



BIOMICS

ISSN 2221-6197 <https://biomicsj.ru>



Сравнительная оценка влияния полусухой обработки семян ибупрофеном и салициловой кислотой на показатели роста и глутатионовый статус проростков пшеницы сорта Экада 70

*Д.Р. Масленникова^{1,2}, С.А. Шарифулина²

¹Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра

Российской академии наук, Россия, 450054, Уфа, пр. Октября 71, лит. 1Е

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра «Школа молекулярных технологий»,

Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

*E-mail: dishaoil@mail.ru

Резюме

Проведён сравнительный анализ физиологического действия салициловой кислоты (СК) и ибупрофена (ИБУ) в концентрациях 0.001–1% при полусухой обработке семян пшеницы сорта Экада 70. Эффективность оценивали по морфометрическим параметрам 3-суточных проростков и коэффициенту GSH/GSSG. Показано, что 1% СК и 0.001% ИБУ обладают сопоставимой ростостимулирующей активностью, однако СК преимущественно влияет на побег, тогда как ИБУ активирует как корневую, так и надземную части. Выявленная корреляция с редокс-статусом указывает на глутатион-зависимый механизм действия. С учётом полученных данных ИБУ может рассматриваться в качестве эффективного стимулятора роста пшеницы при предпосевной обработке семян.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., ибупрофен, салициловая кислота, показатели роста, GSH/GSSG соотношение

Цитирование: Масленникова Д.Р., Шарифулина С.А. Сравнительная оценка влияния полусухой обработки семян ибупрофеном и салициловой кислотой на показатели роста и глутатионовый статус проростков пшеницы сорта Экада 70. *Biomics*. 2026. 18(3). 243-249. DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2026-16

© Авторы, Д.Р. Масленникова, С.А. Шарифулина

Comparative effects of semi-dry seed treatment with ibuprofen and salicylic acid on growth and glutathione status in cv. Ekada 70 wheat seedlings

*Maslennikova D.R.^{1,2}, Sharifulina S.A.²

¹Institute of Biochemistry and Genetics - Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 450054, Russia, Ufa, Prospekt Oktyabrya, 71, lit. 1E

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ufa State Petroleum Technological University" (USPTU), Department of molecular technologies, Russia, 450064, Ufa, Kosmonavtov st, 1

*E-mail: dishaoil@mail.ru

Resume

A comparative analysis of salicylic acid (SA) and ibuprofen (IBU) at 0.001–1% concentrations was performed via semi-dry seed treatment in wheat (cv. Ekada 70). Efficacy was assessed by 3-day seedling

morphometrics and the GSH/GSSG ratio. Both 1% SA and 0.001% IBU showed similar growth promotion, but SA mainly affected shoots, while IBU enhanced both roots and shoots. The correlation with redox status suggests a glutathione-linked mechanism. IBU can be considered as an effective growth regulator for presowing seed treatment of wheat.

Key words: *Triticum aestivum* L., growth indicators, ibuprofen, salicylic acid, GSH/GSSG ratio

Citation: Maslennikova D.R., Sharifulina S.A. Comparative effects of semi-dry seed treatment with ibuprofen and salicylic acid on growth and glutathione status in cv. Ekada 70 wheat seedlings. *Biomics*. 2026. 18(3). 243-249. DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2026-16 (In Russian)

© **The Authors**, D.R. Maslennikova, S.A. Sharifulina

Введение

Являясь ключевой зерновой культурой, обеспечивающей продовольственную безопасность страны, пшеница требует разработки эффективных методов прогнозирования урожайности на основе показателей раннего онтогенеза [Третьяков и др. (Tretyakov et al.), 1998]. В связи с этим приоритетное значение приобретают исследования механизмов, лежащих в основе устойчивости и продуктивности сельскохозяйственных растений при применении регуляторов роста различной природы. Современный арсенал агрохимических препаратов и биологически активных соединений разнообразен и включает вещества с различной химической структурой, способами получения и диапазонами действующих концентраций [Князева (Knyazeva), 2013; Namratha et al., 2024]. Широкое применение в агротехнологиях нашли препараты на основе фитогормона салициловой кислоты (СК), такие как «Иммунакт-СК», «SalicylPure» и «Салибор», которые эффективно активируют защитные механизмы растений и способствуют повышению их продуктивности [Пашкевич, Кабашникова (Pashkevich, Kabashnikova), 2022]. Согласно современным обзорным данным, механизмы действия салициловой кислоты хорошо изучены. Так установлено, что данный фитогормон регулирует рост, развитие и устойчивость растений, что подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями [Decsi et al., 2025; Kostiw, Staniak, 2026]. Вместе с тем, в последние годы появляются данные о ростостимулирующем действии микрозагрязнителей и фармацевтических препаратов, в частности ибупрофена (ИБУ), который является не только ксенобиотиком, но и потенциальным регулятором ростовых процессов у растений [Maslennikova, 2025; Maslennikova, Mozgovoy, 2026].

