

ВЛИЯНИЕ ГРИБНЫХ БОЛЕЗНЕЙ НА СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ И СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

INFLUENCE OF FUNGAL DISEASES ON PHENOLIC COMPOUND COMPOSITION AND CONTENT IN SILVER BIRCH AND SCOTS PINE

Ключевые слова: устойчивость деревьев, грибные болезни, фенольные соединения, высокоэффективная жидкостная хроматография, флавоноиды, сосна, береза, защитный потенциал.

В настоящее время активно изучается роль фенольных соединений в устойчивости деревьев к грибным болезням. Целью работы был сравнительный анализ влияния грибных болезней (стволовой гнили и шютте обыкновенного) на состав и содержание фенольных соединений в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Состав и содержание фенольных соединений определяли с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии. Обнаружено частичное совпадение реакций у обоих видов древесных пород при поражении грибными патогенами, сопровождающееся повышением содержания некоторых фенольных соединений, по сравнению с контрольными пробами. Так, в ответ на действие грибных патогенов береза и сосна проявили положительную реакцию в отношении некоторых флавоноидов (изорамнетина, кемпферола и рутина), а также фенилпропаноидов (феруловой и 5-кофеилхинной кислот). При этом показана различная интенсивность ответных реакций на грибные патогены у сосны и березы, обусловленная степенью пораженности растений, а также особенностями видовых взаимоотношений в системе «растение-патоген». Установлено существенное возрастание изорамнетина как в хвое сосны (на 93%), так и в листьях березы (на 56%) при поражении грибными болезнями. Также следует отметить положительную реакцию феруловой кислоты, обладающей доказанными фунгицидными свойствами, на действие фитопатогенов. Полученные результаты свидетельствуют о проявлении защитного потенциала некоторых представителей флавоноидов и фенилпропаноидов при поражении различными грибными болезнями как березы повислой, так и сосны обыкновенной. В целом результаты данного исследования позволяют предположить наличие некоторых схожих биохими-

ческих параметров устойчивости к грибным болезням у разных пород деревьев.

Keywords: tree resistance, fungal diseases, phenolic compounds, high-performance liquid chromatography, flavonoids, pine, birch, protective potential.

Currently, the role of phenolic compounds regarding tree resistance to fungal diseases is actively studied. The research goal was a comparative analysis of the influence of fungal diseases (stem rot and Lophodermium needle cast) on the composition and content of phenolic compounds in the leaves of silver birch (*Betula pendula* Roth.) and the needles of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). The composition and content of phenolic compounds were determined by using high-performance liquid chromatography. Partial coincidence in reactions was found in both tree species when affected by fungal pathogens accompanied by increasing content of some flavonoids and phenylpropanoids compared to control samples. Thus, in response to the action of fungal pathogens, birch and pine showed a positive reaction regarding some flavonoids (isorhamnetin, kaempferol and rutin), as well as phenylpropanoids (ferulic and 5-caffeoylquinic acids). At the same time, different intensities of responses to fungal pathogens in pine and birch were revealed due to the degree of plant damage as well as the characteristics of species relationships in the plant-pathogen system. A significant increase in isorhamnetin was found both in pine needles (by 93%) and birch leaves (by 56%) with damage by fungal diseases. Also noteworthy was the positive response of ferulic acid which had proven fungicidal properties to the action of fungal pathogens. The results obtained indicate the manifestation of the protective potential of some representatives of flavonoids and phenylpropanoids when affected by various fungal diseases of both silver birch and Scots pine. Overall, the findings of this study suggest the presence of some similar biochemical parameters of resistance to fungal diseases among different tree species.

Яковлева Марина Ильдаровна, к.б.н., науч. сотр.,
Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург, Рос-
сийская Федерация, e-mail: hmi81@mail.ru.

Yakovleva Marina Ildarovna, Cand. Bio. Sci., Re-
searcher, Botanical Garden of Ural Branch of Russian
Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federa-
tion, e-mail: hmi81@mail.ru.

