

=====

REVIEW RESEARCH PAPERS

=====

IRSTI: 34.27.51; 68.39.15

S.V. MAKSIMOVICH¹, Zh.N. YERMEKBAY¹, E.T. KHAMEDOVA¹, E.A. OLEYNIKOVA¹,
M.G. SAUBENOVA¹, I.Yu. POTOROKO²

¹Research and Production Center for Microbiology and Virology, Almaty, Kazakhstan

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

*e-mail: seveg@ya.ru

**POTENTIAL OF USING SYMBIOTIC MICROBIOTA TO INCREASE DROUGHT
RESISTANCE OF WHEAT**

doi:10.53729/MV-AS.2024.02.01

Abstract

Recent climate changes have significantly impacted agricultural productivity, prompting researchers to investigate the intricate interactions between plants and microorganisms. This article explores the profound influence of microbial allies, including plant growth-promoting bacteria (PGPB), endophytes, and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), on enhancing wheat's drought tolerance. These microorganisms play pivotal roles in promoting plant growth, enhancing productivity, and conferring resilience to stress factors. Through various mechanisms such as improving root and shoot growth, photosynthetic rate, and antioxidant activity, microbial symbiotes contribute to bolstering wheat's drought resilience. The targeted application of drought-tolerant microorganisms offers promising strategies for enhancing wheat's drought tolerance and ensuring agricultural sustainability in the face of changing climatic conditions. This research underscores the importance of harnessing microbial symbiotes to develop resilient wheat cultivars capable of withstanding drought stress, thereby addressing food security challenges in drought-prone regions.

Keywords: drought resistance, wheat, symbiotic microbiome.

In the realm of agriculture, the quest for sustainable solutions to combat the challenges posed by climate change, particularly drought stress, has led researchers to explore the intricate world of plant-microbe interactions. The rhizosphere, a dynamic zone bustling with diverse microbes attracted by root exudates, holds immense potential in shaping plant health and resilience [1]. This article delves into the transformative role of microbial allies, including Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR), endophytes, and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF), in bolstering wheat's drought tolerance.

The symbiotic relationship between plants and microbes in the rhizosphere is a fascinating interplay that significantly impacts plant growth and stress resilience. Studies have highlighted the dynamic nature of the rhizosphere microbiome, which adapts to environmental stressors like drought, influencing plant acclimatization [2]. Root exudates play a pivotal role in shaping the microbial community, with specific microbes demonstrating enhanced growth under stress conditions, thereby promoting plant survival [3,4].

The utilization of PGPR has emerged as a promising strategy to enhance wheat's drought resistance [2,5]. Various PGPR strains have been identified for their ability to improve wheat growth under drought conditions through mechanisms such as the production of exopolysaccharides, indole-3-acetic acid, and ACC deaminase. These beneficial bacteria not only enhance root morphology and seedling vigor but also facilitate nutrient solubilization and antioxidant enzyme activities, collectively contributing to enhanced drought tolerance in wheat [6].

Endophytic microorganisms, residing within plant tissues without causing harm, have also emerged as potent allies in promoting plant growth and resilience. Endophytes demonstrate effectiveness in stimulating plant growth, enhancing productivity, and conferring non-specific resistance to stress factors [7]. By promoting osmotic regulation and antioxidant activity within host plant cells, endophytes play a crucial role in enhancing wheat's tolerance to severe drought conditions [8].

Furthermore, the symbiotic relationship between wheat and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) has been shown to significantly enhance the plant's water uptake and stress tolerance. AMF colonization improves wheat's water relations, mitigates drought stress-induced damage to the photosynthetic apparatus, and enhances the plant's moisture availability and photosynthetic efficiency under water-limited conditions [9].

Plant growth-promoting rhizobacteria

The utilization of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) has emerged as a promising strategy to enhance drought resistance in wheat, a staple food crop with significant global importance. Research has identified various PGPR strains capable of improving wheat's drought tolerance through different mechanisms, including the production of exopolysaccharides (EPS), indole-3-acetic acid (IAA), and the enzyme 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylate (ACC) deaminase, which plays a crucial role in mitigating ethylene-induced stress effects [10][11][12]. Studies have demonstrated that specific PGPR strains, such as *Chryseobacterium* sp., *Acinetobacter* sp., *Klebsiella* sp., *Bacillus megaterium*, and *Bacillus licheniformis*, not only enhance wheat growth under drought conditions but also improve root morphology, seedling vigor, and overall plant biomass [13][14]. These beneficial bacteria facilitate plant growth by solubilizing essential nutrients like phosphorus and zinc, producing plant hormones, and increasing antioxidant enzyme activities, which collectively contribute to enhanced drought tolerance [15][16]. Moreover, the combined application of PGPR with other amendments, such as Biogas Slurry (BGs) or biochar, has shown to further improve water relations, chlorophyll content, grain yield, and quality in wheat under drought stress [17]. This synergistic approach underscores the potential of integrating PGPR with organic amendments to bolster wheat's resilience to water scarcity. In addition to bacterial inoculants, research has also explored the development of drought-enduring stress-resistance compound regulators and microbial preparations based on endophytic microorganisms isolated from drought-resistant plants. These innovations aim to enhance wheat's capacity to withstand drought and other abiotic stresses, offering a multifaceted approach to securing wheat production in the face of increasing drought challenges. Collectively, these studies highlight the significant potential of PGPR and related technologies in developing sustainable, bio-based strategies to improve drought resistance in wheat, thereby contributing to food security in drought-prone regions.

PGPR Influence on Wheat Drought Tolerance

PGPR inoculation enhances biochemical parameters like chlorophyll, proline, total soluble sugar, and protein content in wheat under drought stress, indicating improved physiological status. PGPR treatment reduces oxidative damage in wheat by lowering malondialdehyde (MDA) accumulation, a marker of membrane damage during drought [18]. Specific PGPR strains significantly improve wheat growth parameters such as shoot and root length, weight, and root number under drought conditions, demonstrating their role in ameliorating drought effects. PGPR inoculation modulates the expression of drought-responsive genes (DREB2A and CAT1) in wheat, suggesting a genetic basis for enhanced drought tolerance [19]. PGPR inoculation enhances chlorophyll, proline, total soluble sugar, and protein content in wheat under drought conditions. Reduction in oxidative damage through lower malondialdehyde accumulation in PGPR-treated wheat indicates improved drought resistance.

Inoculation with PGPR leads to significant improvements in root and shoot dry weight in wheat varieties under drought stress. PGPR treatment results in better root growth, facilitating

increased nutrient and water assimilation. PGPR inoculation modulates the expression of drought-responsive genes, including upregulation of DREB2A and CAT1, enhancing drought tolerance. Attenuated transcript levels of stress-related genes in PGPR-inoculated plants suggest improved drought tolerance due to PGPR interaction. Drought mitigation by PGPRs has been well observed in wheat plants inoculated with *Klebsiella* sp., *Enterobacter ludwigii*, and *Flavobacterium* sp. [19]. Wheat plants inoculated with PGPR strains also showed better vegetative growth, high RWC, low MDA content, increased accumulation of pro-line, as well as other stress-related metabolites [19].

Endophytes

Endophytic microorganisms, residing within plant tissues without causing harm, have emerged as potent allies promoting plant growth and resilience. Compared to rhizospheric bacteria, endophytes demonstrate greater effectiveness in stimulating plant growth, enhancing productivity, protecting against environmental pollutants, supplying essential minerals, and defending against diseases, pathogens, and pests [20, 21]. This unique partnership between plants and endophytes has captured significant research interest.

While the intricate details of these interactions remain under investigation, recent studies highlight the crucial role of endophytes in bolstering plants' non-specific resistance to various stress factors [22]. Endophytes can enhance plant growth even under severe drought conditions by promoting osmotic regulation and antioxidant activity within the host plant cells [23, 24]. For instance, endophytic fungi have been shown to improve wheat tolerance to drought and heat stress [25]. Similarly, endophytic strains of *Bacillus subtilis* have demonstrated a protective effect against a multitude of environmental stressors, including heavy metals, salinity, and drought [26, 27, 28]. Notably, researchers have successfully utilized endophytes to confer heat tolerance in soybean plants [29].

Despite these advancements, a complete understanding of the mechanisms governing endophytic bacterial-plant mutualism remains elusive. A comprehensive research approach is necessary to elucidate the specific actions of endophytic bacterial strains on plant organisms under stress conditions. This approach should also explore how endophytes interact with other beneficial microorganisms within the plant, potentially leading to synergistic effects in promoting plant health and stress resilience. By delving deeper into these complex interactions, researchers can unlock the full potential of endophytes for sustainable agriculture in the face of a changing climate.

Arbuscular mycorrhizal fungi

Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) play a crucial role in enhancing the drought resistance of wheat by establishing a symbiotic relationship that improves the plant's water uptake and stress tolerance. The method involving the use of AM fungi, specifically *glomus monosporum* and *acaulospora laevis*, has been shown to promote wheat growth and improve its adaptability to drought conditions by fostering a beneficial symbiosis under controlled conditions [30]. This is further supported by experimental evidence demonstrating that AMF colonization can mitigate drought stress-induced damage to the photosynthetic apparatus of wheat, leading to increased relative water content in both leaves and soil, thereby enhancing the plant's moisture availability and sustaining its photosynthetic efficiency under drought stress [31]. The significance of developing drought-resistant wheat varieties is underscored by the challenges posed by climate change, which is expected to reduce water availability and exacerbate drought conditions in wheat-growing areas. Genetic diversity among wheat cultivars, including ancient varieties, offers potential for improving drought resistance. For instance, the ancient Portuguese cultivar 'Mestico' has shown promising early drought stress resistance and genetic distinctiveness, suggesting that it may possess unique traits beneficial for germination and growth in dry conditions [9]. Moreover, the exploration of genetic determinants and molecular mechanisms underlying drought resistance in wheat has highlighted the regulatory role of abscisic acid (ABA) and the involvement of various transcription factors and osmoprotectants in the plant's response to water deficit [32]. This molecular insight complements the practical approaches to enhancing drought tolerance, such as

the selection of drought-resistant genotypes based on seedling traits under simulated drought stress [33] and the development of wheat compound fertilizers designed to improve drought resistance [34]. In summary, the integration of AMF symbiosis with genetic and molecular strategies offers a comprehensive approach to enhancing wheat's drought resistance, which is crucial for maintaining productivity in the face of increasing drought stress due to climate change [35, 36, 37]. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) form a symbiotic relationship with plant roots, extending their reach and enhancing nutrient and water uptake. This partnership plays a critical role in improving drought tolerance in wheat. AMF colonization allows wheat roots to access water from a larger soil volume, improving plant-water relations and mitigating drought stress.