Для повышения ростового и адаптивного потенциала растений в агрохозяйстве используют как регуляторы роста, так и различные способы предпосевной обработки семян. Последние обеспечивают дружное прорастание, улучшают физиологическое качество семян и способствуют восстановлению мембранных повреждений,

накопленных при хранении [Ламан и др. (Laman et al.), 2006; Пикушова и др. (Pikushova et al.), 2012]. В последние годы инновационные методы - инкрустация, гранулирование, плёночное покрытие - привлекают внимание как эффективные инструменты повышения урожайности в оптимальных и стрессовых условиях [Biswal et al., 2026]. Такие обработки синхронизируют прорастание, активируют метаболизм и формируют раннюю стрессоустойчивость [Paulikiene et al., 2025], а также позволяют осуществлять локальную доставку стимуляторов роста, снижая экологическую нагрузку. В этом контексте поиск новых соединений с росторегулирующей активностью, пригодных для предпосевного использования, является актуальной задачей.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы являлось сравнительное изучение влияния полусухой предпосевной обработки семян пшеницы растворами салициловой кислоты и ибупрофена на показатели роста и коэффициент соотношения восстановленной и окисленной форм глутатиона GSH/GSSG, ключевого показателя антиоксидантного статуса, у 3-х суточных проростков в физиологических условиях роста.

Материалы и методы

В работе использовали семена мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. сорта Экада 70. Опыты проводили в лабораторных условиях, посевной материал предварительно очищали от мусора. Растворы СК и ИБУ готовили из 2%-х стоков в 96% этаноле с последующим разведением водой до концентраций 1.0, 0.1, 0.01 и 0.001%. Контрольные семена обрабатывали смесью 96% этанола и дистиллированной воды в пропорции, аналогичной применяемой для приготовления рабочих концентраций СК и ИБУ.

Полусухую обработку семян осуществляли встряхиванием в течение 4 мин при расходе 1 мл рабочего раствора на 100 г семян [Шакирова, Хлебникова (Shakirova, Khlebnikova), 2009]. Семена (по 100 шт.) высевали в чашки Петри (d = 9 см) на фильтровальную бумагу, смоченную 10 мл

дистиллированной воды, и проращивали в темноте при 21–23°C и 65% влажности. Энергию прорастания оценивали на 3-й день согласно рекомендации [ГОСТ 12038-84 (GOST 12038-84)], вычисляя процентное отношение числа проросших семян к общему числу высевных. Линейные размеры проростков измеряли с помощью линейки общепринятым способом.

Сырую биомассу растений определяли путём взвешивания на аналитических весах, затем образцы высушивали при 105°C до постоянной массы и определяли сухую биомассу. Ростовые эксперименты выполняли в 4–5 биологических повторностях, при этом каждая повторность соответствовала 30 семенам (растениям).

Содержание GSH и GSSG определяли спектрофлуориметрически в одной навеске 3-суточных проростков с использованием о-фталевого альдегида (Sigma-Aldrich, США) в качестве флуорогенного реагента, специфичность которого регулируется pH [Масленникова и др., (Maslennikova

et al.,) 2019]. Концентрацию белка измеряли в тех же экстрактах по методу Брэдфорда [Bradford, 1976].

Все биохимические анализы выполняли в трёх биологических и пяти аналитических повторностях. Данные на рисунках представлены как средние $\pm$ стандартная ошибка среднего (SEM). Статистический анализ проводили с использованием программ Microsoft Office Excel 2007 и STATISTICA 10.0. Достоверно различающиеся значения ($P \leq 0,05$) обозначены различными латинскими буквами.

Результаты и их обсуждение

Энергия прорастания на 3-й день эксперимента под действием СК возрастала во всём диапазоне концентраций: на 14% при 1% СК и на 6% при 0.1–0.001% СК. Напротив, реакция на ИБУ была нелинейной: концентрации 1% и 0.1% подавляли прорастание (снижение на 32% и 13% соответственно), тогда как 0.01% и 0.001% ИБУ стимулировали его (увеличение на 8% и 15%) (рис. 1а).

