



Влияние ибупрофена на антиоксидантную систему проростков пшеницы

^{1,2}Д.Р. Масленникова*, ²Р.Ф. Заманова, ²Л.С. Давлетшина

¹Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Российская Федерация, 450054, Уфа, пр. Октября 71, лит. 1Е

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра «Школа молекулярных технологий», Российская Федерация, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1

*E-mail: dishaoil@mail.ru

Резюме

В статье проведен анализ влияния предпосевной обработки семян пшеницы *Triticum aestivum* L. 100 мкМ ибупрофеном (ИБУ) на генерацию активных форм кислорода (АФК) и активность антиоксидантных ферментов в 3-х и 5-суточных растениях в физиологических условиях произрастания с параллельной оценкой их ростовых параметров. Было обнаружено, что препарат стимулирует рост и вызывает сбалансированное накопление супероксид-аниона (O_2^-) и пероксида водорода (H_2O_2), которое коррелировало с повышением активности супероксиддисмутазы (СОД) и каталазы (КАТ), участвующих в нейтрализации активных форм кислорода. Полученные результаты указывают на способность препарата позитивно регулировать состояние редокс метаболизма и дают основания для рассмотрения ИБУ в качестве антиоксиданта растений.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., ибупрофен, показатели роста, активные формы кислорода, регулятор роста растений, антиоксидантные ферменты

Цитирование: Масленникова Д.Р., Заманова Р.Ф., Давлетшина Л.С. Влияние ибупрофена на антиоксидантную систему проростков пшеницы. *Biomics*. 2025. 17(3). 238-244. DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2025-20

© Авторы, Масленникова Д.Р., Заманова Р.Ф., Давлетшина Л.С., 2025

Effect of ibuprofen on antioxidant system of wheat seedlings

^{1,2}D.R. Maslennikova*, ²Z.F. Zamanova, ²L.S. Davletshina

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

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ufa State Petroleum Technological University", Department of Molecular Technologies, Russian Federation, 450064, Ufa, Kosmonavtov str, 1

*E-mail: dishaoil@mail.ru

Resume

The effect of 100 μ M ibuprofen (IBU) on the content of reactive oxygen species and activity of antioxidant enzymes in 3- and 5-day-old wheat plants under normal growing conditions was analyzed. The growth parameters of these plants were also analyzed. The preparation was found to stimulate plant growth and cause a balanced accumulation of superoxide anion (O_2^-) and hydrogen peroxide (H_2O_2). This is accompanied by activation of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT), enzymes involved in neutralization of reactive oxygen species (ROS). For the first time, the obtained results indicate the ability of the drug to regulate the state of redox metabolism and provide grounds for considering IBU as a plant antioxidant.

Key words: *Triticum aestivum* L., growth indicators, ibuprofen, reactive oxygen species, plant growth regulator, antioxidant enzymes.

Citation: Maslennikova D.R., Zamanova Z.F., Davletshina L.S. Effect of ibuprofen on antioxidant system of wheat seedlings. *Biomcs.* 2025. 17(3). 238-244. DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2025-20

© **The Authors**, Maslennikova D.R., Zamanova Z.F., Davletshina L.S., 2025

Введение

В последние 20 лет появление, участие и возможные эффекты фармацевтических препаратов в окружающей среде стали предметом пристального интереса круга ученых экологов, зоологов, ботаников, химиков - аналитиков, фармакологов и физиологов растений. Ибупрофен - 2-(4-изобутилфенил)-пропионовой кислоты, является одним из наиболее известных соединений в классе микрозагрязнителей или микроконтраминантов, встречающихся повсеместно [Shan, Liang, 2010; Dordio et al., 2011; Opris et al., 2020; Tan et al., 2020; Wijaya et al., 2020; Zhang et al., 2021]. Этот нестероидный противовоспалительный препарат (НПВП), часто используется в качестве безрецептурного обезболивающего в широком диапазоне терапевтических мероприятий, как в медицине, так и в ветеринарии [He et al., 2017; Madikizela et al., 2022]. Наряду с этим, принципиально важным является тот факт, что ИБУ был получен на основе структуры первого НПВП, фитогормона и антиоксиданта растений салициловой кислоты (СК) [Tan et al., 2020], что дает основание рассматривать препарат в качестве потенциального регулятора роста растений (PPP). В литературе есть данные, свидетельствующие в пользу того, что ИБУ в низких дозах оказывает стимулирующее действие на рост клеток тополя *Populus nigra* L. в системе *in vitro* [Iori et al., 2012], стимулирует рост и развитие корневой системы салата *Lactuca sativa* [Schmidt, Redshaw, 2015] и пшеницы *Triticum aestivum* L. (Sharma et al., 2018). В 2022 г. был получен патент – (<https://patents.google.com/patent/CN112425405B/en>), в котором авторы предлагают повышать устойчивость растений просо к засолению, применяя обработку семян и добавляя в среду выращивания, крайне низкие, сопоставимые с действием фитогормона, экологически безопасные концентрации ИБУ.