Beyond water acquisition, AMF symbiosis strengthens wheat's physiological resilience to drought. Studies have shown that AMF inoculation increases antioxidant activity and water use efficiency in wheat [39]. This bolstered antioxidant defense system helps wheat scavenge harmful free radicals produced under drought stress. Additionally, AMF enhances water use efficiency, allowing wheat to optimize water utilization for growth and development [40].

The influence of AMF on wheat extends to hormonal regulation, osmotic adjustment, and nutrient uptake. This multifaceted symbiosis alters wheat's physiological performance, enabling it to better cope with drought conditions. AMF can influence hormonal balance, promoting the production of beneficial hormones and potentially reducing stress hormone production [41]. Furthermore, AMF can contribute to osmotic adjustment in wheat by promoting the accumulation of compatible solutes. These solutes help maintain cell turgor and vital physiological processes under drought stress. Additionally, AMF can enhance nutrient uptake by wheat, ensuring it has access to essential minerals for growth and stress defense [42].

Recent research suggests that the response of wheat to drought stress, including sulfur homeostasis, can be influenced by AMF in a genotype-specific manner [43]. This finding highlights the potential for harnessing this interaction to develop drought-resistant wheat varieties. By understanding how AMF genotypes interact with different wheat cultivars, researchers can leverage this knowledge to develop targeted breeding strategies for improved drought tolerance [44, 45].

Targeted application of drought-tolerant microorganisms

The targeted application of drought-tolerant microorganisms, including plant growth-promoting bacteria (PGPB), arbuscular mycorrhiza fungi (AMF), and specific bacterial strains, has been shown to significantly increase wheat drought tolerance through various mechanisms. These microorganisms enhance the morphological, physico-biochemical, and ultrastructural characteristics of wheat under drought conditions by improving root and shoot growth, photosynthetic rate, and enhancing the accumulation of osmoprotectants and antioxidants, thereby reducing oxidative stress and improving water and nutrient uptake [46]. For instance, the novel rhizospheric bacterium SH-8, isolated from the rhizospheric soil of *Artemisia* plants, demonstrated a high tolerance to oxidative stress and significantly enhanced the drought tolerance and germination potential of wheat seeds through biopriming, indicating its potential as a biofertilizer under drought conditions [47]. Similarly, strategies for selecting drought-adapted rhizomicrobiomes and targeted PGPR consortia have been suggested to improve plant drought tolerance, emphasizing the importance of host-mediated selection and integrated omics-level analysis for optimal PGPR selection [48]. Research has also identified specific bacterial strains, such as *Bacillus wiedmannii*, which increased wheat tolerance to drought when applied to seeds, highlighting the role of PGPR in enhancing plant yield under abiotic stress [49]. Additionally, the co-application of *Azospirillum brasilense* and ZnO nanoparticles has been found to synergistically enhance wheat productivity under drought by improving water relations, chlorophyll synthesis, and antioxidant activity [50, 51]. Exopolysaccharide (EPS)-producing PGPR, such as strains identified as *Chryseobacterium* sp., *Acinetobacter* sp., and *Klebsiella* sp., have shown promise in inducing drought stress tolerance in wheat by improving root morphology and seedling growth [52]. Moreover, *Rhizobium leguminosarum* strains have been found to alleviate drought stress in

wheat by improving growth parameters, chlorophyll content, and reducing oxidative stress markers [53]. Biofilm-forming bacterial isolates from arid grasslands also demonstrated the ability to promote wheat growth under water deficit by enhancing root traits and the antioxidant defense system [54, 55].

The practical application of various bacteria and fungi for enhancing wheat drought resistance involves utilizing beneficial microbial communities to support plant growth and resilience under water-deficit conditions [56]. For instance, the use of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and mycorrhizal fungi can significantly improve nutrient uptake efficiency, increase biomass production, and enhance drought tolerance in wheat crops [57]. Specific microorganisms like *Enterobacter cloacae*, *Achromobacter xylosoxidans*, and *Mortierella alpina* have been identified for their ability to stimulate plant growth, increase photosynthetic efficiency, and synthesize growth-promoting compounds, ultimately aiding wheat plants in coping with drought stress [58]. By harnessing the mechanisms of microbiome-enhanced drought resistance, farmers and researchers can apply these beneficial bacteria and fungi to cultivate drought-resistant wheat cultivars with improved root and shoot biomass, nutrient content, and overall resilience to water scarcity [59, 60].

The potential of drought-tolerant microbes in enhancing plant resistance under osmotic stress is well-documented, with the next step being their translation from laboratory to field conditions through the development of microbe-based biofertilizers [61]. Effective biofertilizer formulations should contain metabolically active organisms, have a longer shelf life, and be environmentally friendly and biodegradable [62]. Application of mycorrhizas in combination with *Azotobacter* and *Azospirillum* has shown to enhance root and shoot biomass, proline, carotenoids, essential oils, nitrogen, and potassium content in *Valeriana officinalis* under drought stress [63]. A bioformulation consisting of *Enterobacter cloacae*, *Achromobacter xylosoxidans*, *Leclercia adecarboxylata*, and timber waste biochar significantly improved the drought tolerance of maize, as evidenced by increased growth rate, yield, gas exchange ratio, and concentration of photosynthetic pigments [64].

Host-mediated Microbiome Engineering (HMME) is a method where scientists use plants to naturally select helpful tiny organisms in the soil to improve the plant's ability to handle dry conditions by repeatedly growing plants under these conditions and picking the best performers to breed the next generation of plants with a beneficial soil community [65]. This process involves mixing soil from around the roots of the best-performing plants with a sterile growing medium and then using this mix to grow the next generation of plants, aiming to enhance the plants' drought resistance over several cycles [66]. During lab experiments HMME facilitated a 5-day delay in the onset of drought stress symptoms in wheat seedlings, indicating enhanced drought tolerance. HMME inoculum significantly increased plant biomass, root dry weight, total root length, and surface area [67].

Conclusion

In conclusion, harnessing microbial allies presents a promising avenue for enhancing wheat's drought tolerance in the face of climate change challenges. The synergistic interactions between plants and beneficial microbes pave the way for sustainable, bio-based strategies to ensure food security in drought-prone regions. By unlocking the full potential of microbial allies, researchers and farmers can cultivate resilient wheat cultivars capable of withstanding the rigors of drought stress, thereby securing agricultural productivity in a changing climate landscape. The targeted application of drought-tolerant microorganisms, including PGPR, AMF, and specific bacterial strains, offers a promising approach to enhancing wheat drought tolerance. By improving root and shoot growth, photosynthetic rate, and antioxidant activity, these microorganisms contribute to improved growth, stress resilience, and yield under water-limited conditions.

References:

- 1 Holly, Hone., Ross, Mann., Guodong, Yang., Jatinder, Kaur., Tannenbaum, Ian, Ross., Tongda, Li., German, Spangenberg., Tim, Sawbridge. "Profiling, isolation and characterisation of beneficial microbes from the seed microbiomes of drought tolerant wheat." *Scientific Reports*, 11 (2021):11916-11916. (doi: 10.1038/S41598-021-91351-8)
- 2 Zhaoyu, Kong., Hongguang, Liu. "Modification of Rhizosphere Microbial Communities: A Possible Mechanism of Plant Growth Promoting Rhizobacteria Enhancing Plant Growth and Fitness." *Frontiers in Plant Science*, 13 (2022). (doi: 10.3389/fpls.2022.920813)
- 3 Yalin, Chen., Zongmu, Yao., Yu, Sun., Enze, Wang., Chunjie, Tian., Yang, Sun., Juan, Liu., Chunyu, Sun., Lei, Tian. "Current Studies of the Effects of Drought Stress on Root Exudates and Rhizosphere Microbiomes of Crop Plant Species." *International Journal of Molecular Sciences*, 23 (2022):2374-2374. (doi: 10.3390/ijms23042374)
- 4 M., D., Mashabela., Lizelle, A., Piater., Ian, A., Dubery., Fidele, Tugizimana., Msizi, I., Mhlongo. "Rhizosphere Tripartite Interactions and PGPR-Mediated Metabolic Reprogramming towards ISR and Plant Priming: A Metabolomics Review." *Biology*, 11 (2022):346-346. (doi: 10.3390/biology11030346)
- 5 Sharma, Sandeep, and Kailash Chand Kumawat. "Role of rhizospheric microbiome in enhancing plant attributes and soil health for sustainable agriculture." *Core microbiome: improving crop quality and productivity* (2022): 139-162. (doi: 10.1002/9781119830795.ch8)
- 6 Zia, Rabisa, et al. "Seed inoculation of desert-plant growth-promoting rhizobacteria induce biochemical alterations and develop resistance against water stress in wheat." *Physiologia Plantarum* 172.2 (2021): 990-1006. Doi:10.1111/ppl.13362
- 7 Yandigeri, Mahesh S., et al. "Drought-tolerant endophytic actinobacteria promote growth of wheat (*Triticum aestivum*) under water stress conditions." *Plant Growth Regulation* 68 (2012): 411-420. Doi:10.1007/s10725-012-9730-2
- 8 Llorens, Eugenio, et al. "Endophytes from wild cereals protect wheat plants from drought by alteration of physiological responses of the plants to water stress." *Environmental microbiology* 21.9 (2019): 3299-3312. doi.:10.1111/1462-2920.14530
- 9 Sonal, Mathur., Rupal, Singh, Tomar., Anjana, Jajoo. "Arbuscular Mycorrhizal fungi (AMF) protects photosynthetic apparatus of wheat under drought stress." *Photosynthesis Research*, 139 (2019):227-238. (doi: 10.1007/S11120-018-0538-4)
- 10 Muhammad, Latif., Syed, Asad, Hussain, Bukhari., A., Alrajhi., Fahad, E., Alotaibi., Maqshoof, Ahmad., Ahmad, Naeem, Shahzad., Ahmed, Z., Dewidar., Mohamed, A., Mattar. "Inducing Drought Tolerance in Wheat through Exopolysaccharide-Producing Rhizobacteria." *Agronomy*, 12 (2022):1140-1140. (doi: 10.3390/agronomy12051140)
- 11 Raza, Muhammad Aown Sammar, et al. "Amelioration of Drought Stress in Wheat by Using Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Biogas Slurry." Doi: 10.21203/rs.3.rs-3073631/v1 (2023).
- 12 Urooj, Rashid., Humaira, Yasmin., Muhammad, Nadeem, Hassan., Rabia, Naz., Asia, Nosheen., Muhammad, Sajjad., Noshin, Ilyas., Rumana, Keyani., Zahra, Jabeen., Saqib, Mumtaz., Mohammed, Nasser, Alyemeni., Parvaiz, Ahmad., Parvaiz, Ahmad. "Drought-tolerant *Bacillus megaterium* isolated from semi-arid conditions induces systemic tolerance of wheat under drought conditions." *Plant Cell Reports*, (2021):1-21. (doi: 10.1007/S00299-020-02640-X)
- 13 Firoz, Ahmad, Ansari., Musarrat, Jabeen., Iqbal, Ahmad. "Pseudomonas azotoformans FAP5, a novel biofilm-forming PGPR strain, alleviates drought stress in wheat plant." *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18 (2021):1-16. (doi: 10.1007/S13762-020-03045-9)
- 14 Amir, Khan., Ajay, Veer, Singh. "Multifarious effect of ACC deaminase and EPS producing *Pseudomonas* sp. and *Serratia marcescens* to augment drought stress tolerance and nutrient status of wheat." *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 37 (2021):1-17. (doi: 10.1007/S11274-021-03166-4)
- 15 Muhammad, Zafar-ul-Hye., Subhan, Danish., Mazhar, Abbas., Maqshoof, Ahmad., Tariq, Muhammad, Munir. "ACC Deaminase Producing PGPR *Bacillus amyloliquefaciens* and *Agrobacterium fabrum* along with Biochar Improve Wheat Productivity under Drought Stress." *Agronomy*, 9 (2019):343-. (doi: 10.3390/AGRONOMY9070343)
- 16 Iti, Gontia-Mishra., Swapnil, Sapre., Anubha, Sharma., Sharad, Tiwari. "Amelioration of drought tolerance in wheat by the interaction of plant growth-promoting rhizobacteria." *Plant Biology*, 18 (2016):992-1000. (doi: 10.1111/PLB.12505)