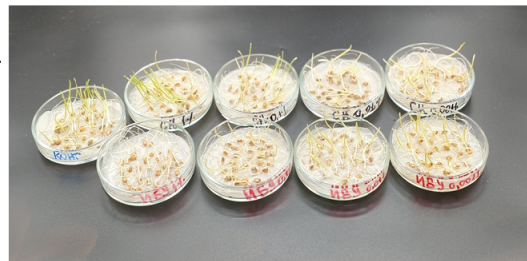
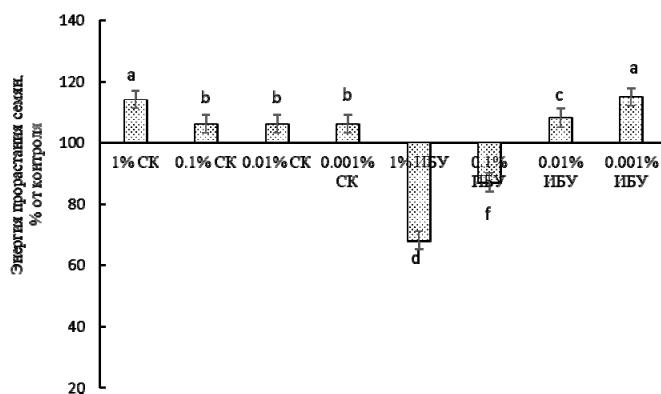


Рис. 1. Влияние полусухой обработки семян СК и ИБУ в концентрациях 1.0, 0.1, 0.01 и 0.001% (встряхивание, 4 мин, 1 мл/100 г семян) на энергию прорастания (а) и внешний вид 3-суточных проростков (б). Контроль — обработка смесью дистиллированной воды и 96% этанола (растворитель) (5 повторов, $n=100$). Различные латинские буквы над столбцами обозначают статистически значимые различия между вариантами при $P \leq 0,05$.
Fig.1. Germination energy (a) and morphology (b) of 3-day-old wheat seedlings after semi-dry seed treatment with salicylic acid (SA) and ibuprofen (IBU) (1.0, 0.1, 0.01 and 0.001% 4 min shaking, 1 mL/100 g seeds). Control: treatment with a mixture of distilled water and 96% ethanol (solvent). Different letters indicate a significant difference between the means at the level of $P \leq 0.05$.

Визуальная оценка проростков (Рис. 1б) подтверждает эти данные: все варианты с СК характеризовались более густыми всходами, тогда как действие ИБУ разделилось — высокие концентрации угнетали рост в длину, низкие — активировали.

Наряду с этим, как показано на рис. 2а, СК и ИБУ оказывали разнонаправленное действие на линейные размеры проростков. СК проявляла стимулирующую активность во всех концентрациях:

максимальный эффект (корни +13%, побеги +22%, целые растения +16%) наблюдался при 1% СК, тогда как 0.1% СК стимулировал только корни (+9%), а 0.01–0.001% СК были неактивны. ИБУ демонстрировал бифазную зависимость: 1% подавлял рост (снижение на 26–40%), 0.1–0.01% избирательно стимулировали корни (+8%), а 0.001% вызывал максимальный прирост всех органов (корни +19%, побеги +20%, целые растения +30%).