Введение

Защитные механизмы деревьев включают физические и химические компоненты как постоянно присутствующие (конститутивные), так и обусловленные (индуцированные) действием неблагоприятных факторов различной природы. Индуцируемая химическая защита деревьев обычно обеспечивается низкомолекулярными соединениями: фенольными соединениями, терпеноидами и алкалоидами [1]. Ранее было отмечено, что терпеноиды более эффективны против насекомых, тогда как фенольные соединения – против грибных патогенов [2]. Обнаружено, что фенольные соединения, такие как стильбены, флавоноиды, лигнаны и дубильные вещества, являются основным классом индуцируемых защитных соединений у многих древесных пород [1, 3]. При этом индукция фенольных соединений патогенами может происходить локально в тканях, окружающих пораженные участки, но также и системно, в отдаленных от места поражения частях дерева [1, 4]. Среди фенольных соединений стильбены хвойных наиболее изучены в контексте индуцированной устойчивости к патогенам [3]. Однако дальнейшие исследования показали, что стильбены могут индуцироваться различными стимулами (механическим повреждением, УФ-облучением, ионами алюминия, метилжасмонатом и этиленом), что указывает на их неспецифический ответ [3, 5, 6].

К настоящему времени известно, что поражение хвойных деревьев патогенами вызывает изменения в общей концентрации фенольных соединений, лигнина, гидроксикоричных кислот, флавоноидов и стильбенов, но направление и величина этих изменений, по-видимому, различаются в зависимости от соединения, патогена, растения-хозяина (вид, возраст, часть растения) и условий окружающей среды [3]. Значительно меньше исследований было проведено в отно-

шении лиственных деревьев, особенно их системных реакций на грибные патогены [4].

Цель и задачи исследования состояли в том, чтобы проанализировать влияние грибных болезней на состав и содержание фенольных соединений на примере двух патосистем: «береза повислая – стволовая гниль» и «сосна обыкновенная – шютте обыкновенное».

Объекты и методы

Для сравнительного анализа влияния грибных болезней на состав и содержание фенольных соединений в двух древесных породах были использованы результаты, полученные нами ранее при изучении слабой пораженности березы повислой (*Betula pendula* Roth.) стволовой гнилью (до 30% от диаметра) [7] и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) шютте обыкновенным (около 10%) [8]. Состав и содержание фенольных соединений в листьях березы повислой и в хвое сосны обыкновенной определяли с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Условия взятия образцов, подготовки проб, приготовления экстрактов и проведения хроматографических анализов подробно изложены нами ранее [7, 8].

Результаты исследований и их обсуждение

С помощью хроматографического анализа в пробах листьев березы, взятых как с деревьев, пораженных стволовой гнилью, так и со здоровых (контроль), выявлено около 60 фенольных соединений, из которых идентифицировано 24 соединения (рис. 1). В образцах пораженной шютте и здоровой (контрольной) хвои обнаружено более 100 фенольных соединений, из них 24 соединения также идентифицированы (рис. 2). Среди всех идентифицированных соединений определены представители групп фенольных соединений, таких как простые фенолы и их гликозиды, флавоноиды, фенилпропанои-

ды, гидроксibenзойные кислоты и их производные, а также аскорбиновая кислота (витамин С).

Состав идентифицированных фенольных соединений в образцах листьев березы и хвой сосны несколько различался, что обусловлено видовыми особенностями исследованных деревьев. В листьях березы повислой, в отличие от хвой сосны обыкновенной, обнаружены 4-кофеилхинная кислота, авикулярин и лютеолин-7-глюкозид (рис. 1). В свою очередь, в хвое сосны обыкновенной нами идентифицированы гидрохинон, таксифолин и бензойная кислота, которые не вошли в состав образцов березы повислой (рис. 2).

Для сравнительного анализа влияния грибных болезней на содержание фенольных соединений исследованы 21 химическое соединение, обнаруженные как в хвое сосны обыкновенной, так и в листьях березы повислой (рис. 3).

Полученные результаты позволили выявить некоторые общие тенденции в изменении содержания фенольных соединений в листьях березы и хвое сосны, пораженных грибными болезнями, по сравнению с контрольными (здоровыми) образцами. Так, в ответ на действие грибных патогенов оба вида проявили положительную реакцию в отношении некоторых флавоноидов (изорамнетина, кемпферола и рутина), а также фенилпропаноидов (феруловой и 5-кофеилхинной кислот). Содержание других флавоноидов (акацетина, лютеолина и феникулина), некоторых фенольных гликозидов (салидрозида и арбутина) и аскорбиновой кислоты, наоборот, снизилось. Остальные идентифицированные соединения показали разнонаправленную реакцию, такие флавоноиды, как: апигенин, кверцетин, изокверцетин, гиперозид, миритетин, (+)-катехин, фенольный гликозид салицин, кафтаровая и галловая кислоты (рис. 3).