- 17 Naeem, Khan., Asghari, Bano., Muhammad, Shahid., Wajid, Nasim., Ali, Babar. "Interaction between PGPR and PGR for water conservation and plant growth attributes under drought condition." *Biology*, 73 (2018):1083-1098. (doi: 10.2478/S11756-018-0127-1)
- 18 Ye. A., Oleynikova., Zh. N., Ermekbay., G. V., Kerdjashkina., A. Zh., Alybaeva., A. A., Amangeldi., A. V., Chizhaeva., M. G., Saubenova., G. V., Kerdjashkina., M. E., Yelubaeva. "Endophytic microorganisms increasing wheat resistance to drought." *Mikrobiologîa žãne virusologîa*, (2022). (doi: 10.53729/mv-as.2022.01.06)
- 19 Deepti, Barnawal., Deepti, Barnawal., Nidhi, Bharti., Nidhi, Bharti., Shiv, Shanker, Pandey., Alok, Pandey., Chandan, S., Chanotiya., Alok, Kalra. "Plant growth-promoting rhizobacteria enhance wheat salt and drought stress tolerance by altering endogenous phytohormone levels and TaCTR1/TaDREB2 expression." *Physiologia Plantarum*, 161 (2017):502-514. (doi: 10.1111/PPL.12614)
- 20 Gontia-Mishra, Iti, et al. "Molecular diversity of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase producing PGPR from wheat (*Triticum aestivum* L.) rhizosphere." *Plant and soil* 414 (2017): 213-227. (Doi:10.1007/s11104-016-3119-3)
- 21 Leach, J. E., Triplett, L. R., Argueso, C. T., & Trivedi, P. "Communication in the phytobiome." *Cell* 169.4 (2017): 587-596.
- 22 Shultana, Rakiba, et al. "The PGPR mechanisms of salt stress adaptation and plant growth promotion." *Agronomy* 12.10 (2022): 2266.(doi: 10.3390/agronomy12102266)
- 23 Fadji, Ayomide Emmanuel, and Olubukola Oluranti Babalola. "Elucidating mechanisms of endophytes used in plant protection and other bioactivities with multifunctional prospects." *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8 (2020): 467. (doi: 10.3389/fbioe.2020.00467)
- 24 Lata, Rusi, et al. "Induction of abiotic stress tolerance in plants by endophytic microbes." *Letters in applied microbiology* 66.4 (2018): 268-276. (doi:10.1111/lam.12855)
- 25 Kour, Divjot, et al. "Rhizospheric microbiomes: biodiversity, mechanisms of plant growth promotion, and biotechnological applications for sustainable agriculture." *Plant growth promoting rhizobacteria for agricultural sustainability: from theory to practices* (2019): 19-65.
- 26 Arora, Naveen Kumar, et al. "Halo-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for improving productivity and remediation of saline soils." *Journal of Advanced Research* 26 (2020): 69-82. (doi: 10.1016/j.jare.2020.07.003)
- 27 Kumar, Pankaj, R. C. Dubey, and D. K. Maheshwari. "Bacillus strains isolated from rhizosphere showed plant growth promoting and antagonistic activity against phytopathogens." *Microbiological research* 167.8 (2012): 493-499. (doi: 10.1016/j.micres.2012.05.002)
- 28 Kumar, Pankaj, Satyajeet Khare, and R. C. Dubey. "Diversity of bacilli from disease suppressive soil and their role in plant growth promotion and yield enhancement." *New York Sci J* 5.1 (2012): 90-111.
- 29 Mitter, Eduardo K., et al. "Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: innovative biofertilizer technologies." *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5 (2021): 606815.(doi: 10.3389/fsufs.2021.606815)
- 30 Khan, M. A., et al. "Plant growth-promoting endophytic bacteria augment growth and salinity tolerance in rice plants." *Plant Biology* 22.5 (2020): 850-862. (doi:10.1111/plb.13124)
- 31 Arzoo, Ahad., Manal, Arshad., Namrah, Ahmad., Mahnoor, Ilyas., Tuba, Sharf, Batool., Mahnoor, Ejaz., Alvina, Gul., Munir, Ozturk. "Abiotic stress tolerance in wheat with emphasis on drought." *Journal of Cereal Research*, 14 (2022). (doi:10.25174/2582-2675/2022/126890)
- 32 Gizie, Abeje, Belay., Zhengbin, Zhang., Ping, Xu. "Physio-Morphological and Biochemical Trait-Based Evaluation of Ethiopian and Chinese Wheat Germplasm for Drought Tolerance at the Seedling Stage." *Sustainability*, 13 (2021):4605-. (doi: 10.3390/SU13094605)
- 33 Li, Zhongjiu. "Wheat compound fertilizer with functions of drought resistance and premature senescence prevention." (2017).
- 34 Ivo, Pavia., Luís, Rocha., José, Moutinho-Pereira., José, Lima-Brito., Carlos, Correia. "Screening for drought resistance during germination of modern and old Iberian wheat cultivars." *Acta Botanica Croatica*, 78 (2019):169-174. (doi: 10.2478/BOTCRO-2019-0012)
- 35 M., V., Sidorenko., S., V., Chebotar. "Genetic determination of drought resistance in common wheat (*Triticum aestivum* L.)." *Vîsnyk Ukraïns'kogo tovaristva genetîkiv ì selekcioneriv*, 20 (2023):31-47. (doi: 10.7124/visnyk.utgis.20.1-2.1511)
- 36 Muhammad, Naveed., Usama, Waheed. "Genomic advancement of wheat for climate-smart and drought-resistance variety: a review." *International journal of advanced research*, 11 (2023):361-372. (doi: 10.21474/ijar01/16431)

37 Elena, Todorvska., Stanislav, Kolev., Roxana, Nicolae., Ionica, Guinea., Nicolae, Saulescu. "Marker - assisted selection (mas) for drought tolerance in wheat using markers associated with membrane stability selectia asistată de markeri asociați stabilității membranelor pentru toleranța grâului la secetă." (2009).

38 Yavaş, İlkay, and Aydın Ünay. "Evaluation of some properties for drought resistance in bread Wheat." (2011).

39 Singh, Madhulika, Jai Gopal Sharma, and Bhoopander Giri. "Microbial inoculants alter resilience towards drought stress in wheat plants." *Plant Growth Regulation* 101.3 (2023): 823-843. (doi: 10.21203/rs.3.rs-2990489/v1)

40 Ali, Bahadur., Asfa, Batool., Fahad, Nasir., Fahad, Nasir., Shengjin, Jiang., Qin, Mingsen., Qi, Zhang., Jianbin, Pan., Yongjun, Liu., Huyuan, Feng. "Mechanistic Insights into Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Mediated Drought Stress Tolerance in Plants.." *International Journal of Molecular Sciences*, 20 (2019):4199-. (doi: 10.3390/IJMS20174199)

41 Izabela, Marcińska., Ilona, Czyczyło-Mysza., Edyta, Skrzypek., Maciej, T., Grzesiak., Franciszek, Janowiak., Maria, Filek., Michał, Dziurka., Kinga, Dziurka., Piotr, Waligórski., Katarzyna, Juzoń., Katarzyna, Cyganek., Stanisław, Grzesiak. "Alleviation of osmotic stress effects by exogenous application of salicylic or abscisic acid on wheat seedlings." *International Journal of Molecular Sciences*, 14 (2013):13171-13193. (doi: 10.3390/IJMS140713171)

42 Mohammad-Reza, Sarafraz-Ardakani., Ramazan, Ali, Khavari-Nejad., Foad, Moradi., Farzaneh, Najafi. "Abscisic Acid and Cytokinin-Induced Osmotic and Antioxidant Regulation in Two Drought-Tolerant and Drought-Sensitive Cultivars of Wheat During Grain Filling Under Water Deficit in Field Conditions." *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj- napoca*, 6 (2014):354-362. (doi: 10.15835/NSB.6.3.9301)