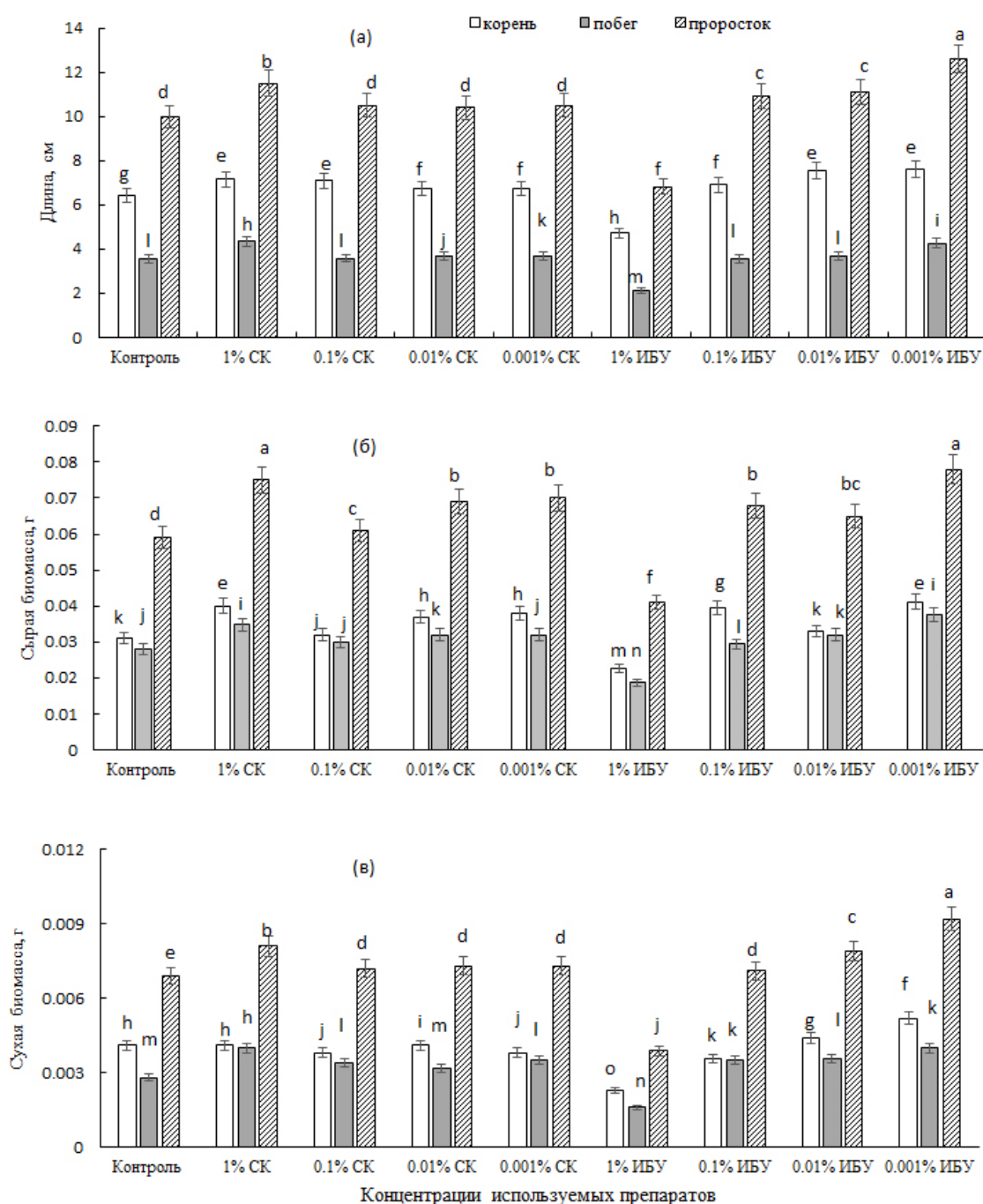


Рис. 2. Влияние полусухой обработки семян СК и ИБУ в концентрациях 1.0, 0.1, 0.01 и 0.001% (встряхивание, 4 мин, 1 мл/100 г семян) на длину (а), сырую (б) и сухую биомассу (в) 3-суточных проростков. Контроль — обработка смесью дистиллированной воды и 96% этанола (растворитель) (5 повторов, $n=100$). Различные латинские буквы над столбцами обозначают статистически значимые различия между вариантами при $P \leq 0.05$.
Fig. 2. The effect of semi-dry treatment of seeds with SA and IBU at concentrations of 1.0, 0.1, 0.01 and 0.001% (shaking, 4 min, 1 ml/100 g seeds) on the length (a), fresh (b) and dry biomass (c) of 3-day-old seedlings. Control: treatment with a mixture of distilled water and 96% ethanol (solvent). Different letters indicate a significant difference between the means at the level of $P \leq 0.05$.