В нашей лаборатории была впервые подобрана концентрация ИБУ, которая эффективно стимулировала рост и устойчивость растений пшеницы к засолению. Было обнаружено, что в основе проявленных эффектов препарата лежит его способность регулировать содержание СК, глутатиона GSH и глутатион-S-трансферазу [Maslennikova et al., 2025]. Эти данные говорят в пользу того, что препарат может регулировать редокс метаболизм растений, что подтверждается данными литературы. При этом нет четкой картины

анализа влияния присутствия ИБУ на состояние антиоксидантной системы и эти данные крайне скудны и противоречивы, а также получены в основном на двудольных растениях. Известно, что ИБУ вызывает сбалансированное накопление АФК и активацию СОД, КАТ и гваяколпероксидазу в растениях рогоза (*Typha spp.*) [Dordio et al., 2011] и коровьего гороха (*Vigna unguiculata* L.) [Wijaya et al., 2020], генерацию H₂O₂, GSH и активацию ГСТ и пероксидазы в растениях малабарского шпината (*Basella alba* L.) [Zhang et al., 2021], не влияя на содержание аскорбата и глутатиона и активность глутатионредуктазы ГР и аскорбатпероксидазы АП в листьях житняка гребенчатого (*Agropyrum cristatum* L.) [Shan, Liang 2010].

Чтобы выяснить роль антиоксидантных ферментов в спектре физиологического действия ИБУ на растения пшеницы, важно провести комплексную оценку влияния препарата на генерацию АФК в сочетании с анализом активности антиоксидантных ферментов. Таким образом, цель работы состояла в детальном изучении влияния предпосевого замачивания семян в 100 мкМ ИБУ на синтез O₂⁻ и H₂O₂, а также активность ферментов участвующих в их нейтрализации СОД и КАТ в растениях пшеницы на 3-и и 5-е сутки вегетации.

Материалы и методы

Объектом исследования выступили растения мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. сорта Экада 70. Эксперименты проводили в лабораторных условиях. Семена перед посевом промывали, затем стерилизовали в 96% этаноле 1 мин, затем тщательно отмывали водопроводной и далее дистиллированной водой, подсушивали.

В работе применяли Ibuprofen (Sigma-Aldrich, США). Стоковый раствор 1 мМ ИБУ получали разведением препарата в 96% этаноле. Далее раствор разводили дистиллированной водой до концентрации 100 мкМ. В полученном растворе препарата выдерживали предварительно подготовленные семена в течение 3 ч. Контрольные семена выдерживали в воде 3 ч. Далее семена (50 шт.) высаживали в чашки Петри (d=9 см) на бумагу смоченную водой (10 мл) и проращивали в климатоканере «Спектр -15 КР» при 21-23°C, 65% влажности, (8 ч темнота/16 ч свет) до 3 суток онтогенеза. Далее растения перекладывали в стаканы, которые содержали питательный раствор Хогланда-Арнона, и выращивали еще 2 суток до

достижения растениями 5-ти суток онтогенеза. На вышеуказанных этапах вегетации отбирали целые растения и замораживали их в жидком азоте, и определяли в них активности СОД и КАТ. Активность КАТ (КФ 1.11.1.6) анализировали спектрофотометрически по ферментативному разложению H_2O_2 при 240 нм [Aebi, 1984]. Активность СОД (КФ 1.15.1.1) определяли согласно [Beyer, Fridovich, 1987], условная единица активности СОД (у.е.) определялась как количество фермента, необходимое для 50%-го ингибирования скорости восстановления НСТ при 540 нм. Содержание АФК определяли в живых растениях. Генерация супероксидного аниона (O_2^-) определялась путем измерения превращения адrenalина в адренохром [Minibayeva et al., 2001]. Содержание H_2O_2 определяли, применяя раствор ксиленола оранжевого, в присутствии Fe^{2+} при 560 нм [Bindschedler et al., 2001].