43 Ankita, Pandey., Rinki, Khobra., H., M., Mamrutha., Zeenat, Wadhwa., Gopalareddy, Krishnappa., Gyanendra, Singh. "Elucidating the Drought Responsiveness in Wheat Genotypes." *Sustainability*, 14 (2022):3957-3957. (doi: 10.3390/su14073957)

44 Koua, Ahossi Patrice, et al. "Breeding driven enrichment of genetic variation for key yield components and grain starch content under drought stress in winter wheat." *Frontiers in Plant Science* 12 (2021): 684205. (doi: 10.22541/au.164864945.52920985/v1)

45 Leila, Nasirzadeh., Behzad, Sorkhilaleloo., Eslam, Majidi, Hervan., Foad, Fatehi. "Changes in antioxidant enzyme activities and gene expression profiles under drought stress in tolerant, intermediate, and susceptible wheat genotypes." *Cereal Research Communications*, 49 (2021):83-89. (doi: 10.1007/S42976-020-00085-2)

46 Singh, Madhulika, Jai Gopal Sharma, and Bhoopander Giri. "Microbial inoculants alter resilience towards drought stress in wheat plants." *Plant Growth Regulation* 101.3 (2023): 823-843. (doi: 10.21203/rs.3.rs-2990489/v1)

47 Shifa, Shaffique., Muhammad, Imran., Sang-Mo, Kang., Muhammad, Aaqil, Khan., Sajjad, Asaf., Won-Chan, Kim., In-Jung, Lee. "Seed Bio-priming of wheat with a novel bacterial strain to modulate drought stress in Daegu, South Korea." *Frontiers in Plant Science*, 14 (2023). (doi: 10.3389/fpls.2023.1118941)

48 Ana, Paula, Rosa., Teresa, Cristina, Albuquerque, de, Castro, Dias., Abdul, Mounem, Mouazen., Cristina, Cruz., Margarida, Santana. "Finding optimal microorganisms to increase crop productivity and sustainability under drought – a structured reflection." *Journal of Plant Interactions*, 18 (2023). (doi: 10.1080/17429145.2023.2178680)

49 Leila, Karimzad., Reza, Khakvar., Mehdi, Younessi-Hamzekhanlu., Majid, Norouzi., M, Amani., Nasrin, Sabourmoghaddam. "Drought tolerance induction in wheat by inoculation of seeds with a novel growth-promoting bacteria." *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 47 (2023):102594-102594. (doi: 10.1016/j.bcab.2022.102594)

50 Faqeer, Muhammad., Muhammad, Aown, Sammar, Raza., Rashid, Iqbal., Faisal, Zulfiqar., Muhammad, Aslam., Jean, Wan, Hong, Yong., Muhammad, Ahsan, Altaf., Bilal, Zulfiqar., Jawad, Amin., Muhammad, Ibrahim. "Ameliorating Drought Effects in Wheat Using an Exclusive or Co-Applied Rhizobacteria and ZnO Nanoparticles." *Biology*, 11 (2022):1564-1564. (doi: 10.3390/biology11111564)

51 Raza, Muhammad Aown Sammar, et al. "Amelioration of Drought Stress in Wheat by Using Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Biogas Slurry." (2023). (doi: 10.21203/rs.3.rs-3073631/v1)

52 Muhammad, Latif., Syed, Asad, Hussain, Bukhari., A., Alrajhi., Fahad, E., Alotaibi., Maqshoof, Ahmad., Ahmad, Naeem, Shahzad., Ahmed, Z., Dewidar., Mohamed, A., Mattar. "Inducing Drought

Tolerance in Wheat through Exopolysaccharide-Producing Rhizobacteria." *Agronomy*, 12 (2022):1140-1140. (doi: 10.3390/agronomy12051140)

53 Marcia, Barquero., Jorge, Poveda., Ana, M., Laureano-Marín., Noemí, Ortiz-Liébana., Javier, Brañas., Fernando, González-Andrés. "Mechanisms involved in drought stress tolerance triggered by rhizobia strains in wheat." *Frontiers in Plant Science*, 13 (2022). (doi: 10.3389/fpls.2022.1036973)

54 E., Pattey, And, Y., Karimi., Nasser, Aliasghar zad., Ezatollah, Esfandiari., Mohammad, Bagher, Hassanpouraghdam., Thomas, R., Neu., François, Buscot., Thomas, Reitz., Claudia, Breitzkreuz., Mika, T., Tarkka. "Biofilm forming rhizobacteria affect the physiological and biochemical responses of wheat to drought." *AMB Express*, 12 (2022). (doi: 10.1186/s13568-022-01432-8)

55 E., Pattey, And, Y., Karimi., Nasser, Aliasghar zad., Ezatollah, Esfandiari., Mohammad, Bagher, Hassanpouraghdam., Thomas, R., Neu., François, Buscot., Thomas, Reitz., Claudia, Breitzkreuz., Mika, T., Tarkka. "Biofilm forming rhizobacteria affect the physiological and biochemical responses of wheat to drought." *AMB Express*, 12 (2022). (doi: 10.1186/s13568-022-01432-8)

56 Shifa, Shaffique., Muhamad, Aaqil, Khan., Muhamad, Ali, Imran., Sang-Mo, Kang., Yong-Sung, Park., Shabir, H., Wani., In-Jung, Lee. "Research Progress in the Field of Microbial Mitigation of Drought Stress in Plants." *Frontiers in Plant Science*, 13 (2022). (doi: 10.3389/fpls.2022.870626)

57 Manoj, Kaushal., Suhas, P., Wani. "Plant-growth-promoting rhizobacteria: drought stress alleviators to ameliorate crop production in drylands." *Annals of Microbiology*, 66 (2016):35-42. (doi: 10.1007/S13213-015-1112-3)

58 Firoz, Ahmad, Ansari., Musarrat, Jabeen., Iqbal, Ahmad. "Pseudomonas azotoformans FAP5, a novel biofilm-forming PGPR strain, alleviates drought stress in wheat plant." *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18 (2021):1-16. (doi: 10.1007/S13762-020-03045-9)

59 Manoj, Kaushal. "Microbes in Cahoots with Plants: MIST to Hit the Jackpot of Agricultural Productivity during Drought." *International Journal of Molecular Sciences*, 20 (2019):1769-. (doi: 10.3390/IJMS20071769)

60 Ayomide, Emmanuel, Fadiji., Ma., del, Carmen, Orozco-Mosqueda., Sergio, de, los, Santos-Villalobos., Gustavo, Santoyo., Olubukola, Oluranti, Babalola. "Recent Developments in the Application of Plant Growth-Promoting Drought Adaptive Rhizobacteria for Drought Mitigation." *Plants*, 11 (2022):3090-3090. (doi: 10.3390/plants11223090)

61 Jochum, Michael D., et al. "Host-mediated microbiome engineering (HMME) of drought tolerance in the wheat rhizosphere." *Plos one* 14.12 (2019): e0225933.

62 Mathur, Piyush, and Swarnendu Roy. "Insights into the plant responses to drought and decoding the potential of root associated microbiome for inducing drought tolerance." *Physiologia Plantarum* 172.2 (2021): 1016-1029.

63 Abid, Ullah., Mohammad, Nisar., Hazrat, Ali., Ali, Hazrat., Kashif, Hayat., Ayaz, Ali, Keerio., Muhammad, Ihsan., Muhammad, Laiq., Sana, Ullah., Shah, Fahad., Aziz, Khan., Aamir, Hamid, Khan., Adnan, Akbar., Xiyan, Yang. "Drought tolerance improvement in plants: an endophytic bacterial approach." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103 (2019):7385-7397. (doi: 10.1007/S00253-019-10045-4)

64 Franciska, T., de, Vries., Franciska, T., de, Vries., Robert, I., Griffiths., Christopher, Knight., O., Nicolitch., Alex, Williams. "Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production." *Science*, 368 (2020):270-274. (doi: 10.1126/SCIENCE.AAZ5192)

65 Muhammad, Siddique, Afridi., Sher, Ali., Abdul, Salam., Willian, César, Terra., A., Hafeez., Sumaira., Baber, Ali., Mona, S., AlTami., Fuad, Ameen., Sezai, Ercisli., Romina, Alina, Marc., Flávio, Henrique, Vasconcelos, de, Medeiros., R, Karunakaran. "Plant Microbiome Engineering: Hopes or Hypes." *Biology*, 11 (2022):1782-1782. (doi: 10.3390/biology11121782)

66 Nathan, Vannier., Matthew, T., Agler., Stéphane, Hacquard. "Microbiota-mediated disease resistance in plants." *PLOS Pathogens*, 15 (2019). (doi: 10.1371/JOURNAL.PPAT.1007740)

67 Jochum, Michael D., et al. "Host-mediated microbiome engineering (HMME) of drought tolerance in the wheat rhizosphere." *Plos one* 14.12 (2019): e0225933.

С.В. МАКСИМОВИЧ¹, Ж.Н. ЕРМЕКБАЙ¹, Э.Т. ХАМЕДОВА¹, Е.А. ОЛЕЙНИКОВА¹,
М.Г. САУБЕНОВА¹, И.Ю. ПОТОРОКО²

¹Микробиология және вирусология ғылыми-өндiрiстiк орталығы, Алматы, Қазақстан

²Оңтүстік-Орал мемлекеттік университеті, Челябинск, Ресей

*e-mail: seveg@ya.ru

БИДАЙДЫҢ ҚҰРАҚҚАҒА ТІЗІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН СИМБИОТТЫҚ МИКРОБИОТАЛАРДЫ ҚОЛДАНУ ӘЛЕУЕТІ

Түйін

Соңғы кездердегі климаттың өзгеруі ауылшаруалықтың өнімділігіне айтарлықтай әсер етіп, зерттеушілерді өсімдіктер мен микроорганизмдер арасындағы күрделі өзара әрекеттесулерді зерттеуге итермеледі. Бұл мақалада микробтық қауымдастықтардың, соның ішінде өсімдіктердің өсуіне ықпал ететін бактериялардың (PGPB), эндофиттердің және арбускулярлы микоризальды саңырауқұлақтардың (AMF) бидайдың құрғақшылыққа төзімділігін арттыруға терең әсері қарастырылады. Бұл микроорганизмдер өсімдіктердің өсуін ынталандыруда, өнімділікті арттыруда және стресс факторларына төзімділік беруде маңызды рөл атқарады. Тамыр мен өркеннің өсуін, фотосинтетикалық белсенділікті және антиоксиданттық белсенділікті жақсарту сияқты әртүрлі механизмдер арқылы микробтық симбионттар бидайдың құрғақшылыққа төзімділігін арттыруға көмектеседі. Құрғақшылыққа төзімді микроорганизмдерді мақсатты қолдану бидайдың құрғақшылыққа төзімділігін арттыру және климаттың өзгеруі жағдайында ауыл шаруашылығының тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін перспективалы стратегияларды ұсынады. Бұл зерттеулер құрғақ жағдайларға төтеп бере алатын төзімді бидай сорттарын жасау үшін микробтық симбионттарды пайдаланудың маңыздылығын көрсетеді, осылайша құрғақ климаты бар аймақтардағы азық-түлік қауіпсіздігі мәселелерін шешеді.

