

- S. 169-176. DOI: 10.14258/jcprm.2019034527.
10. Koltunov E.V. Vliianie stvolovoi gnili na fenolnye soedineniia v listiakh topolia balzamicheskogo (*Populus balsamifera L.*) v usloviiakh urbanizatsii / E.V. Koltunov // Khimiia rastitel'nogo syria. – 2021. – No. 2. – S. 155–161. DOI: 10.14258/jcprm.2021028246.
11. Nybakken, L., Lie, M. H., Julkunen-Tiitto, R., et al. (2018). Fertilization Changes Chemical Defense in Needles of Mature Norway Spruce (*Picea abies*). *Frontiers in Plant Science*, 9, 770. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00770>.
12. Tian, X., Peng, X., Lin, J., et al. (2021). Isoflavonoid Ameliorates *Aspergillus fumigatus* Keratitis by Reducing Fungal Load, Inhibiting Pattern-Recognition Receptors and Inflammatory Cytokines. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 62(3), 38. <https://doi.org/10.1167/iovs.62.3.38>.
13. Unver, T. (2024). Isoflavonoid as a promising natural bioactive flavonoid: in vitro assessment of its antifungal property. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*. 8. 54-61. DOI: 10.31015/jaefs.2024.1.6.
14. Fuksman I.L. Fenolnye soedineniia khvoinykh derevьев в usloviiakh stressa / I.L. Fuksman, L.L. Novitskaia, V.A. Isidorov [i dr.] // Lesovedenie. – 2005. – No. 3. – S. 4-10.
15. Joaquín-Ramos, A., López-Palestina, C., Pinedo-Espinoza, J., et al. (2020). Phenolic compounds, antioxidant properties and antifungal activity of jarilla (*Barkleyanthus salicifolius* [Kunth] H. Rob & Brettell). *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80(3), 352-360. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392020000300352>.

**Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада Уральского отделения Российской академии наук (№ 123112700125-1).**



УДК 632.15

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-251-9-16-22

**В.В. Матыченков, Е.А. Бочарникова, И.А. Косачев**

**V.V. Matychenkov, E.A. Bocharnikova, I.A. Kosachev**

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ БИОСТИМУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ГУМАТОВ И АКТИВНЫХ ФОРМ КРЕМНИЯ НА ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПШЕНИЦЫ**

### **STUDY OF THE EFFECTS OF HUMATE AND ACTIVE SILICON FORM BASED BIOSTIMULANTS ON WHEAT DROUGHT TOLERANCE**

**Ключевые слова:** адаптация растений, биостимулятор, вегетационные исследования, засуха, кремний, пшеница, хлорофилл, супероксиддисмутаза, глутатионредуктаза, гвяколпероксидаза.

Одним из факторов, негативно влияющих на эффективность сельского хозяйства, является усиление частоты засух, вызванное глобальным изменением климата. В ряде работ показано, что кремнийсодержащие и гуминовые биостимуляторы повышают устойчивость растений к дефициту воды, но механизмы их действия остаются недостаточно изученными. Целью вегетационного эксперимента было сравнительное изучение действия 3 биостимуляторов на основе кремния и 2 гуминовых препаратов на рост и развитие пшеницы при 2 режимах полива:

оптимальном и недостаточном (50% от оптимального). Все испытуемые препараты положительно влияли на подземную и надземную биомассу пшеницы как в условиях оптимального увлажнения, так и при дефиците воды. Однако действие препаратов было более заметным в условиях недостаточного увлажнения, что свидетельствует о их способности повышать устойчивость пшеницы к засухе. Наибольшее увеличение биомассы было получено при обработке растений монокремниевой кислотой. В условиях водного дефицита кремнийсодержащие препараты были более эффективны по сравнению с гуминовыми препаратами. Обе группы биостимуляторов положительно влияли на содержание хлорофилла а и б, при этом эффективность гуминовых препаратов было несколько выше, чем кремнийсодержащих. В