На 5-е сутки проращивания оценивали энергию прорастания, которую определяли соотношением в % числа проросших семян к общему числу высеванных семян, длину целого растения измеряли линейкой (корень+побег), а также площадь листьев оценивали согласно [Schrader et al., 2021]. Опыты по оценке показателей роста проводили в трех – четырех биологических повторах, каждый вариант включал по 100 семян (растений).

Содержание белка определяли по методу Бредфорда [Bradford, 1976].

Все физиологические и биохимические эксперименты проводились в трех биологических и трех-четырех аналитических повторах. Экспериментальные данные были выражены как средние значения \pm SE, которые были рассчитаны для всех вариантов опыта с использованием MS Excel. Значимость различий оценивалась с помощью ANOVA с последующим тестом Дункана ($p \leq 0,05$) с помощью программного обеспечения STATISTICA 10.0.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведения экспериментов было обнаружено, что на 3-и сутки эксперимента предпосевное замачивание ИБУ приводило к увеличению концентрации O_2^- в 1.7 раза, после чего наблюдалось снижение уровня супероксид-аниона, и к 5-м суткам его уровень был в 1.3 раза выше контрольного (Рис. 1а). Такая динамика генерации O_2^- , одной из наиболее повреждающей мембраны формы АФК, вероятно, может служить маркером воздействия ИБУ как химического агента, вызывающего первоначальные внутриклеточные изменения, которые не приводят к деструктивным повреждениям, происходящим при стрессе.

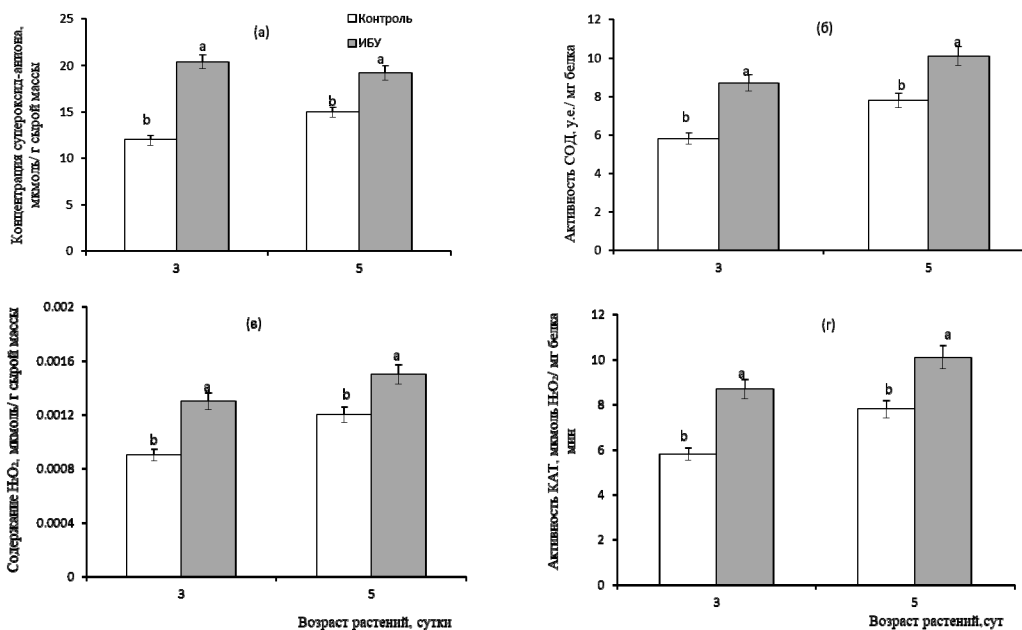


Рис. 1. Влияние предобработки 100 мкМ ИБУ на накопление O_2^- (а); активность СОД (б); содержание H_2O_2 (в) и активность КАТ (г) в 3-х и 5-суточных растениях пшеницы (3 повтора, n=5). Различными латинскими буквами обозначены величины, различия между которыми достоверны при $P \leq 0.05$.

Fig. 1. Effect of 100 μ M IBU pretreatment on O_2^- - accumulation (a); SOD activity (b); H_2O_2 content (c) and CAT activity (d) in 3- and 5-day-old wheat plants (3 repetitions, n = 5). Different letters indicate a significant difference between the means at the level of $P \leq 0.05$.