При очень слабой степени поражения (около 10%) хвой сосны шютте обыкновенным наблюдали заметное возрастание содержания лишь у трех флавоноидов (изорамнетина – на 93%, кемпферола – на 63, гиперозида – на 30%), а

также бензойной кислоты на 35% (рис. 1, 3). При более значительной степени поражения (30%) березы стволовой гнилью в листьях отмечено существенное возрастание содержания пяти флавоноидов (изокверцетина – на 252%, миритетина – на 96, рутина – на 62, изорамнетина – на 56, кверцетина – на 52%) и пяти фенольных кислот (галловой – на 162%, кофейной – на 57, 4-кофеилхинной – на 37, 5-кофеилхинной – на 58, феруловой – на 20%) (рис. 2, 3). Различная интенсивность ответных реакций на грибные патогены у сосны и березы может быть обусловлена не только видовыми взаимоотношениями в системе «растение-патоген» и степенью поражения растений, но и многими сопутствующими факторами различной природы, например, возрастными особенностями накопления фенольных соединений, лесорастительными условиями в целом.

Следует отметить, что при поражении грибными болезнями наблюдалось существенное возрастание изорамнетина как в хвое сосны, так и в листьях березы (рис. 3). Однако было показано, что в условиях сильной степени (60%) поражения березы стволовой гнилью, наоборот, его содержание снижалось [9]. Аналогичные результаты были получены для изорамнетина при изучении влияния стволовой гнили на фенольные соединения листьев тополя бальзамического в условиях урбанизации [10]. В то время как увеличение синтеза этого флавоноида в ответ на воздействие ультрафиолетового излучения неоднократно было отмечено исследователями [6, 11]. В последние годы были выявлены противогрибковые свойства изорамнетина [12, 13].

Считаем, что в дальнейших исследованиях необходимо особое внимание уделить группе фенилпропаноидов, в частности, феруловой кислоте. Она продемонстрировала положительную реакцию на действие грибных патогенов как в этом исследовании, так и в исследованиях других авторов [3, 14]. Феруловая кислота также известна своим фунгицидным действием против некоторых фитопатогенов [3, 15].

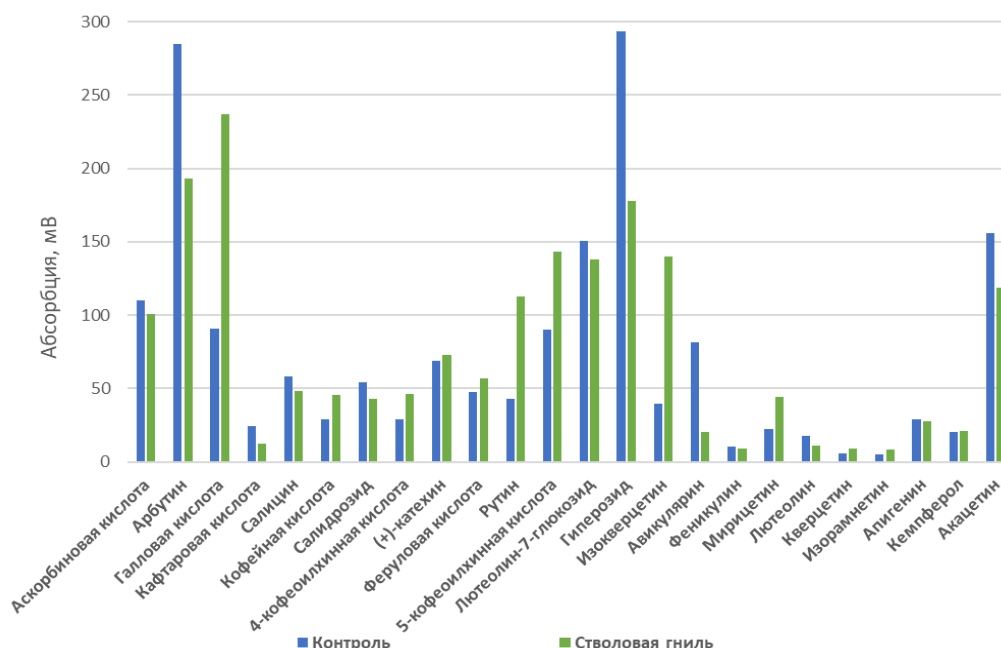


Рис. 1. Состав и содержание идентифицированных фенольных соединений в листьях здоровых деревьев березы повислой (контроль) и при поражении стволовой гнилью (мВ – милливольты)