условиях недостаточного увлажнения гуминовые препараты имели более выраженное влияние на содержание хлорофилла b, чем хлорофилла a, что обусловило снижение значения соотношения Хл а/b. Снижение данного показателя может указывать на повышение устойчивости растений к неблагоприятным условиям роста. Применение кремнийсодержащих биостимуляторов существенно уменьшило содержание веществ, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой, что указывает на снижение уровня перекисного окисления липидов и улучшение общей антиоксидантной активности. Кремнийсодержащие биостимуляторы повышали активность ферментов антиоксидантной защиты: супероксиддисмутазы, глутатионредуктазы и гвяколпероксидазы. При обработке растений гуминовыми препаратами активность стресс-ферментов увеличилась незначительно. Обе группы биостимуляторов повысили устойчивость пшеницы в условиях недостаточного увлажнения, однако механизмы их воздействия на пшеницу были различны.

**Keywords:** plant adaptation, biostimulant, vegetative study, drought, silicon, wheat, chlorophyll, superoxide dismutase, glutathione reductase, guaiacol peroxidase.

One of the factors detrimentally affecting agricultural production is drought frequency increase as a result of global climate change. Some studies report the ability of silicon-based and humic biostimulants to enhance plant resistance to water shortage while the underlying mechanisms remain insufficiently investigated. The goal of the

current greenhouse experiment was comparative research of the effect of three silicon-based biostimulants and two humic preparations on growth and development of wheat plants grown under optimal irrigation and limited irrigation (50% of the optimum). All tested biostimulants increased underground and aboveground biomass for both irrigation modes. But the impact was more pronounced when water supply was scarce implying the ability of preparations to enhance resistance of wheat plants to drought. The treatment with monosilicic acid was the most efficient in terms of plant growth. Under water scarcity, silicon-based biostimulants had higher beneficial impact than that of humic preparations. Both types of biostimulants increased the contents of chlorophyll a and b while humic preparations demonstrated higher efficiency as compared to silicon-based preparations. Under limited irrigation, humic biostimulants had greater impact on chlorophyll b than chlorophyll a, thus resulting in decreased chlorophyll a/b ratio. Decline in this parameter supposes increased plant resistance to unfavorable growth conditions. Silicon-based biostimulants significantly reduced thiobarbituric acid reactive substances which indicated decreased lipid peroxidation level and improved antioxidant activity. Silicon-based biostimulants provided enhanced stress-ferment activities: superoxide dismutase, glutathione reductase, and guaiacol peroxidase. The activities of stress-ferments in plants treated with humic preparations increased slightly. Both types of biostimulants promoted wheat resistance to water deficiency, however the underlying mechanisms were different.

**Матыченков Владимир Викторович**, д.б.н., вед. науч. сотр., Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований РАН», г. Пущино, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: vvmatichenkov@yandex.ru.

**Бочарникова Елена Афанасьевна**, к.б.н., ст. науч. сотр., Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ «Пущинский научный центр биологических исследований РАН», г. Пущино, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: mswk@rambler.ru.

**Косачев Иван Алексеевич**, к.с.-х.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ivankosachov@mail.ru.

**Matychenkov Vladimir Viktorovich**, Dr. Bio. Sci., Leading Researcher, Institute of Fundamental Problems of Biology of Russian Academy of Sciences, Pushchino Scientific Center for Biological Research of Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: vvmatichenkov@yandex.ru.

**Bocharnikova Elena Afanasevna**, Cand. Bio. Sci., Senior Researcher, Institute of Fundamental Problems of Biology of Russian Academy of Sciences, Pushchino Scientific Center for Biological Research of Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: mswk@rambler.ru.

**Kosachev Ivan Alekseevich**, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ivankosachov@mail.ru.

## Введение

Пшеница является культурой, лидирующей по стратегической и пищевой значимости в мире. На фоне роста населения площади, отводимые под возделывание пшеницы, постоянно сокращаются, в связи с чем обеспечение устой-

чивого производства зерна представляет собой приоритетную задачу. Правительство Российской Федерации планирует увеличение объемов производства сельскохозяйственной продукции к 2030 г. не менее чем на 25% по сравнению с 2021 г. [1].