Хорошо известно, что O_2^- , выступает в качестве сигнальной молекулы для запуска антиоксидантной системы [Тарчевский (Tarchevsky), 2001], и поскольку ИБУ вызывает высокую по уровню транзистентную продукцию супероксид-аниона, можно предположить, что он служит в качестве его вторичного мессенджера при передаче сигнала в клетке.

Супероксиддисмутаза – один из основных ферментов антиоксидантной системы. Представляет собой группу металлоферментов, катализирующих реакцию дисмутации супероксидных анион-радикалов, в результате реакции образуется пероксид водорода, что поддерживает концентрацию крайне агрессивной формы АФК в клетке на низком уровне, и уменьшают вероятность образования еще более активного синглетного кислорода [Rajput et al., 2021; Vaganova et al., 2024]. Предобработка семян ИБУ приводила к повышению активности СОД в 1.7 раза на 3 сутки с последующим снижением 1.3 раза относительно контроля ее активации к 5 суткам вегетации (рис. 1б). Такое значительное влияние ИБУ на активность СОД, может быть связано с изменением ее латентных форм и дополнительным синтезом этого фермента. Ранее нами было

обнаружено, что ИБУ регулирует содержание СК в растениях пшеницы [Maslennikova et al., 2025], которая в свою очередь оказывает стимулирующий эффект на экспрессию генов СОД [Казнина и др. (Kaznina et al.), 2024]. Принципиальная способность препарата усиливать активность СОД может вносить важный вклад в реализацию антистрессового действия ИБУ на растения пшеницы.

В процессе дисмутации происходит накопление пероксида, являющегося фундаментальной молекулой, которая участвует в регуляции роста и развития растений [Nurnaeimah et al., 2020], а также играет важную сигнальную роль в запуске каскада биохимических реакций в становлении устойчивости к неблагоприятным воздействиям [Тарчевский, (Tarchevskiy), 2001; Niu et al., 2016]. Однако переизбыток H_2O_2 может привести к деструктивным последствиям, что требует дальнейшей элиминации антиоксидантными ферментами, в частности, каталазой. Каталаза относится к семейству оксидоредуктаз, которая является каталитически совершенным ферментом, обладающим способностью к быстрому разложению H_2O_2 до воды и кислорода [Sharma, Ahmad, 2014].

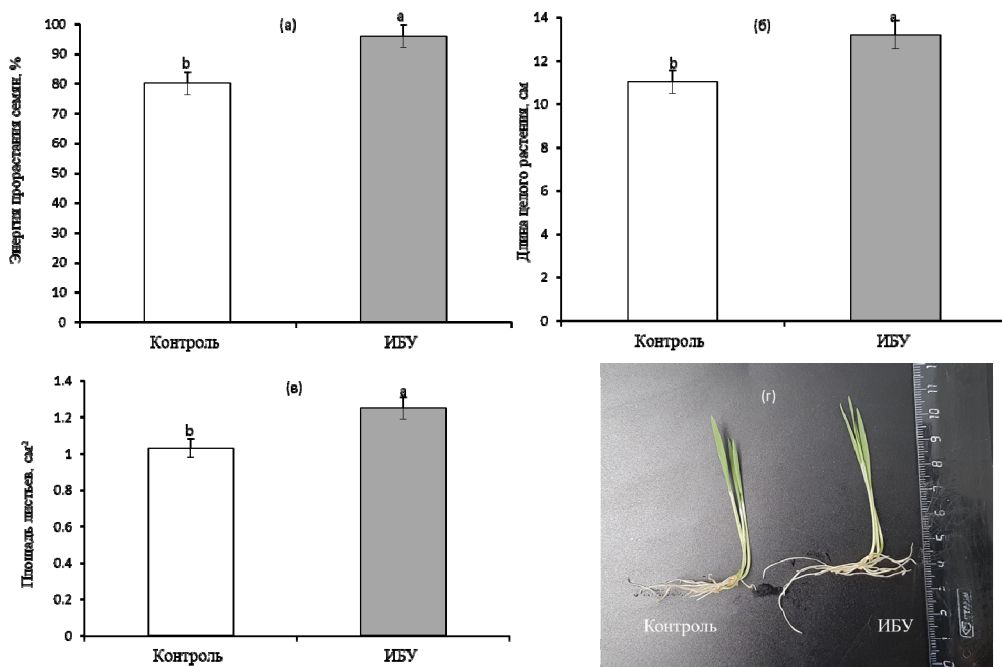


Рис. 2. Анализ влияния 100 мкМ ИБУ на ростовые показатели (3 повтора, n=100) 5-ти суточных растений пшеницы: энергия прорастания (а); длина целого растения (б); площадь листьев (в) фотография визуальной оценки вида растения (г). Различными латинскими буквами обозначены величины, различия между которыми достоверны при $P \leq 0.05$.