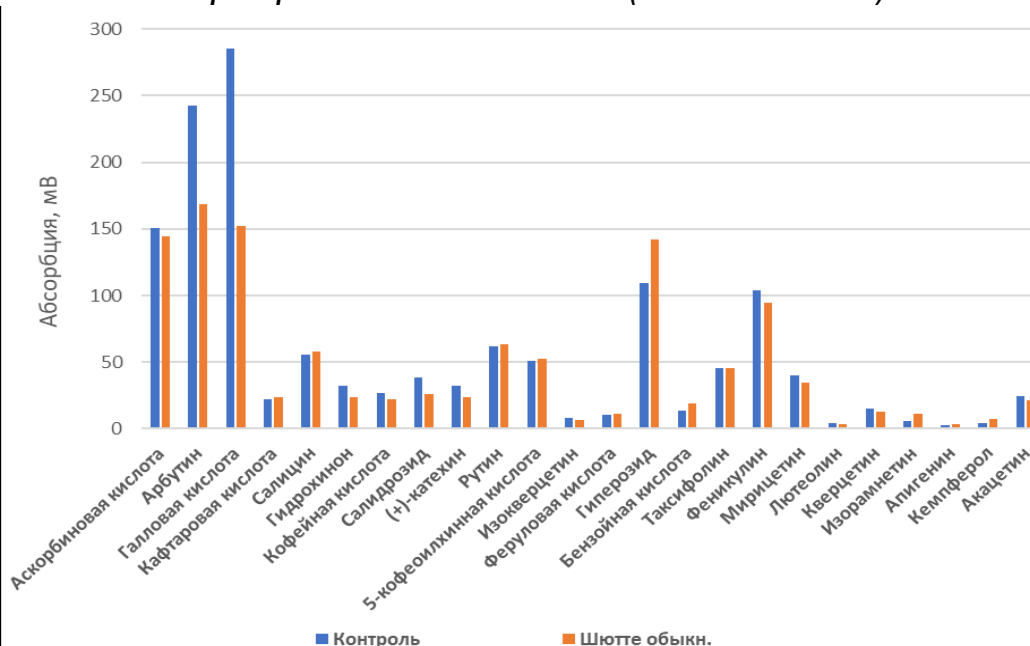


Рис. 2. Состав и содержание идентифицированных фенольных соединений в хвое сосны обыкновенной без признаков поражения шютте (контроль) и при слабом поражении шютте (мВ – милливольты)

Заключение

Результаты показали, что при поражении грибными болезнями ответные реакции сосны обыкновенной и березы повислой, сопровождающиеся возрастанием содержания фенольных соединений в хвое и листьях, частично совпадают. Так, у обоих древесных видов выявлен положительный отклик на действие грибных па-

тогенов из ряда представителей флавоноидов и фенилпропаноидов, что свидетельствует о проявлении их защитного потенциала. В целом полученные результаты позволяют предположить наличие некоторых схожих биохимических аспектов устойчивости к грибным болезням у сосны обыкновенной и березы повислой.