Современные климатические изменения характеризуются выраженным дисбалансом водного и термического режимов. Это обуславливает нарастание частоты и продолжительности засушливых периодов, что приводит к существенным потерям в растениеводстве во многих регионах мира, включая Россию. Поэтому разработка и внедрение эффективных подходов адаптации растениеводства к изменяющимся погодным условиям весьма актуальны.

Биостимуляторы являются новым видом агрехимикатов, их действие направлено на улучшение физиологических процессов, обеспечивающее активацию естественных защитных механизмов растений и повышение устойчивости растений к различным стресс-факторам [2]. Одними из наиболее популярных и перспективных биостимуляторов являются гуминовые и кремнийсодержащие препараты [3]. Гуминовые препараты представляют собой сложную смесь высокомолекулярных природных органических соединений, образующихся в процессе щелочного гидролиза органических веществ (угля, торфа и др.) [4]. К кремнийсодержащим биостимуляторам относятся жидкые или твёрдые соединения, у которых действующим веществом является ортокремниевая кислота ( $\text{Si(OH)}_4$ ), часто для упрощения называемая монокремниевой кислотой [5]. Биостимуляторы характеризуются низкой дозой внесения (от нескольких граммов до килограммов на 1 га) [5]. Показано, что оба типа биостимуляторов способствуют повышению устойчивости растений в условиях засухи [5, 6]. Однако механизмы, обуславливающие действие этих препаратов, изучены слабо.

**Целью** исследования было сравнение действия биостимуляторов на основе гуматов и активных форм кремния на пшеницу в условиях водного дефицита.

### Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны следующие кремнийсодержащие биостимуляторы:

1) АпаСил (кремниевый гель, содержащий до 31,5%  $\text{SiO}_2$ , производство компании «Анатит» (АпаСил);

2) монокремниевая кислота (1%-ная монокремниевая кислота, стабилизированная 0,5%-ными растворами  $\text{NaOH}$  и  $\text{KOH}$ , производство Siphora, г. Махачкала) (МКК);

3) ЭкоГро (смесь гуминовых веществ и аморфного кремнезёма, производство компании «РусЭко», г. Чебоксары) (ЭкоФлора).

В качестве гуминовых препаратов были взяты:

1) Gumin-K (порошок гумата калия, содержащий 70% гуминовых кислот и 8% калия, производство компании «Гумин», г. Москва) (Гумин-K);

2) БИО-комплекс гумат калия (водный раствор калийной соли гуминовых и фульвовых веществ, производство «БИО-комплекс», г. Москва) (Био).

Вегетационные исследования проводили в 2025 г. в теплицах Института фундаментальных проблем биологии РАН (г. Пущино) на озимой пшенице (*Triticum aestivum L.*) сорта Юка. Был использован промытый речной песок с примесью железа (менее 1%). Перед посадкой семена пшеницы замачивали в 3%-ном растворе  $\text{H}_2\text{O}_2$ , затем промывали в дистиллированной воде и замачивали на 24 ч при температуре 20°C в тёмном шкафу. Затем семена высевали по 10 шт. на сосуд объёмом 1 л. Сосуды имели отверстия для дренажа. Перед заполнением сосудов песком на дно укладывали фильтровальную бумагу. В предварительных исследованиях определяли оптимальный режим полива растений. Для этого растения выращивали в течение 3 недель при разных режимах полива. После чего по данным биомассы растений определяли оптимальный режим полива, составивший 50 мг воды на сосуд в день. В течение первых 2 недель после посева семян использовали оптимальный режим полива. Затем проводили опрыскивание растений биостимуляторами в дозах, указанных производителями, и продолжали выращивать ещё 3 дня при оптимальном режиме полива. Затем все варианты были разделены на 2 части (по 3 повторности). В одной части сосудов сохраняли оптимальный режим полива, во второй части сосудов уровень полива снижали в 2 раза (50% полива от оптимального). Растения продолжали выращивать ещё в тече-

