowej. Podobną zależność uzyskano w przypadku *Metarhizium anisopliae*, gdzie skuteczność zastosowania samego grzyba była wyższa o 13% niż w połączeniu z ziemią okrzemkową. Grzyby z rodzaju *Metarhizium* sp. charakteryzują się wysokim stopniem zarodnikowania, co wykazano w przeprowadzonym doświadczeniu na obiektach kontrolnych. Obecność preparatu krzemowego w pożywce wpłynęła na ograniczenie produkcji zarodników. W badaniu stwierdzono, że koncentracja zarodników *Metarhizium* sp. w poszczególnych wariantach była odwrotnie proporcjonalna do powierzchni grzybni i była ona najwyższa dla obiektów kontrolnych, a najniższa dla dawki 0,4% Si. Istotny wpływ krzemu na wzrost kolonii wykazano już przy najniższej dawce preparatu. W poszczególnych wariantach odnotowano wzrost powierzchni grzybni z 4,03 cm² (kontrola) do 7,19 cm² dla dawki 0,4% Si. W przeprowadzonych badaniach Shatalova i wsp. (2022) wykazali, że zmodyfikowane nanocząstki dwutlenku krzemu wpływały na skuteczność biopreparatów zawierających *Bacillus thuringiensis* i *Metarhizium robertsii*. Odnotowano podwyższoną skuteczność działania biopreparatów w przypadku szkodników, takich jak: stonka ziemniaczana (*Leptinotarsa decemlineata*) i pchełki (*Pchyllostreta* spp.).

Pod uwagę należy wziąć fakt, że w środowisku organizmy są ze sobą powiązane w sposób niejednoznaczny. W swoich doświadczeniach Gatarayih i wsp. (2010) wykazali synergistyczny efekt działania krzemu i *B. bassiana* w uprawach warzyw. Zastosowanie krzemu w dawkach

80 i 160 mg zwiększyło śmiertelność przędziorka *Tetranychus urticae* przez *B. bassiana* do 92%. Szkodniki żerujące na roślinach nawożonych krzemianem potasu miały utrudnioną możliwość pobierania pokarmu, co wprowadziło je w stan stresowy. Osobniki te wykazywały większą podatność na porażenie grzybem pasożytniczym niż szkodniki na roślinach nienawożonych.

Wnioski / Conclusions

1. Obecność krzemu w podłożu hodowlanym wpłynęła w sposób zróżnicowany na rozwój i zarodnikowanie testowanych grzybów entomopatogenicznych.
2. Dodatek preparatu krzemowego do pożywki wpłynął ograniczająco na rozwój grzybni *Beauveria* sp. oraz *Cordyceps* sp., ale stymulująco na rozwój *Metarhizium* sp.
3. Krzem w dawce 0,1% wpływa stymulująco na zarodnikowanie grzybów entomopatogenicznych z rodzajów *Beauveria* oraz *Cordyceps*, jednak w wyższych dawkach ogranicza on tworzenie zarodników, natomiast szczep grzyba z rodzaju *Metarhizium* w obecności krzemu silnie ograniczył produkcję zarodników, pomimo dobrze rozwiniętej grzybni.
4. Przyszłe badania w zakresie integrowanej ochrony roślin powinny obejmować poszukiwania właściwych źródeł krzemu i optymalnych dawek jego stosowania, a także jego wpływu na rozwój i patogeniczność pożytecznych mikroorganizmów glebowych.

Podziękowanie / Acknowledgements

Autorzy składają serdeczne podziękowania Pani dr inż. Małgorzacie Antkowiak (Zakład Rolnictwa Ekologicznego i Ochrony Środowiska) za opracowanie statystyczne wyników i Pani Renacie Wojciechowskiej (Zakład Metod Biologicznych) za pomoc techniczną w przeprowadzeniu badań.

Literatura / References

- Abdul Qayyum M., Bilal H., Naeem Ullah U., Ali H., Raza H., Wajid M. 2021. Factors affecting the epizootics of entomopathogenic fungi – a review. *Journal of Bioresource Management* 8 (4): 78–85. DOI: 10.35691/JBM.1202.0204
- Artyszak A. 2022. Zmiany w nawożeniu – dobre i złe. [Changes in fertilization – good and bad]. *Progress in Plant Protection/ Postępy w Ochronie Roślin* 62 (2): 134–140. DOI: 10.14199/ppp-2022-016
- Bhatt D., Sharma G. 2018. Role of silicon in counteracting abiotic and biotic plant stresses. *International Journal of Chemical Studies* 6 (2): 1434–1442.
- Coskun D., Deshmukh R., Sonah H., Menzies J.G., Reynolds O., Ma J.F., Kronzucher H.J., Bélanger R.R. 2019. The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist* 221 (1): 67–85. DOI: 10.1111/nph.15343
- El-Sayed A.A., Abou Seeda M.A., Yassen A.A., Zaghloul S.M., Khater A. 2019. Silicon in soils, plants and its important role in crop protection: a review. *Middle East Journal of Agriculture Research* 8 (4): 983–1004. DOI: 10.36632/mejar/2019.8.4.3
- Ferreira H.A., Nascimento C.W.A., Datnoff L.E., Nunes G.H.S., Preston W., Souza E.B., Mariano R.L.R. 2015. Effects of silicon on resistance to bacterial fruit blotch and growth of melon. *Crop Protection* 78: 277–283. DOI: 10.1016/j.cropro.2015.09.025