Кілтті сөздер: құрғақшылыққа төзімділік, бидай, симбиотикалық микробиома.

МРНТИ: 34.27.51; 68.39.15

С.В. МАКСИМОВИЧ¹, Ж.Н. ЕРМЕКБАЙ¹, Э.Т. ХАМЕДОВА¹, Е.А. ОЛЕЙНИКОВА¹,
М.Г. САУБЕНОВА¹, И.Ю. ПОТОРОКО²

¹Научно-производственный центр микробиологии и вирусологии, Алматы, Казахстан

²Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

*e-mail: seveg@ya.ru

ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИМБИОТИЧЕСКОЙ МИКРОБИОТЫ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТИ ПШЕНИЦЫ

doi:10.53729/MV-AS.2024.02.01

Аннотация

Последние изменения климата значительно повлияли на сельскохозяйственную продуктивность, побудив исследователей изучать сложные взаимодействия между растениями и микроорганизмами. В данной статье рассматривается глубокое влияние микробных союзников, включая бактерии, способствующие росту растений (PGPB), эндофиты и арбускулярные микоризные грибы (AMF), на повышение устойчивости пшеницы к засухе. Эти микроорганизмы играют ключевые роли в стимулировании роста растений, увеличении продуктивности и придании устойчивости к стрессовым факторам. Через различные механизмы, такие как улучшение роста корней и побегов, фотосинтетической активности и антиоксидантной активности, микробные симбионты способствуют укреплению устойчивости пшеницы к засухе. Направленное применение микроорганизмов, устойчивых к засухе, предлагает многообещающие стратегии для повышения устойчивости пшеницы к засухе и обеспечения устойчивости сельского хозяйства в условиях изменяющегося климата. Эти исследования подчеркивают важность использования микробных

симбионтов для разработки устойчивых сортов пшеницы, способных выдерживать засушливые условия, тем самым решая проблемы продовольственной безопасности в регионах с засушливым климатом.

Ключевые слова: засухоустойчивость, пшеница, симбиотический микробиом.

В области сельского хозяйства стремление к созданию устойчивых решений для борьбы с вызовами, созданными изменением климата, особенно засухой, привело исследователей к изучению сложного мира взаимодействия растений с микроорганизмами. Ризосфера, динамическая зона, которая кишит разнообразными микроорганизмами, привлеченными корневыми экссудатами, имеет огромный потенциал для формирования здоровья растений и их устойчивости [1]. Эта статья глубоко исследует трансформационную роль микробных союзников, включая бактерии, способствующие росту растений (PGPR), эндофиты и арбузкулярные микоризные грибы (AMF), в укреплении устойчивости пшеницы к засухе.

Симбиотические отношения между растениями и микробами в ризосфере представляют собой захватывающее взаимодействие, которое значительно влияет на рост растений и их устойчивость к стрессу. Исследования подчеркивают динамичный характер микробиома ризосферы, который адаптируется к стрессорам окружающей среды, таким как засуха, влияя на акклиматизацию растений [2]. Корневые экссудаты играют ключевую роль в формировании микробного сообщества, при этом конкретные микробы демонстрируют усиленный рост в условиях стресса, тем самым способствуя выживанию растений [3,4].

Использование PGPR выдвинулось как многообещающая стратегия для улучшения устойчивости пшеницы к засухе [2,5]. Различные штаммы PGPR были выявлены благодаря их способности улучшать рост пшеницы в условиях засухи за счет таких механизмов, как продукция экзополисахаридов, индол-3-уксусной кислоты и АСС-дезаминазы. Эти полезные бактерии не только улучшают морфологию корней и силу роста, но и способствуют растворению необходимых питательных веществ, синтезу растительных гормонов и увеличению активности антиоксидантных ферментов, что в совокупности способствует увеличению устойчивости к засухе у пшеницы [6].

Эндофитные микроорганизмы, обитающие в тканях растений, не причиняя вреда, также выступают как мощные союзники в поощрении роста и устойчивости растений. Эндофиты эффективно стимулируют рост растений, увеличивают производительность и обеспечивают ненаправленную устойчивость к стрессовым факторам [7]. Поддерживая осмотическую регуляцию и активность антиоксидантов в клетках растений-хозяев, эндофиты играют ключевую роль в повышении толерантности пшеницы к сильной засухе [8].

Кроме того, симбиотические отношения между пшеницей и арбузкулярными микоризными грибами (AMF) значительно увеличивают водоотбор и устойчивость к стрессу у растений. Колонизация AMF улучшает водные отношения пшеницы, смягчает повреждения фотосинтетического аппарата, вызванные засухой, и увеличивает доступность влаги и эффективность фотосинтеза у растения в условиях ограниченного водопотребления [9].

Влияние PGPR на устойчивость пшеницы к засухе

Инокуляция PGPR улучшает биохимические параметры, такие как содержание хлорофилла, пролина, общий растворимый сахар и содержание белка в пшенице при стрессе засухи, что указывает на улучшение физиологического состояния. Обработка PGPR снижает окислительные повреждения в пшенице путем снижения накопления малондиальдегида (MDA), маркера повреждения мембраны во время засухи [18]. Особые штаммы PGPR значительно улучшают параметры роста пшеницы, такие как длина побегов и корней, вес и количество корней в условиях засухи, демонстрируя свою роль в улучшении эффектов засухи. Инокуляция PGPR модулирует экспрессию генов, реагирующих на засуху

(DREB2A и CAT1) в пшенице, что указывает на генетическую основу повышенной устойчивости к засухе [19]. Инокуляция PGPR увеличивает содержание хлорофилла, пролина, общего растворимого сахара и белка в пшенице при засухе. Снижение оксидативных повреждений за счет снижения накопления малондиальдегида в обработанной PGPR пшенице указывает на улучшенную устойчивость к засухе.

Инокуляция PGPR приводит к значительному улучшению сухой массы корней и побегов в различных сортах пшеницы при стрессе засухи. Обработка PGPR приводит к лучшему росту корней, способствуя увеличению усвоения питательных веществ и воды. Инокуляция PGPR модулирует экспрессию генов, реагирующих на засуху, включая увеличение экспрессии DREB2A и CAT1, усиливая устойчивость к засухе. Сниженные уровни транскриптов генов, связанных со стрессом, в PGPR-инокулированных растениях свидетельствуют об улучшенной устойчивости к засухе благодаря взаимодействию с PGPR. Митигация засухи с помощью PGPR хорошо наблюдалась у пшеничных растений, инокулированных *Klebsiella sp.*, *Enterobacter ludwigii* и *Flavobacterium sp.* [19]. Пшеничные растения, инокулированные штаммами PGPR, также проявили лучший вегетативный рост, высокое значение RWC, низкое содержание MDA, увеличенную аккумуляцию пролина, а также других связанных со стрессом метаболитов [19].

Эндофиты

Эндофитные микроорганизмы, обитающие в тканях растений, не нанося им вреда, стали мощными союзниками, способствующими росту и устойчивости растений. По сравнению с ризосферными бактериями, эндофиты демонстрируют большую эффективность в стимулировании роста растений, увеличении продуктивности, защите от загрязнителей окружающей среды, поставке важных минералов и защите от болезней, патогенов и вредителей [20, 21]. Этот уникальный партнерский союз между растениями и эндофитами привлек значительный интерес исследователей.

Хотя тонкие детали этих взаимодействий остаются под вопросом, недавние исследования подчеркивают важную роль эндофитов в усилении неспецифической устойчивости растений к различным стрессовым факторам [22]. Эндофиты могут стимулировать рост растений даже в условиях сильной засухи, способствуя осмотической регуляции и антиоксидантной активности в клетках растений-хозяев [23, 24]. Например, эндофитные грибы были показаны, как способные увеличить устойчивость пшеницы к засухе и жаре [25]. Точно так же, эндофитные штаммы *Bacillus subtilis* проявили защитное действие против множества стрессоров окружающей среды, включая тяжелые металлы, соленость и засуху [26, 27, 28]. Отмечено, что исследователи успешно использовали эндофиты для придания теплостойкости соевым растениям [29].

Несмотря на эти достижения, полное понимание механизмов, регулирующих мутуализм между эндофитными бактериями и растениями, остается неясным. Необходим комплексный подход к исследованию для выяснения конкретных действий эндофитных бактериальных штаммов на растения в условиях стресса. Этот подход также должен исследовать, как эндофиты взаимодействуют с другими полезными микроорганизмами внутри растения, что может привести к синергетическим эффектам в продвижении здоровья растений и устойчивости к стрессу. Погружаясь глубже в эти сложные взаимодействия, исследователи могут раскрыть полный потенциал эндофитов для устойчивого сельского хозяйства в условиях изменяющегося климата.