ние 2 недель. Затем отбирали образцы растений (корней и надземной части). Температура воздуха в теплице составляла  $26\pm2^{\circ}\text{C}$  в дневное время и  $24\pm2^{\circ}\text{C}$  в ночное. Фотопериод составлял 12 ч при интенсивности фотосинтетически активной радиации 950 мкмоль фотонов· $\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Относительная влажность воздуха находилась в пределах  $85\pm5\%$  днём и  $75\pm5\%$  ночью.

Свежие листья анализировали на содержание пигментов (хлорофилла а (Хл а) и хлорофилла b (Хл b)) по методу Лихтенталера [7], на содержание веществ, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой (TBARs) (Chiyama, Mihara, 1978). Также определяли активность стрессферментов: супероксиддисмутазы (СОД), глутатионредуктазы (ГР) и гваяколпероксидазы (ГПО) [7].

Полученные данные анализировали с использованием теста Дункана при 5%-ном уровне

значимости. Для всех полученных результатов была рассчитана наименьшая существенная разница при 95%-ном уровне вероятности ( $\text{HCP}_{05}$ ).

### Результаты и обсуждение

Все испытуемые препараты положительно влияли на подземную и надземную биомассу пшеницы как в условиях оптимального увлажнения, так и при дефиците воды (табл. 1). При обоих режимах полива кремнийсодержащие препараты демонстрировали большую эффективность по сравнению с гуминовыми биостимуляторами. Наибольшее увеличение биомассы растений (на 15,2-19,4% при оптимальном поливе и на 25,5-45,8% при недостаточном поливе) было получено при обработке растений МКК. В целом обе группы биостимуляторов проявили себя как эффективные адаптогены.

Таблица 1

*Влияние гуминовых и кремнийсодержащих препаратов на сухую массу пшеницы, г/раст.*

Вариант	Оптимальное увлажнение				Водный дефицит			
	корни	листья	корни	листья	корни	листья	корни	листья
	г/раст.	% от контроля	г/раст.	% от контроля	г/раст.	% от контроля	г/раст.	% от контроля
Контроль	1,85	0,94	100,0	100,0	0,83	0,56	100,0	100,0
АпаСил	2,00	1,08	108,0	115,4	2,30	0,76	125,8	135,5
МКК	2,13	1,12	115,2	119,4	2,29	0,82	125,4	145,8
ЭкоГро	2,04	1,13	110,5	120,3	2,11	0,74	115,2	132,8
Гумин-К	1,95	1,10	105,6	116,5	2,02	0,67	110,3	120,4
Био	1,89	1,02	102,2	108,5	1,95	0,65	106,5	115,8
HCP <sub>05</sub>	0,12	0,14			0,13	0,14		

Содержание хлорофилла в листьях растений показано в таблице 2. Обе группы биостимуляторов положительно влияли на содержание хлорофилла а и b, при этом эффективность гуминовых препаратов было несколько выше, чем кремнийсодержащих. Важно отметить, что в условиях недостаточного увлажнения гуминовые препараты имели более выраженное влияние на содержание хлорофилла b, чем хлорофилла a, что приводило к снижению значения

соотношения Хл а/b. Снижение данного показателя может указывать на повышение устойчивости растений к засухе [8].

Содержание TBARs и активность СОД, ГР и ГПО представлены в таблице 3. Применение кремнийсодержащих биостимуляторов существенно уменьшило содержание TBARs, что указывает на снижение уровня перекисного окисления липидов и улучшение общей антиоксидантной активности.