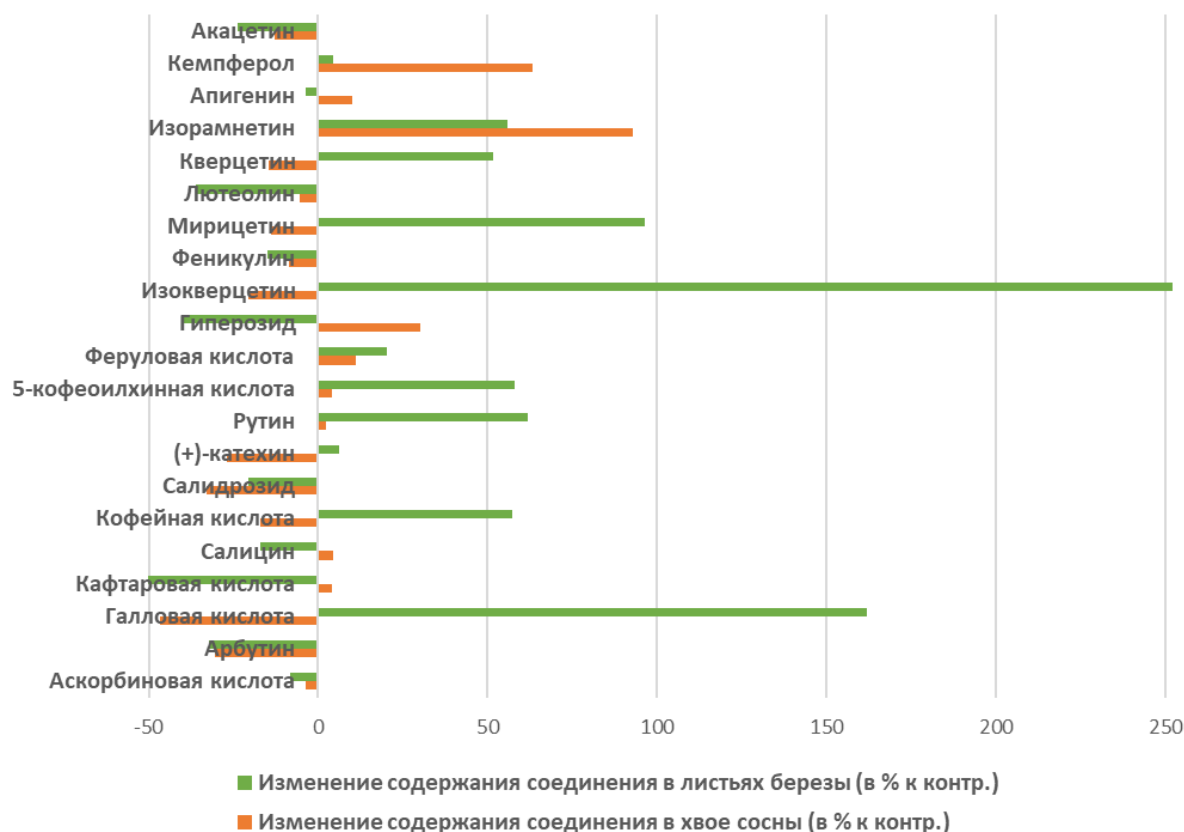


Рис. 3. Влияние грибных болезней на содержание идентифицированных фенольных соединений

Библиографический список

1. Eyles, A., Bonello, P., Ganley, R., & Mohammed, C. (2010). Induced resistance to pests and pathogens in trees. *The New Phytologist*, 185(4), 893–908. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03127.x>.
2. Boulogne, I., Petit, P., Ozier-Lafontaine, H., et al. (2012). Insecticidal and antifungal chemicals produced by plants: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 10. DOI: 10.1007/s10311-012-0359-1.
3. Witzell, J., Martin, J. (2008). Phenolic metabolites in the resistance of northern forest trees to pathogens past experiences and future prospects. *Canadian Journal of Forest Research*. 38. 2711-2727. DOI: 10.1139/X08-112.
4. Wilson, S. K., Pretorius, T., & Naidoo, S. (2023). Mechanisms of systemic resistance to pathogen infection in plants and their potential application in forestry. *BMC Plant Biology*, 23(1), 404. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04391-9>.
5. Chong, J., Poutaraud, A., Huguene, P. (2009). Metabolism and roles of stilbenes in plants. *Plant Science*. 177. 143-155. DOI: 10.1016/j.plantsci.2009.05.012.
6. Paasela, T., Lim, K. J., Pietiäinen, M., & Teeri, T. H. (2017). The O-methyltransferase PMT2 mediates methylation of pinosylvin in Scots pine. *The New Phytologist*, 214(4), 1537–1550. <https://doi.org/10.1111/nph.14480>.
7. Колтунов, Е. В. Влияние стволовой гнили на состав и содержание фенольных соединений в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в лесах Зауралья в условиях антропогенного воздействия / Е. В. Колтунов, М. И. Яковлева. – Текст: электронный // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 5. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21797> (дата обращения: 15.08.2025).
8. Яковлева, М. И. Состав и содержание фенольных соединений в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при слабом грибном заболевании / М. И. Яковлева, Г. Г. Терехов. – DOI 10.32417/1997-4868-2025-25-06-937-946. – Текст: непосредственный // Аграрный вестник Урала. – 2025. – Т. 25, № 6. – С. 937-946.