Арбускулярные микоризные грибы (AMF)

Арбускулярные микоризные грибы (AMF) играют ключевую роль в усилении устойчивости пшеницы к засухе, устанавливая симбиотические отношения, которые улучшают водопоглощение растения и его толерантность к стрессу. Метод, включающий использование грибов AM, в частности *Glomus monosporum* и *Acaulospora laevis*, показал, что он способствует росту пшеницы и улучшает ее адаптивность к засухе путем создания

благоприятной симбиоза в контролируемых условиях [30]. Это дополнительно подтверждается экспериментальными данными, демонстрирующими, что колонизация АМФ может смягчить повреждение фотосинтетического аппарата пшеницы, вызванное засухой, что приводит к увеличению относительного содержания воды как в листьях, так и в почве, тем самым увеличивая доступность влаги для растения и поддерживая его эффективность фотосинтеза при засухе [31]. Значимость разработки устойчивых к засухе сортов пшеницы подчеркивается вызовами, стоящими перед климатическими изменениями, которые ожидают уменьшить доступность воды и усугубить условия засухи в областях, где выращивается пшеница. Генетическое разнообразие среди сортов пшеницы, включая древние сорта, предлагает потенциал для улучшения устойчивости к засухе. Например, древний португальский сорт 'Местико' показал многообещающую раннюю устойчивость к засухе и генетическую уникальность, что указывает на наличие уникальных характеристик, полезных для прорастания и роста в сухих условиях [9]. Более того, изучение генетических детерминантов и молекулярных механизмов, лежащих в основе устойчивости к засухе у пшеницы, подчеркнуло регуляторную роль абсцизовой кислоты (АВА) и участие различных транскрипционных факторов и осмопротектантов в реакции растения на дефицит воды [32]. Это молекулярное понимание дополняет практические подходы к повышению толерантности к засухе, такие как выбор устойчивых к засухе генотипов на основе признаков семян при имитированном стрессе от засухи [33] и разработка смесей удобрений для пшеницы, призванных улучшить устойчивость к засухе [34]. В целом, интеграция симбиоза АМФ с генетическими и молекулярными стратегиями предлагает комплексный подход к усилению устойчивости пшеницы к засухе, что является важным для поддержания продуктивности в условиях увеличивающегося стресса от засухи вследствие изменения климата [35, 36, 37].

Целенаправленное применение микроорганизмов

Целенаправленное применение микроорганизмов, устойчивых к засухе, включая бактерии, способствующие росту растений (РГРВ), грибы арбузкулярной микоризы (АМФ) и определенные виды бактерий, показало существенное повышение устойчивости пшеницы к засухе за счет различных механизмов. Эти микроорганизмы улучшают морфологические, физико-биохимические и ультраструктурные характеристики пшеницы в условиях засухи, улучшая рост корней и побегов, фотосинтетическую активность и способствуя накоплению осмопротекторов и антиоксидантов, тем самым снижая окислительный стресс и улучшая водопоглощение и почвенное усвоение питательных веществ [46]. Например, новый ризосферный бактериум SH-8, выделенный из ризосферной почвы растений *Artemisia*, продемонстрировал высокую толерантность к окислительному стрессу и значительно усилил устойчивость к засухе и потенциал всхожести семян пшеницы через биопропитку, указывая на его потенциал в качестве биоудобрения в условиях засухи [47]. Аналогично, были предложены стратегии выбора адаптированных к засухе ризомикробиомов и целевых ассоциаций PGPR для повышения устойчивости растений к засухе, подчеркивая важность селекции, осуществляемой хозяином, и интегрированный анализ на уровне омикс для оптимального выбора PGPR [48]. Исследования также выявили определенные виды бактерий, такие как *Bacillus wiedmannii*, которые повышают устойчивость пшеницы к засухе при обработке семян, подчеркивая роль PGPR в увеличении урожайности растений при абиотическом стрессе [49]. Кроме того, совместное применение *Azospirillum brasilense* и наночастиц ZnO также обнаружено синергическое увеличение продуктивности пшеницы при засухе за счет улучшения водного режима, синтеза хлорофилла и активности антиоксидантов [50, 51]. Выделенные PGPR, производящие экзополисахариды (EPS), такие как штаммы *Chryseobacterium sp.*, *Acinetobacter sp.* и *Klebsiella sp.*, показали потенциал в индукции толерантности к засухе у пшеницы за счет улучшения корневой морфологии и роста всходов [52]. Более того, штаммы *Rhizobium leguminosarum* были обнаружены в уменьшении стресса от засухи у пшеницы путем улучшения параметров роста, содержания

хлорофилла и уменьшения маркеров окислительного стресса [53]. Изоляты бактерий, формирующие биопленки из почв аридных лугов, также продемонстрировали способность стимулировать рост пшеницы при дефиците воды за счет улучшения корневых характеристик и антиоксидантной системы защиты [54, 55].

Практическое применение различных бактерий и грибов для усиления устойчивости пшеницы к засухе включает использование благоприятных микробных сообществ для поддержки роста и устойчивости растений в условиях дефицита воды [56]. Например, использование ризобактерий, способствующих росту растений (PGPR), и микоризных грибов может значительно улучшить эффективность усвоения питательных веществ, увеличить производство биомассы и повысить устойчивость к засухе в культурах пшеницы [57]. Определенные микроорганизмы, такие как *Enterobacter cloacae*, *Achromobacter xylosoxidans* и *Mortierella alpina*, были выделены за их способность стимулировать рост растений, увеличивать эффективность фотосинтеза и синтезировать росто-стимулирующие соединения, что в конечном итоге помогает растениям пшеницы справляться со стрессом от засухи [58]. Путем использования механизмов повышения устойчивости к засухе за счет микробиома фермеры и исследователи могут применять эти благоприятные бактерии и грибы для выращивания устойчивых к засухе сортов пшеницы с улучшенной биомассой корней и побегов, содержанием питательных веществ и общей устойчивостью к дефициту воды [59, 60].

Потенциал устойчивых к засухе микроорганизмов в усилении растительной устойчивости к осмотическому стрессу хорошо документирован, и следующим шагом является их трансляция из лабораторных условий в полевые условия через разработку микробиологических биоудобрений [61]. Эффективные формуляции биоудобрений должны содержать метаболически активные организмы, иметь длительный срок годности и быть экологически безопасными и биodeградируемыми [62]. Применение микориз в сочетании с азотобактером и азоспириллой показало увеличение биомассы корней и побегов, пролина, каротиноидов, эфирных масел, азота и калия в *Valeriana officinalis* при стрессе от засухи [63]. Биоформуляция, состоящая из *Enterobacter cloacae*, *Achromobacter xylosoxidans*, *Leclercia adecarboxylata* и древесного отхода биоугля, значительно улучшила устойчивость к засухе кукурузы, что подтверждается увеличением скорости роста, урожайности, коэффициента газообмена и концентрации фотосинтетических пигментов [64].

Хозяйственное-медиации инжиниринг микробиома (НММЕ) - это метод, при котором ученые используют растения для естественного отбора полезных микроорганизмов в почве с целью улучшения способности растения справляться с сухими условиями, выращивая растения в этих условиях и выбирая лучшие виды для разведения следующего поколения растений с благоприятным почвенным сообществом [65]. Этот процесс включает смешивание почвы вокруг корней лучших растений с безопасной почвой и использование этой смеси для выращивания следующего поколения растений с целью повышения устойчивости к засухе через несколько циклов [66]. В ходе лабораторных экспериментов НММЕ обеспечил отсрочку в 5 дней появления симптомов стресса от засухи у всходов пшеницы, что указывает на повышенную устойчивость к засухе. Инокуляция НММЕ значительно увеличила биомассу растений, сухую массу корней, общую длину корней и площадь поверхности [67].

Заключение

Использование микробных помощников открывает перспективные возможности для улучшения устойчивости пшеницы к засухе в условиях изменяющегося климата. Синергетические взаимодействия между растениями и благоприятными микробами пролаживают путь к устойчивым, биооснованным стратегиям для обеспечения продовольственной безопасности в регионах, подверженных засушливым условиям. Разблокировав полный потенциал микробных союзников, исследователи и фермеры могут

выращивать устойчивые сорта пшеницы, способные выдерживать тяготы стресса от засухи, тем самым обеспечивая сельскохозяйственную продуктивность в изменяющемся климатическом ландшафте. Направленное применение устойчивых к засухе микроорганизмов, включая RGPB, AMF и определенные бактериальные штаммы, предлагает перспективный подход к улучшению устойчивости пшеницы к засухе. Путем улучшения роста корней и побегов, скорости фотосинтеза и активности антиоксидантов эти микроорганизмы способствуют улучшению роста, устойчивости к стрессу и урожайности в условиях ограниченного доступа к воде.

Литература:

- 1 Holly, Hone., Ross, Mann., Guodong, Yang., Jatinder, Kaur., Tannenbaum, Ian, Ross., Tongda, Li., German, Spangenberg., Tim, Sawbridge. "Profiling, isolation and characterisation of beneficial microbes from the seed microbiomes of drought tolerant wheat." *Scientific Reports*, 11 (2021):11916-11916. (doi: 10.1038/S41598-021-91351-8)
- 2 Zhaoyu, Kong., Hongguang, Liu. "Modification of Rhizosphere Microbial Communities: A Possible Mechanism of Plant Growth Promoting Rhizobacteria Enhancing Plant Growth and Fitness." *Frontiers in Plant Science*, 13 (2022). (doi: 10.3389/fpls.2022.920813)
- 3 Yalin, Chen., Zongmu, Yao., Yu, Sun., Enze, Wang., Chunjie, Tian., Yang, Sun., Juan, Liu., Chunyu, Sun., Lei, Tian. "Current Studies of the Effects of Drought Stress on Root Exudates and Rhizosphere Microbiomes of Crop Plant Species." *International Journal of Molecular Sciences*, 23 (2022):2374-2374. (doi: 10.3390/ijms23042374)
- 4 M., D., Mashabela., Lizelle, A., Piater., Ian, A., Dubery., Fidele, Tugizimana., Msizi, I., Mhlongo. "Rhizosphere Tripartite Interactions and PGPR-Mediated Metabolic Reprogramming towards ISR and Plant Priming: A Metabolomics Review." *Biology*, 11 (2022):346-346. (doi: 10.3390/biology11030346)
- 5 Sharma, Sandeep, and Kailash Chand Kumawat. "Role of rhizospheric microbiome in enhancing plant attributes and soil health for sustainable agriculture." *Core microbiome: improving crop quality and productivity* (2022): 139-162. (doi: 10.1002/9781119830795.ch8)
- 6 Zia, Rabisa, et al. "Seed inoculation of desert-plant growth-promoting rhizobacteria induce biochemical alterations and develop resistance against water stress in wheat." *Physiologia Plantarum* 172.2 (2021): 990-1006. Doi:10.1111/pp1.13362
- 7 Yandigeri, Mahesh S., et al. "Drought-tolerant endophytic actinobacteria promote growth of wheat (*Triticum aestivum*) under water stress conditions." *Plant Growth Regulation* 68 (2012): 411-420. Doi:10.1007/s10725-012-9730-2
- 8 Llorens, Eugenio, et al. "Endophytes from wild cereals protect wheat plants from drought by alteration of physiological responses of the plants to water stress." *Environmental microbiology* 21.9 (2019): 3299-3312. doi:10.1111/1462-2920.14530
- 9 Sonal, Mathur., Rupal, Singh, Tomar., Anjana, Jajoo. "Arbuscular Mycorrhizal fungi (AMF) protects photosynthetic apparatus of wheat under drought stress." *Photosynthesis Research*, 139 (2019):227-238. (doi: 10.1007/S11120-018-0538-4)
- 10 Muhammad, Latif., Syed, Asad, Hussain, Bukhari., A., Alrajhi., Fahad, E., Alotaibi., Maqshoof, Ahmad., Ahmad, Naeem, Shahzad., Ahmed, Z., Dewidar., Mohamed, A., Mattar. "Inducing Drought Tolerance in Wheat through Exopolysaccharide-Producing Rhizobacteria." *Agronomy*, 12 (2022):1140-1140. (doi: 10.3390/agronomy12051140)
- 11 Raza, Muhammad Aown Sammar, et al. "Amelioration of Drought Stress in Wheat by Using Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Biogas Slurry." Doi: 10.21203/rs.3.rs-3073631/v1 (2023).
- 12 Urooj, Rashid., Humaira, Yasmin., Muhammad, Nadeem, Hassan., Rabia, Naz., Asia, Nosheen., Muhammad, Sajjad., Noshin, Ilyas., Rumana, Keyani., Zahra, Jabeen., Saqib, Mumtaz., Mohammed, Nasser, Alyemeni., Parvaiz, Ahmad., Parvaiz, Ahmad. "Drought-tolerant *Bacillus megaterium* isolated from semi-arid conditions induces systemic tolerance of wheat under drought conditions." *Plant Cell Reports*, (2021):1-21. (doi: 10.1007/S00299-020-02640-X)
- 13 Firoz, Ahmad, Ansari., Musarrat, Jabeen., Iqbal, Ahmad. "Pseudomonas azotoformans FAP5, a novel biofilm-forming PGPR strain, alleviates drought stress in wheat plant." *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18 (2021):1-16. (doi: 10.1007/S13762-020-03045-9)
- 14 Amir, Khan., Ajay, Veer, Singh. "Multifarious effect of ACC deaminase and EPS producing *Pseudomonas* sp. and *Serratia marcescens* to augment drought stress tolerance and nutrient status of wheat." *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 37 (2021):1-17. (doi: 10.1007/S11274-021-03166-4)
- 15 Muhammad, Zafar-ul-Hye., Subhan, Danish., Mazhar, Abbas., Maqshoof, Ahmad., Tariq, Muhammad, Munir. "ACC Deaminase Producing PGPR *Bacillus amyloliquefaciens* and *Agrobacterium fabrum*

along with Biochar Improve Wheat Productivity under Drought Stress." *Agronomy*, 9 (2019):343-. (doi: 10.3390/AGRONOMY9070343)

16 Iti, Gontia-Mishra., Swapnil, Sapre., Anubha, Sharma., Sharad, Tiwari. "Amelioration of drought tolerance in wheat by the interaction of plant growth-promoting rhizobacteria." *Plant Biology*, 18 (2016):992-1000. (doi: 10.1111/PLB.12505)

17 Naeem, Khan., Asghari, Bano., Muhammad, Shahid., Wajid, Nasim., Ali, Babar. "Interaction between PGPR and PGR for water conservation and plant growth attributes under drought condition." *Biologia*, 73 (2018):1083-1098. (doi: 10.2478/S11756-018-0127-1)

18 Ye. A., Oleynikova., Zh. N., Ermekbay., G. V., Kerdjashkina., A. Zh., Alybaeva., A. A., Amangeldi., A. V., Chizhaeva., M. G., Saubenova., G. V., Kerdjashkina., M. E., Yelubaeva. "Endophytic microorganisms increasing wheat resistance to drought." *Mikrobiologîâ žǎne virusologîâ*, (2022). (doi: 10.53729/mv-as.2022.01.06)

19 Deepti, Barnawal., Deepti, Barnawal., Nidhi, Bharti., Nidhi, Bharti., Shiv, Shanker, Pandey., Alok, Pandey., Chandan, S., Chanotiya., Alok, Kalra. "Plant growth-promoting rhizobacteria enhance wheat salt and drought stress tolerance by altering endogenous phytohormone levels and TaCTR1/TaDREB2 expression." *Physiologia Plantarum*, 161 (2017):502-514. (doi: 10.1111/PPL.12614)

20 Gontia-Mishra, Iti, et al. "Molecular diversity of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase producing PGPR from wheat (*Triticum aestivum* L.) rhizosphere." *Plant and soil* 414 (2017): 213-227. (Doi:10.1007/s11104-016-3119-3)

21 Leach, J. E., Triplett, L. R., Argueso, C. T., & Trivedi, P. "Communication in the phytobiome." *Cell* 169.4 (2017): 587-596.

22 Shultana, Rakiba, et al. "The PGPR mechanisms of salt stress adaptation and plant growth promotion." *Agronomy* 12.10 (2022): 2266. (doi: 10.3390/agronomy12102266)

23 Fadiji, Ayomide Emmanuel, and Olubukola Oluranti Babalola. "Elucidating mechanisms of endophytes used in plant protection and other bioactivities with multifunctional prospects." *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8 (2020): 467. (doi: 10.3389/fbioe.2020.00467)

24 Lata, Rusi, et al. "Induction of abiotic stress tolerance in plants by endophytic microbes." *Letters in applied microbiology* 66.4 (2018): 268-276. (doi:10.1111/lam.12855)

25 Kour, Divjot, et al. "Rhizospheric microbiomes: biodiversity, mechanisms of plant growth promotion, and biotechnological applications for sustainable agriculture." *Plant growth promoting rhizobacteria for agricultural sustainability: from theory to practices* (2019): 19-65.

26 Arora, Naveen Kumar, et al. "Halo-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for improving productivity and remediation of saline soils." *Journal of Advanced Research* 26 (2020): 69-82. (doi: 10.1016/j.jare.2020.07.003)

27 Kumar, Pankaj, R. C. Dubey, and D. K. Maheshwari. "Bacillus strains isolated from rhizosphere showed plant growth promoting and antagonistic activity against phytopathogens." *Microbiological research* 167.8 (2012): 493-499. (doi: 10.1016/j.micres.2012.05.002)

28 Kumar, Pankaj, Satyajeet Khare, and R. C. Dubey. "Diversity of bacilli from disease suppressive soil and their role in plant growth promotion and yield enhancement." *New York Sci J* 5.1 (2012): 90-111.

29 Mitter, Eduardo K., et al. "Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: innovative biofertilizer technologies." *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5 (2021): 606815. (doi: 10.3389/fsufs.2021.606815)

30 Khan, M. A., et al. "Plant growth-promoting endophytic bacteria augment growth and salinity tolerance in rice plants." *Plant Biology* 22.5 (2020): 850-862. (doi:10.1111/plb.13124)

31 Arzoo, Ahad., Manal, Arshad., Namrah, Ahmad., Mahnoor, Ilyas., Tuba, Sharf, Batool., Mahnoor, Ejaz., Alvina, Gul., Munir, Ozturk. "Abiotic stress tolerance in wheat with emphasis on drought." *Journal of Cereal Research*, 14 (2022). (doi:10.25174/2582-2675/2022/126890)

32 Gizie, Abeje, Belay., Zhengbin, Zhang., Ping, Xu. "Physio-Morphological and Biochemical Trait-Based Evaluation of Ethiopian and Chinese Wheat Germplasm for Drought Tolerance at the Seedling Stage." *Sustainability*, 13 (2021):4605-. (doi: 10.3390/SU13094605)

33 Li, Zhongjiu. "Wheat compound fertilizer with functions of drought resistance and premature senescence prevention." (2017).

34 Ivo, Pavia., Luís, Rocha., José, Moutinho-Pereira., José, Lima-Brito., Carlos, Correia. "Screening for drought resistance during germination of modern and old Iberian wheat cultivars." *Acta Botanica Croatica*, 78 (2019):169-174. (doi: 10.2478/BOTCRO-2019-0012)

35 M., V., Sidorenko., S., V., Chebotar. "Genetic determination of drought resistance in common wheat (*Triticum aestivum* L.)." *Visnik Ukraïns'kogo tovaristva genetikiv i selekcioneriv*, 20 (2023):31-47. (doi: 10.7124/visnyk.utgis.20.1-2.1511)