Таблица 2

*Содержание хлорофилла а и хлорофилла b в листьях пшеницы*

Вариант	Оптимальное увлажнение			Водный дефицит		
	Хл а	Хл b	Хл a/b	Хл а	Хл b	Хл a/b
	мг/г сырой массы					
Контроль	0,858	0,834	1,03	0,665	0,695	0,96
АпаСил	0,944	1,017	0,93	0,702	0,780	0,90
МКК	0,995	1,048	0,95	0,766	0,893	0,86
ЭкоГро	1,012	1,080	0,94	0,800	0,862	0,93
Гумин-К	0,995	1,108	0,90	0,733	0,862	0,85
Био	0,970	1,163	0,83	0,705	0,893	0,79
HCP <sub>05</sub>	0,048	0,155	0,07	0,065	0,085	0,08

В вариантах с гуминовыми препаратами содержание TBARs уменьшилось по сравнению с контролем, но в меньшей степени, чем при обработке кремнийсодержащими биостимуляторами. При оптимальном режиме полива гуминовые и кремнийсодержащие биостимуляторы незначительно влияли на активность СОД, ГР и ГПО. Однако при недостаточном поливе наблюдалось значительное усиление активности СОД, ГР и ГПО в листьях пшеницы, обработанных кремнийсодержащими препаратами. При обработке растений гуминовыми препаратами активность стресс-ферментов увеличилась незначительно.

Существуют многочисленные механизмы, обеспечивающие устойчивость растений к раз-

личным стресс-факторам, включая морфологические, физиологические, молекулярные и генетические. К физиологическим механизмам относится повышение синтеза фотосинтетических пигментов и сдвиг в соотношении Хл а к Хл b [8]. Известно, что в условиях действия стресс-факторов различной природы происходит усиление синтеза активных форм кислорода (АФК), что является неспецифической и универсальной реакцией, приводящей к окислительной деструкции клеточных структур [5]. Для нейтрализации избыточного количества АФК растение начинает активировать стресс-ферменты. Как показано в ряде работ и в наших исследованиях, применение биостимуляторов обеспечивает усиление данного процесса [5, 8].

Таблица 3

*Влияние гуминовых и кремнийсодержащих препаратов на содержание TBARs и активность СОД, ГР и ГПО в листьях пшеницы*

Вариант	Оптимальное увлажнение				Водный дефицит			
	TBARs нмоль/г с. м	СОД	ГР	ГПО	TBARs нмоль/г с. м	СОД	ГР	ГПО мкмоль/г сыр. м
		мкмоль/ г сыр. м				мкмоль/г сыр. м		
Контроль	30,6	10,7	2,4	15,6	80,4	8,3	4,8	30,8
АпаСил	25,6	12,3	2,6	18,6	65,8	12,8	8,5	45,8
МКК	22,3	11,8	2,8	20,5	59,4	19,6	9,2	52,8
ЭкоГро	22,8	12,9	2,8	21,4	59,8	18,4	9,1	46,5
Гумин-К	26,9	10,6	2,5	16,3	68,7	10,3	6,3	32,5
Био	29,4	10,9	2,6	15,2	75,1	9,4	6,4	31,4
HCP <sub>05</sub>	2,5	1,5	0,3	1,5	2,5	1,2	0,7	5,5

Результаты проведённого эксперимента показали, что гуминовые препараты повышают адаптивность пшеницы к засухе в результате увеличения количества хлорофилла b. Кремнийсодержащие биостимуляторы активируют супероксиддисмутазу, гваяколпероксидазу и глутатионпероксидазу, таким образом нейтрализуя негативное действие окислительного стресса.

### Выводы

- Обе группы биостимуляторов повышают устойчивость пшеницы в условиях недостаточного увлажнения. Действие гуминовых препаратов в основном проявлялось в улучшении работы фотосинтетического аппарата, в то время как кремнийсодержащие препараты в большей мере способствовали усилиению антиоксидантной защиты растений.

- В условиях водного дефицита кремнийсодержащие препараты демонстрировали более высокую эффективность в отношении повышения засухоустойчивости пшеницы по сравнению с гуминовыми препаратами.