- Gatarayihya M.C., Laing M.D., Miller R.M. 2010. Combining applications of potassium silicate and *Beauveria bassiana* to four crops to control two spotted spider mite, *Tetranychus urticae* Koch. *International Journal of Pest Management* 56 (4): 291–297. DOI: 10.1080/09670874.2010.495794
- Gong H., Zhu X., Chen K., Wang S., Zhang C. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science* 169 (2): 313–321. DOI: 10.1016/j.plantsci.2005.02.023
- Goussain M.M., Prado E., Moraes J.C. 2005. Effect of silicon applied to wheat plants on the biology and probing behaviour of the greenbug *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). *Neotropical Entomology* 34 (5): 807–813. DOI: 10.1590/S1519-566X2005000500013
- Guntzer F., Keller C., Meunier J.D. 2012. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 32 (1): 201–213. DOI: 10.1007/s13593-011-0039-8
- Habibi G. 2014. Silicon supplementation improves drought tolerance in canola plants. *Russian Journal of Plant Physiology* 61 (6): 784–791. DOI: 10.1134/S1021443714060077
- Kaya C., Tuna L., Higgs D. 2006. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. *Journal of Plant Nutrition* 29 (8): 1469–1480. DOI: 10.1080/01904160600837238
- Kowalska J., Krzysińska J., Łukaszuk J. 2023. Rola krzemu we wzroście roślin w świetle badań. [The role of silicon in plant growth in research]. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego* 113 (3): 104–115.
- Ma J.F. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition* 50 (1): 11–18. DOI: 10.1080/00380768.2004.10408447
- Mantzoukas S., Chondrogiannis C., Grammatikopoulos G. 2014. Effects of three endophytic entomopathogens on sweet sorghum and on the larvae of the stalk borer *Sesamia nonagrioides*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 154 (1): 78–87. DOI: 10.1111/eea.12262
- Ming D.F., Pei Z.F., Naeem M.S., Gong H.J., Zhou W.J. 2011. Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. *Journal of Agronomy and Crop Science* 198 (1): 14–26. DOI: 10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x
- Mudgal S., Toni A., Tostivint C., Hokkanen H., Chandler D. 2013. Scientific support, literature review and data collection and analysis for risk assessment on microbial organisms used as active substance in plant protection products – Lot 1 Environmental Risk characterisation. EFSA Supporting Publication 2013:EN-518, 149 ss. DOI: 10.2903/sp.efsa.2013.EN-518
- Pruszyński S., Bartkowski J., Pruszyński G. 2012. Integrowana ochrona roślin w zarysie. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie, Oddział w Poznaniu, 57 ss. ISBN 978-83-60232-39-2.
- Sabbour M., Abd-El-Aziz S., Marwa S. 2012. Efficacy of three entomopathogenic fungi alone or in combination with diatomaceous earth modifications for the control of three pyralid moths in stored grains. *Journal of Plant Protection Research* 52 (3): 359–363. DOI: 10.2478/v10045-012-0059-7
- Sakr N. 2016a. Silicon control of bacterial and viral diseases in plants. *Journal of Plant Protection Research* 56 (4): 331–336. DOI: 10.1515/jppr-2016-0052
- Sakr N. 2016b. The role of silicon (Si) in increasing plant resistance against fungal diseases. *Hellenic Plant Protection Journal* 9 (1): 1–15. DOI: 10.1515/hppj-2016-0001
- Shakir H.U., Saeed M., Anjum N.A., Farid A., Khan I.A., Liaquat M., Badshah T. 2015. Combined effect of entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*, imidacloprid and potassium silicate against *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée (Lepidoptera: Pyralidae) in rice crop. *Journal of Entomology and Zoology Studies* 3 (4): 173–177.
- Shatalova E.I., Grizanova E.V., Duborskiy I.M. 2022. The effect of silicon dioxide nanoparticles combined with entomopathogenic bacteria or fungus on the survival of Colorado potato beetle and cabbage beetles. *Nanomaterials* 12 (9): 1558. DOI: 10.3390/nano12091558
- Shen X., Zhou Y., Duan L., Li Z., Eneji A.E., Li J. 2010. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Journal of Plant Physiology* 167 (15): 1248–1252. DOI: 10.1016/j.jplph.2010.04.011
- Sierpińska A., Tkaczuk C., Skrzecz I. 2012. Rola badań nad entomopatogenami w rozwoju biologicznych metod ochrony roślin. s. 13–30. W: Kierunki rozwoju patologii owadów w Polsce (I. Skrzecz, A. Sierpińska, red.). Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary, 381 ss. ISBN 978-83-62830-11-4.
- Swathi P., Ganga Visalakshy P.N., Das S.B. 2018. In vitro evaluation for compatibility of additives with *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin. *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 28 (1): 13. DOI: 10.1186/s41938-017-0017-9
- Tkaczuk C., Krzyczkowski T., Głuszcak B., Król A. 2012. Wpływ wybranych środków ochrony roślin na wzrost kolonii i kiełkowanie zarodników owadobójczego grzyba *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. [The influence of selected pesticides on the colony growth and conidial germination of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill.]. *Progress in Plant Protection/Postępy w Ochronie Roślin* 52 (4): 969–974. DOI: 10.14199/ppp-2012-167
- Verma K.K., Singh P., Song X.P., Malviya M.K., Singh R.K., Chen G.L., Solomon S., Li Y.R. 2020. Mitigating climate change for sugarcane improvement. Role of silicon in alleviating abiotic stresses. *Sugar Tech* 22 (1): 741–749. DOI: 10.1007/s12355-020-00831-0
- Wang M., Wang R., Mur L.A.J., Ruan J., Shen Q., Guo S. 2021. Functions of silicon in plant drought stress responses. *Horticulture Research* 8: 254. DOI: 10.1038/s41438-021-00681-1