Анализ биомассы подтвердил эти тенденции (Рис 2 б, в). После обработки семян 1% СК сырая масса возрастала (корни +29%, побеги +21%, целое растение +27%), сухая масса корней оставалась на уровне контроля, тогда как сухая масса побега увеличивалась на 42%. Обработка семян 0.1% СК не влияла на сырую массу, но повышала сухую (+6%). 0.01–0.001% СК давали прирост сырой (~10%) и сухой (~6%) массы. При этом применение 1% ИБУ снижал сырую (–31%) и сухую (–43%) массу, что коррелирует с его токсическим эффектом на прорастание семян (Рис. 1). При этом влияние 0.1 и 0.01% ИБУ на показатели биомассы были сопоставимы с воздействием 0.01–0.001% СК. Наиболее эффективным в стимуляции накопления биомассы был 0.001% ИБУ: сырая масса возрастала на 32%, сухая масса корней — на 27%, побегов — на 42%, целого растения — на 33% (Рис. 2б, в).

Полученные данные показывают, что СК и ИБУ оказывают принципиально различные эффекты на рост и накопление биомассы пшеницы. Салициловая кислота проявляет линейную дозозависимую стимуляцию, причём 1% СК вызывает перераспределение пластических веществ в пользу побега (сухая масса корней на уровне контроля, побега +42%). Это может быть связано с ауксиновой активностью СК, которая создаёт «акцепторный» центр в надземной части растения и усиливает

транспорт ассимилятов в побеги [Shakirova et al., 2003; Kurbel et al., 2026]. Полусухая обработка семян ИБУ подтверждает обнаруженный ранее гормезисный эффект этого ксенобиотика: 1% токсичен, а 0.001% вызывает максимальную стимуляцию роста и биомассы, вероятно, за счёт активации и гормональной и антиоксидантных систем [Maslennikova, 2025; Maslennikova, Mozgovoj, 2026]. Особый интерес представляет факт, что 0.001% ИБУ стимулирует рост и накопление сухой массы сильнее, чем все изученные концентрации СК.

Оценка глутатионного статуса (GSH/GSSG) выявила чёткое соответствие с ростовыми эффектами изученных соединений (Рис. 3). Наибольшее повышение соотношения (+48%) наблюдалось при 0.001% ИБУ — варианте, показавшем максимальную стимуляцию длины и биомассы. Высокий стимулирующий эффект 1% СК также сопровождался значительным ростом GSH/GSSG (+32%). Умеренная стимуляция роста при 0.01% ИБУ и 0.01% СК корреспондировала с повышением показателя соотношения на 14% в обоих случаях. Концентрация 0.1% СК, не влиявшая на ростовые параметры, не изменяла и GSH/GSSG. Напротив, ингибирующие рост концентрации ИБУ (1 и 0.1%) вызвали резкое падение GSH/GSSG (в 3 и почти в 2 раза соответственно).

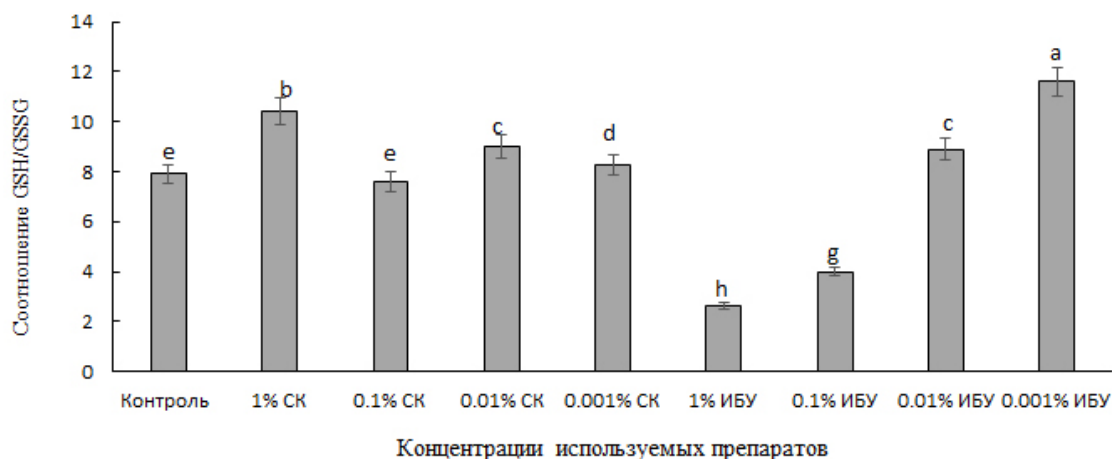


Рис. 3. Влияние полусухой обработки семян СК и ИБУ в концентрациях 1.0, 0.1, 0.01 и 0.001% (встряхивание, 4 мин, 1 мл/100 г семян) на показатель соотношения GSH/GSSG в 3-суточных проростках. Контроль — обработка смесью дистиллированной воды и 96% этанола (растворитель) (3 повтора, n=5). Различные латинские буквы над столбцами обозначают статистически значимые различия между вариантами при $P \leq 0.05$.