Fig. 2. Analysis of the effect of 100 μ M IBU on the growth parameters (3 repetitions, n = 100) of 5-day-old wheat plants: germination energy (a); length of the whole plant (b); leaf area (c); photograph of a visual assessment of the plant species (d). Different letters indicate a significant difference between the means at the level of $P \leq 0.05$.

Поэтому далее мы исследовали влияние праймирования семян 100 мкМ ИБУ на генерацию H_2O_2 и активность каталазы (КАТ) в растениях пшеницы. Обработка препаратом приводила к накоплению АФК, которое коррелировало с активацией КАТ (Рис. 1в, 1г). Эти данные указали на участие ИБУ в регуляции активности КАТ, контролирующей концентрацию внутриклеточной H_2O_2 , что дает возможность рассматривать изучаемый препарат в качестве эффективного регулятора состояния про- и антиоксидантного метаболизма, который значительно стимулирует рост растений. Данные, представленные на рис. 2, четко демонстрируют значительное увеличение показателей ростовых параметров для ИБУ-обработанных растений. Об этом свидетельствует визуальная оценка проростков (рис. 2г), увеличение энергии прорастания семян, длины растений и площади их листьев на 20-22% (рис. 1а-в).

Таким образом, данные, представленные на Рис. 1 и Рис. 2, позволяют утверждать, что значимый вклад в ростостимулирующий эффект ИБУ связан с его способностью индуцировать сбалансированное накопление АФК и активацию СОД и КАТ, что также позволяет рассматривать этот препарат в качестве антиоксиданта для растений.

Работа выполнена с привлечением приборного парка РЦКП «Агидель» и УНУ «КОДИНК».

Литература

1. Казнина Н.М., Репкина Н.С., Батова Ю.В. и др. Обработка семян салициловой кислотой усиливает экспрессию генов и активность антиоксидантных ферментов в растениях пшеницы при дефиците цинка или меди. *Доклады Российской академии наук. Науки о жизни*. 2024. 515(1). 81-86. doi: 10.31857/S2686738924020154
2. Тарчевский И.А. Метаболизм растений при стрессе. Казань. Изд-во Фэн. 2001. 448с.
3. Aebi H. Catalase *in vitro*. *Methods in Enzymology*. 1984. 105. 121–126. doi: 10.1016/S0076-6879(84)05016-3
4. Baranova EN, Kononenko NV, Lapshin PV et al. Superoxide Dismutase Premodulates Oxidative Stress in Plastids for Protection of Tobacco Plants from Cold Damage Ultrastructure Damage. *Int. J. Mol. Sci*. 2024. 25. 5544. doi: 10.3390/ijms25105544
5. Beyer WF, Fridovich I. Assaying for superoxide dismutase activity: some large consequences of minor changes in conditions // *Anal Biochem*. 1987, V. 161. P. 559. doi: 10.1016/0003-2697(87)90489-1
6. Bindschedler LV, Minibaeva F, Gardner SL et al. Early signalling events in the apoplastic oxidative burst in suspension cultured french bean cells involve cAMP and Ca^{2+} . *New Phytol*. 2001. 151(1). 185-194. doi: 10.1046/j.1469-8137.2001.00170.x
7. Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem*. 1976. 72. 248-254. doi: 10.1016/0003-2697(76)90527-3
8. Dordio A, Ferro R, Teixeira D et al. Study on the use of *Typha* spp. for the phytotreatment of water contaminated with ibuprofen. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*. 2011. 91(7-8). 654-667. doi: 10.1080/03067311003782708
9. He Y, Langenhoff AAM, Sutton NB, Rijnaarts NHM et al. Metabolism of Ibuprofen by *Phragmites australis*: Uptake and Phytodegradation. *Environ Sci Technol*. 2017. 51(8). 4576-4584. doi: 10.1021/acs.est.7b00458.
10. Iori V, Pietrini F, Zacchini M. Assessment of ibuprofen tolerance and removal capability in *Populus nigra* L. by *in vitro* culture. *Journal of Hazardous Materials*. 2012. 229–230. 217-223. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.05.097
11. Madikizela LM, Botha TL, Kamika I et al. Uptake, Occurrence, and Effects of Nonsteroidal Anti-Inflammatory Drugs and Analgesics in Plants and Edible Crops. *J. Agric. Food Chem*. 2022. 70(1). 34–45. doi: 10.1021/acs.jafc.1c06499
12. Maslennikova DR, Ivanov SP, Petrova SF. The Role of Antioxidant System Components in the Effect of Ibuprofen on Wheat Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2025. 72. 64. DOI: 10.1134/S1021443724610437
13. Minibayeva FV, Gordon LK, Kolesnikov OP et al. Role of extracellular peroxidase in the superoxide production by wheat root cells. *Protoplasma*. 2001. 217. 125. doi: 10.1007/BF01289421
14. Niu L, Liao W. Hydrogen Peroxide Signaling in Plant Development and Abiotic Responses: Crosstalk with Nitric Oxide and Calcium. *Front Plant Sci*. 2016. 7. 230. doi: 10.3389/fpls.2016.00230
15. Nurnaeimah N, Mat N, Suryati Mohd K et al. The Effects of Hydrogen Peroxide on Plant Growth, Mineral Accumulation, as Well as Biological and Chemical Properties of *Ficus deltoidea*. *Agronomy*. 2020. 10. 599. doi: 10.3390/agronomy10040599
16. Opris O, Lung I, Soran ML et al. Investigating the effects of non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) on the composition and ultrastructure of green leafy vegetables with important nutritional values. *Plant Physiol. Biochem*. 2020. 151. 342–351. doi: 10.1016/j.plaphy.2020.03.046
17. Rajput VD, Harish Singh RK, Verma KK et al. Recent Developments in Enzymatic Antioxidant Defence Mechanism in Plants with Special Reference to Abiotic