9. Колтунов, Е. В. Влияние стволовой гнили на состав и содержание фенольных соединений в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth.) / Е. В. Колтунов. – DOI 10.14258/jcprm.2019034527. – Текст: электронный // Химия растительного сырья. – 2019. – № 3. – С. 169-176.

10. Колтунов, Е. В. Влияние стволовой гнили на фенольные соединения в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях урбанизации / Е. В. Колтунов. – DOI 10.14258/jcprm.2021028246. – Текст: непосредственный // Химия растительного сырья. – 2021. – № 2. – С. 155-161.

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). Isorhamnetin 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/iops.62.3.38>.

13. Unver, T. (2024). Isorhamnetin 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. Фенольные соединения хвойных деревьев в условиях стресса / И.Л. Фуксман, Л.Л. Новицкая, В.А. Исидоров [и др.]. – Текст: непосредственный // Лесоведение. – 2005. – № 3. – С. 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>.

References

1. Eyles, A., Bonello, P., Ganley, R., & Mohammed, C. (2010). Induced resistance to pests

and pathogens in trees. *The New Phytologist*, 185(4), 893–908. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03127.x>.

2. Boulogne, I., Petit, P., Ozier-Lafontaine, H., et al. (2012). Insecticidal and antifungal chemicals produced by plants: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 10. DOI: 10.1007/s10311-012-0359-1.

3. Witzell, J., Martin, J. (2008). Phenolic metabolites in the resistance of northern forest trees to pathogens past experiences and future prospects. *Canadian Journal of Forest Research*. 38. 2711-2727. DOI: 10.1139/X08-112.

4. Wilson, S. K., Pretorius, T., & Naidoo, S. (2023). Mechanisms of systemic resistance to pathogen infection in plants and their potential application in forestry. *BMC Plant Biology*, 23(1), 404. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04391-9>.

5. Chong, J., Poutaraud, A., Huguene, P. (2009). Metabolism and roles of stilbenes in plants. *Plant Science*. 177. 143-155. DOI: 10.1016/j.plantsci.2009.05.012.

6. Paasela, T., Lim, K. J., Pietiäinen, M., & Teeri, T. H. (2017). The O-methyltransferase PMT2 mediates methylation of pinosylvin in Scots pine. *The New Phytologist*, 214(4), 1537–1550. <https://doi.org/10.1111/nph.14480>.

7. Koltunov E.V. Vliianie stvolovoi gnili na sostav i sodержanie fenolnykh soedinenii v listiakh berezy povisloi (*Betula pendula* Roth.) v lesakh Zauralia v usloviakh antropogennogo vozdeistviia / E.V. Koltunov, M.I. Iakovleva // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia. – 2015. – No. 5. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21797> (data obrashcheniia: 15.08.2025).

8. Iakovleva M.I. Sostav i sodержanie fenolnykh soedinenii v khvoe sosny obyknovennoi (*Pinus sylvestris* L.) pri slabom gribnom zabolevanii / M.I. Iakovleva, G.G. Terekhov // Agrarnyi vestnik Urala. – 2025. – T. 25. – No. 6. – S. 937-946. DOI:10.32417/1997-4868-2025-25-06-937-946.

9. Koltunov E.V. Vliianie stvolovoi gnili na sostav i sodержanie fenolnykh soedinenii v listiakh berezy povisloi (*Betula pendula* Roth.) / E.V. Koltunov // Khimiia rastitel'nogo syria. – 2019. – No. 3.

– 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 usloviakh urbanizatsii / E.V. Koltunov // *Khimiia rastitelnogo 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). Isorhamnetin 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). Isorhamnetin 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 derevev v usloviakh 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, гваяколпероксидаза.

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 b, при этом эффективность гуминовых препаратов было несколько выше, чем кремнийсодержащих. В