Fig. 3. The effect of semi-dry treatment of seeds with SA and IBU at concentrations of 1.0, 0.1, 0.01 and 0.001% (shaking, 4 min, 1 ml/100 g seeds) on the GSH/GSSG ratio in 3-day-old seedlings. Control: treatment with a mixture of distilled water and 96% ethanol (solvent). Different letters indicate a significant difference between the means at the level of $P \leq 0.05$.

Обнаруженная в ходе эксперимента исследуемых соединений на глутатионовый статус, разнонаправленность физиологических эффектов вероятно, обусловлена фундаментальными

различиями их химической природы. Фитогормон во всех изученных концентрациях инициирует адаптивный прайминг антиоксидантной системы, что проявляется в повышении или стабилизации соотношения GSH/GSSG на контрольном уровне и свидетельствует об усилении восстановительного потенциала клеток. В противоположность этому ксенобиотик в высоких дозах индуцирует окислительный стресс, сопровождающийся быстрым истощением пула GSH. Однако при сверхнизкой концентрации ИБУ обнаруживает горметический эффект, впервые описанный нами ранее [Maslennikova, Mozgovoj, 2026], что указывает на переключение его действия с прооксидантного на редокс-модуляторное.

Ключевую роль в реализации различий в регуляции глутатионового статуса, по нашему предположению, играет дифференциальная модуляция активности глутатионредуктазы и сопряжённых ферментов аскорбат-глутатионового цикла, что требует отдельного экспериментального подтверждения.

Проведённые исследования показали, что полусухая обработка семян исследуемыми препаратами является эффективным приёмом стимуляции прорастания пшеницы. При этом установлено, что ИБУ в концентрации 0.001% на ранних этапах онтогенеза проявляет ростостимулирующую активность, сопоставимую с действием 1% СК. Выявленная положительная корреляция между увеличением биомассы проростков и повышением коэффициента GSH/GSSG свидетельствует о том, что редокс-модулирующая активность исследуемых соединений может являться ключевым звеном их физиологического действия.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию: 06.07.2026 г.

Доработана после рецензирования: 12.08.2026 г.

Принята к публикации: 17.08.2026 г.

Литература

- ГОСТ 12038-84: Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы проращивания, 1986.
- Князева Т.В. Регуляторы роста растений в Краснодарском крае: монография. Краснодар: ЭДВИ. 2013. 128 с.
- Ламан Н.А., Алексейчук Г.В., Калацкая Ж.Н. Современная технология предпосевной обработки семян. *Наука и инновации*. 2006. 9. 37-41.
- Масленникова Д.Р., Плотников А.А., Шакирова Ф.М. Сравнительный анализ физиологического действия оксида азота и 6-бензиламинопурина на состояние компонентов глутатионового комплекса в корнях проростков пшеницы. *Агрохимия*. 2019. (3). 37-43. <https://doi.org/10.1134/S0002188119030104>
- Пашкевич Л.В., Кабашникова Л.Ф. Научные основы использования салицилатов в адаптивных технологиях возделывания ярового ячменя. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022. 1. 25–36.
- Шакирова Ф.М., Хлебникова Т.Д. Регуляторы роста в адаптивной стратегии растениеводства. Уфа-Гилем, 2009. 124 с.
- Третьяков Н.Н., Кошкин Е.Н., Макрушин Н.М. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений. Москва: Колос. 1998. 640 с.
- Biswal BC, Mishra S, Jaiswal K et al. Seed coating innovations for sustainable horticulture enhancing germination, crop resilience and resource efficiency. *Discov Sustain*. 2026. 7. 426. <https://doi.org/10.1007/s43621-026-02826-5>
- Bradford MM. A rapid and sensitive methods for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Anal. Biochem*. 1976. 72. 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Decsi K, Ahmed M, Abdul-Hamid D et al. The role of salicylic acid in activating plant stress responses—results of the past decade and future perspectives. *Int J Mol Sci*. 2025. 26. 4447. <https://doi.org/10.3390/ijms26094447>
- Kostiw P, Staniak M. The role of salicylic acid in shaping plant resistance to environmental stresses. *Agronomy*. 2026. 16. 785. <https://doi.org/10.3390/agronomy16080785>
- Kurbel VB, Sietiö OM, Karhu K et al. Fate of recently assimilated carbon in the soil–plant system of *Vaccinium vitis-idaea* and its response to warming in a 2.5-year translocation experiment. *Plant Soil*. 2026. 518. 403–421. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-08001-5>
- Maslennikova DR. Ibuprofen regulates redox metabolism and nitric oxide content in early growth stages of wheat plants. *Russ J Plant Physiol*. 2025. 72. 90. <https://doi.org/10.1134/S1021443725600485>
- Maslennikova D, Mozgovoj O. Ibuprofen improves wheat growth under salinity by modulating hormonal and antioxidant status. *Plants*. 2026. 15. 360. <https://doi.org/10.3390/plants15030360>
- Namratha MR, Thottempudi K, Koushal S et al. Emerging trends in plant growth regulators: innovations and applications. *J. Sci. Res. Rep*. 2024. 30. 267-282. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i102453>
- Paulikiene S, Benesevičius D, Benesevičiene K et al. Review—seed treatment: importance, application, impact, and opportunities for increasing sustainability.