### Библиографический список

- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 07.02.2025 г. № 253-р). – URL: <http://government.ru/docs/all/157663/> (дата обращения: 10.09.2025). – Текст: электронный.
- Ruzzi, M., Colla, G., & Roush, Y. (2024). Editorial: Biostimulants in agriculture II: towards a sustainable future. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1427283. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1427283>.
- Arslan, E., Agar, G., Aydin, M. (2021). Humic Acid as a Biostimulant in Improving Drought Tolerance in Wheat: the Expression Patterns of Drought-Related Genes. *Plant Molecular Biology Reporter*. 39. DOI: 10.1007/s11105-020-01266-3.
- Bezuglova, O., Klimenko, A. (2022). Application of Humic Substances in Agricultural Industry. *Agronomy*. 12. 584. DOI: 10.3390/agronomy12030584.

- Гранкина, А.О. Биостимуляторы на основе кремния / А.О. Гранкина. – Текст: непосредственный // Агрохимия. – 2023. – № 12. – С. 98-105.

- Ambros, E., Kotupiy, O., Karpova, E., et al. (2023). A Biostimulant Based on Silicon Chelates Enhances Growth and Modulates Physiological Responses of In-Vitro-Derived Strawberry Plants to In Vivo Conditions. *Plants (Basel, Switzerland)*, 12(24), 4193. <https://doi.org/10.3390/plants12244193>.

- Жуйкова, Т. В. Физиология растений. Практический курс: учебник и практикум для вузов / Т. В. Жуйкова. – Москва: Юрайт, 2025. – 197 с. – URL: <https://urait.ru/bcode/574962> (дата обращения: 10.09.2025). – Текст: электронный.

- Ning, D., Zhang, Y., Li, X., Qin, A., Huang, C., Fu, Y., Gao, Y., & Duan, A. (2023). The Effects of Foliar Supplementation of Silicon on Physiological and Biochemical Responses of Winter Wheat to Drought Stress during Different Growth Stages. *Plants (Basel, Switzerland)*, 12(12), 2386. <https://doi.org/10.3390/plants12122386>.

### References

- Rasporiazhenie Pravitelstva Rossiiskoi Federatsii ot 07.02.2025 g. No. 253-r) <http://government.ru/docs/all/157663/>.
- Ruzzi, M., Colla, G., & Roush, Y. (2024). Editorial: Biostimulants in agriculture II: towards a sustainable future. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1427283. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1427283>.
- Arslan, E., Agar, G., Aydin, M. (2021). Humic Acid as a Biostimulant in Improving Drought Tolerance in Wheat: the Expression Patterns of Drought-Related Genes. *Plant Molecular Biology Reporter*. 39. DOI: 10.1007/s11105-020-01266-3.
- Bezuglova, O., Klimenko, A. (2022). Application of Humic Substances in Agricultural Industry. *Agronomy*. 12. 584. DOI: 10.3390/agronomy12030584.

5. Grankina, A.O. Biostimulatory na osnove kremniia / A.O. Grankina // Agrokhimiia. – 2023. – No. 12. – S. 98–105.
6. Ambros, E., Kotsupiy, O., Karpova, E., et al. (2023). A Biostimulant Based on Silicon Chelates Enhances Growth and Modulates Physiological Responses of In-Vitro-Derived Strawberry Plants to In Vivo Conditions. *Plants (Basel, Switzerland)*, 12(24), 4193. <https://doi.org/10.3390/plants12244193>.
7. Zhuikova, T. V. Fiziologii rastenii. Prakticheskii kurs: uchebnik i praktikum dlja vuzov / T. V. Zhuikova. – Moskva: Iurait, 2025. – 197 s. – URL: <https://urait.ru/bcode/574962>.
8. Ning, D., Zhang, Y., Li, X., Qin, A., Huang, C., Fu, Y., Gao, Y., & Duan, A. (2023). The Effects of Foliar Supplementation of Silicon on Physiological and Biochemical Responses of Winter Wheat to Drought Stress during Different Growth Stages. *Plants (Basel, Switzerland)*, 12(12), 2386. <https://doi.org/10.3390/plants12122386>.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 125051305914-0 и 1024032200167-2.*