- 36 Muhammad, Naveed., Usama, Waheed. "Genomic advancement of wheat for climate-smart and drought-resistance variety: a review." *International journal of advanced research*, 11 (2023):361-372. (doi: 10.21474/ijar01/16431)
- 37 Elena, Todorvska., Stanislav, Kolev., Roxana, Nicolae., Ionica, Guinea., Nicolae, Saulescu. "Marker - assisted selection (mas) for drought tolerance in wheat using markers associated with membrane stability selectia asistată de markeri asociați stabilității membranelor pentru toleranța grâului la secetă." (2009).
- 38 Yavaş, İlkey, and Aydın Ünay. "Evaluation of some properties for drought resistance in bread Wheat." (2011).
- 39 Singh, Madhulika, Jai Gopal Sharma, and Bhoopander Giri. "Microbial inoculants alter resilience towards drought stress in wheat plants." *Plant Growth Regulation* 101.3 (2023): 823-843. (doi: 10.21203/rs.3.rs-2990489/v1)
- 40 Ali, Bahadur., Asfa, Batool., Fahad, Nasir., Fahad, Nasir., Shengjin, Jiang., Qin, Mingsen., Qi, Zhang., Jianbin, Pan., Yongjun, Liu., Huyuan, Feng. "Mechanistic Insights into Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Mediated Drought Stress Tolerance in Plants.." *International Journal of Molecular Sciences*, 20 (2019):4199-. (doi: 10.3390/IJMS20174199)
- 41 Izabela, Marcińska., Ilona, Czyczyło-Mysza., Edyta, Skrzypek., Maciej, T., Grzesiak., Franciszek, Janowiak., Maria, Filek., Michał, Dziurka., Kinga, Dziurka., Piotr, Waligórski., Katarzyna, Juzoń., Katarzyna, Cyganek., Stanisław, Grzesiak. "Alleviation of osmotic stress effects by exogenous application of salicylic or abscisic acid on wheat seedlings." *International Journal of Molecular Sciences*, 14 (2013):13171-13193. (doi: 10.3390/IJMS140713171)
- 42 Mohammad-Reza, Sarafraz-Ardakani., Ramazan, Ali, Khavari-Nejad., Foad, Moradi., Farzaneh, Najafi. "Abscisic Acid and Cytokinin-Induced Osmotic and Antioxidant Regulation in Two Drought-Tolerant and Drought-Sensitive Cultivars of Wheat During Grain Filling Under Water Deficit in Field Conditions." *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-napoca*, 6 (2014):354-362. (doi: 10.15835/NSB.6.3.9301)
- 43 Ankita, Pandey., Rinki, Khobra., H., M., Mamrutha., Zeenat, Wadhwa., Gopalareddy, Krishnappa., Gyanendra, Singh. "Elucidating the Drought Responsiveness in Wheat Genotypes." *Sustainability*, 14 (2022):3957-3957. (doi: 10.3390/su14073957)
- 44 Koua, Ahoosi Patrice, et al. "Breeding driven enrichment of genetic variation for key yield components and grain starch content under drought stress in winter wheat." *Frontiers in Plant Science* 12 (2021): 684205. (doi: 10.22541/au.164864945.52920985/v1)
- 45 Leila, Nasirzadeh., Behzad, Sorkhilaleloo., Eslam, Majidi, Hervan., Foad, Fatehi. "Changes in antioxidant enzyme activities and gene expression profiles under drought stress in tolerant, intermediate, and susceptible wheat genotypes." *Cereal Research Communications*, 49 (2021):83-89. (doi: 10.1007/S42976-020-00085-2)
- 46 Singh, Madhulika, Jai Gopal Sharma, and Bhoopander Giri. "Microbial inoculants alter resilience towards drought stress in wheat plants." *Plant Growth Regulation* 101.3 (2023): 823-843. (doi: 10.21203/rs.3.rs-2990489/v1)
- 47 Shifa, Shaffique., Muhammad, Imran., Sang-Mo, Kang., Muhammad, Aaqil, Khan., Sajjad, Asaf., Won-Chan, Kim., In-Jung, Lee. "Seed Bio-priming of wheat with a novel bacterial strain to modulate drought stress in Daegu, South Korea." *Frontiers in Plant Science*, 14 (2023). (doi: 10.3389/fpls.2023.1118941)
- 48 Ana, Paula, Rosa., Teresa, Cristina, Albuquerque, de, Castro, Dias., Abdul, Mounem, Mouazen., Cristina, Cruz., Margarida, Santana. "Finding optimal microorganisms to increase crop productivity and sustainability under drought – a structured reflection." *Journal of Plant Interactions*, 18 (2023). (doi: 10.1080/17429145.2023.2178680)
- 49 Leila, Karimzad., Reza, Khakvar., Mehdi, Younessi-Hamzekhanlu., Majid, Norouzi., M, Amani., Nasrin, Sabourmoghaddam. "Drought tolerance induction in wheat by inoculation of seeds with a novel growth-promoting bacteria." *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 47 (2023):102594-102594. (doi: 10.1016/j.bcab.2022.102594)
- 50 Faqeer, Muhammad., Muhammad, Aown, Sammar, Raza., Rashid, Iqbal., Faisal, Zulfiqar., Muhammad, Aslam., Jean, Wan, Hong, Yong., Muhammad, Ahsan, Altaf., Bilal, Zulfiqar., Jawad, Amin., Muhammad, Ibrahim. "Ameliorating Drought Effects in Wheat Using an Exclusive or Co-Applied Rhizobacteria and ZnO Nanoparticles." *Biology*, 11 (2022):1564-1564. (doi: 10.3390/biology11111564)
- 51 Raza, Muhammad Aown Sammar, et al. "Amelioration of Drought Stress in Wheat by Using Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Biogas Slurry." (2023). (doi: 10.21203/rs.3.rs-3073631/v1)
- 52 Muhammad, Latif., Syed, Asad, Hussain, Bukhari., A., Alrajhi., Fahad, E., Alotaibi., Maqshoof, Ahmad., Ahmad, Naeem, Shahzad., Ahmed, Z., Dewidar., Mohamed, A., Mattar. "Inducing Drought Tolerance in Wheat through Exopolysaccharide-Producing Rhizobacteria." *Agronomy*, 12 (2022):1140-1140. (doi: 10.3390/agronomy12051140)

- 53 Marcia, Barquero., Jorge, Poveda., Ana, M., Laureano-Marín., Noemí, Ortiz-Liébana., Javier, Brañas., Fernando, González-Andrés. "Mechanisms involved in drought stress tolerance triggered by rhizobia strains in wheat." *Frontiers in Plant Science*, 13 (2022). (doi: 10.3389/fpls.2022.1036973)
- 54 E., Pattey, And, Y., Karimi., Nasser, Aliasgharzad., Ezatollah, Esfandiari., Mohammad, Bagher, Hassanpouraghdam., Thomas, R., Neu., François, Buscot., Thomas, Reitz., Claudia, Breitkreuz., Mika, T., Tarkka. "Biofilm forming rhizobacteria affect the physiological and biochemical responses of wheat to drought." *AMB Express*, 12 (2022). (doi: 10.1186/s13568-022-01432-8)
- 55 E., Pattey, And, Y., Karimi., Nasser, Aliasgharzad., Ezatollah, Esfandiari., Mohammad, Bagher, Hassanpouraghdam., Thomas, R., Neu., François, Buscot., Thomas, Reitz., Claudia, Breitkreuz., Mika, T., Tarkka. "Biofilm forming rhizobacteria affect the physiological and biochemical responses of wheat to drought." *AMB Express*, 12 (2022). (doi: 10.1186/s13568-022-01432-8)
- 56 Shifa, Shaffique., Muhamad, Aaqil, Khan., Muhamad, Ali, Imran., Sang-Mo, Kang., Yong-Sung, Park., Shabir, H., Wani., In-Jung, Lee. "Research Progress in the Field of Microbial Mitigation of Drought Stress in Plants." *Frontiers in Plant Science*, 13 (2022). (doi: 10.3389/fpls.2022.870626)
- 57 Manoj, Kaushal., Suhas, P., Wani. "Plant-growth-promoting rhizobacteria: drought stress alleviators to ameliorate crop production in drylands." *Annals of Microbiology*, 66 (2016):35-42. (doi: 10.1007/S13213-015-1112-3)
- 58 Firoz, Ahmad, Ansari., Musarrat, Jabeen., Iqbal, Ahmad. "Pseudomonas azotoformans FAP5, a novel biofilm-forming PGPR strain, alleviates drought stress in wheat plant." *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18 (2021):1-16. (doi: 10.1007/S13762-020-03045-9)
- 59 Manoj, Kaushal. "Microbes in Cahoots with Plants: MIST to Hit the Jackpot of Agricultural Productivity during Drought." *International Journal of Molecular Sciences*, 20 (2019):1769-. (doi: 10.3390/IJMS20071769)
- 60 Ayomide, Emmanuel, Fadiji., Ma., del, Carmen, Orozco-Mosqueda., Sergio, de, los, Santos-Villalobos., Gustavo, Santoyo., Olubukola, Oluranti, Babalola. "Recent Developments in the Application of Plant Growth-Promoting Drought Adaptive Rhizobacteria for Drought Mitigation." *Plants*, 11 (2022):3090-3090. (doi: 10.3390/plants11223090)
- 61 Jochum, Michael D., et al. "Host-mediated microbiome engineering (HMME) of drought tolerance in the wheat rhizosphere." *Plos one* 14.12 (2019): e0225933.
- 62 Mathur, Piyush, and Swarnendu Roy. "Insights into the plant responses to drought and decoding the potential of root associated microbiome for inducing drought tolerance." *Physiologia Plantarum* 172.2 (2021): 1016-1029.
- 63 Abid, Ullah., Mohammad, Nisar., Hazrat, Ali., Ali, Hazrat., Kashif, Hayat., Ayaz, Ali, Keerio., Muhammad, Ihsan., Muhammad, Laiq., Sana, Ullah., Shah, Fahad., Aziz, Khan., Aamir, Hamid, Khan., Adnan, Akbar., Xiyan, Yang. "Drought tolerance improvement in plants: an endophytic bacterial approach." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103 (2019):7385-7397. (doi: 10.1007/S00253-019-10045-4)
- 64 Franciska, T., de, Vries., Franciska, T., de, Vries., Robert, I., Griffiths., Christopher, Knight., O., Nicolitch., Alex, Williams. "Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production." *Science*, 368 (2020):270-274. (doi: 10.1126/SCIENCE.AAZ5192)
- 65 Muhammad, Siddique, Afridi., Sher, Ali., Abdul, Salam., Willian, César, Terra., A., Hafeez., Sumaira., Baber, Ali., Mona, S., AlTami., Fuad, Ameen., Sezai, Ercisli., Romina, Alina, Marc., Flávio, Henrique, Vasconcelos, de, Medeiros., R, Karunakaran. "Plant Microbiome Engineering: Hopes or Hypes." *Biology*, 11 (2022):1782-1782. (doi: 10.3390/biology11121782)
- 66 Nathan, Vannier., Matthew, T., Agler., Stéphane, Hacquard. "Microbiota-mediated disease resistance in plants." *PLOS Pathogens*, 15 (2019). (doi: 10.1371/JOURNAL.PPAT.1007740)
- 67 Jochum, Michael D., et al. "Host-mediated microbiome engineering (HMME) of drought tolerance in the wheat rhizosphere." *Plos one* 14.12 (2019): e0225933.