Agronomy. 2025. 15. 1689. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071689>

References

1. Biswal BC, Mishra S, Jaiswal K et al. Seed coating innovations for sustainable horticulture enhancing germination, crop resilience and resource efficiency. *Discov Sustain*. 2026. 7. 426. <https://doi.org/10.1007/s43621-026-02826-5>
2. Bradford MM. A rapid and sensitive methods for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Anal. Biochem*. 1976. 72. 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
3. Decsi K, Ahmed M, Abdul-Hamid D et al. The role of salicylic acid in activating plant stress responses—results of the past decade and future perspectives. *Int J Mol Sci*. 2025. 26. 4447. <https://doi.org/10.3390/ijms26094447>
4. GOST 12038-84: Interstate Standard. Agricultural Crop Seeds. Germination Methods. 1986.
5. Knyazeva TV. Plant growth regulators in the Krasnodar region: monograph. Krasnodar: EDVI, 2013. 128 p.
6. Kostiw P, Staniak M. The role of salicylic acid in shaping plant resistance to environmental stresses. *Agronomy*. 2026. 16. 785. <https://doi.org/10.3390/agronomy16080785>
7. Kurbel VB, Sietiö OM, Karhu K et al. Fate of recently assimilated carbon in the soil–plant system of *Vaccinium vitis-idaea* and its response to warming in a 2.5-year translocation experiment. *Plant Soil*. 2026. 518. 403–421. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-08001-5>
8. Laman NA, Alekseychuk GV, Kalatskaya ZhN. Modern technology of pre-sowing seed treatment. *Science and Innovation*. 2006. 9. 37-41.
9. Maslennikova DR. Ibuprofen regulates redox metabolism and nitric oxide content in early growth stages of wheat plants. *Russ J Plant Physiol*. 2025. 72. 90. <https://doi.org/10.1134/S1021443725600485>
10. Maslennikova D, Mozgovoj O. Ibuprofen improves wheat growth under salinity by modulating hormonal and antioxidant status. *Plants*. 2026. 15. 360. <https://doi.org/10.3390/plants15030360>
11. Maslennikova DR, Plotnikov AA, Shakirova FM. Comparative analysis of the physiological effect of nitric oxide and 6-benzylaminopurine on the state of the components of the glutathione complex in the roots of wheat seedlings. *Agrochemistry*. 2019. (3). 37-43. <https://doi.org/10.1134/S0002188119030104>
12. Namratha MR, Thottempudi K, Koushal S et al. Emerging trends in plant growth regulators: innovations and applications. *J. Sci. Res. Rep*. 2024. 30. 267-282. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i102453>
13. Pashkevich LV, Kabashnikova LF. Scientific basis for the use of salicylates in adaptive technologies for the cultivation of spring barley. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022. 1. 25–36.
14. Paulikiene S, Benesevičius D, Benesevičiune K et al. Review—seed treatment: – importance, application, impact, and opportunities for increasing sustainability. *Agronomy*. 2025. 15. 1689. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071689>
15. Shakirova FM, Khlebnikova TD. Growth regulators in the adaptive strategy of plant growing. Ufa-Gilem, 2009. 124 p.
16. Tretyakov NN, Koshkin EN, Makrushin NM. Physiology and biochemistry of agricultural plants. Moscow: Kolos, 1998. 640 p.