- Stress. *Biology*. 2021. 10(4). 267. doi: 10.3390/biology10040267
18. Schmidt W, Redshaw CH. Evaluation of biological endpoints in crop plants after exposure to non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs): Implications for phytotoxicological assessment of novel contaminants. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2015. 112. 212-222. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.11.008
 19. Schrader J, Shi P, Royer DL et al. Leaf size estimation based on leaf length, width and shape. *Annals of Botany*. 2021. 128(4). 395–406. doi: 10.1093/aob/mcab078
 20. Shan C, Liang Z. Jasmonic acid regulates ascorbate and glutathione metabolism in *Agropyron cristatum* leaves under water stress. *Plant Science*. 2010. 178. 130-139. doi: 10.1016/j.plantsci.2009.11.002
 21. Sharma H, Shivani G, Anjali M. Paracetamol and ibuprofen effect on seed quality attributes of *Triticum aestivum* (wheat). *Int. J. Environ. Sci.* 2018. 7(7). 44-48.
 22. Sharma I, Ahmad P. Catalase: A Versatile Antioxidant in Plants. Chapter 4 in book *Oxidative Damage to Plants*. 2014. 131-148. doi: 10.1016/B978-0-12-799963-0.00004-6
 23. Tan S, Di Donato M, Glanc M et al. Non-steroidal anti-inflammatory drugs target TWISTED DWARF1-regulated actin dynamics and auxin transport-mediated plant development. *Cell Rep.* 2020. 33. 108463. doi: 10.1016/j.celrep.2020.108463
 24. Wijaya L, Alyemeni M, Ahmad P et al. Ecotoxicological effects of ibuprofen on plant growth of *Vigna unguiculata* L. *Plants*. 2020. 9. 1473. doi: 10.3390/plants9111473
 25. Zhang T, Li N, Chen G et al. Stress symptoms and plant hormone-modulated defense response induced by the uptake of carbamazepine and ibuprofen in Malabar spinach (*Basella alba* L.). *Sci. Total Environ.* 2021. 793. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148628
- References**
1. Aebi H. Catalase *in vitro*. *Methods in Enzymology*. 1984. 105. 121–126. doi: 10.1016/S0076-6879(84)05016-3
 2. Baranova EN, Kononenko NV, Lapshin PV et al. Superoxide Dismutase Premodulates Oxidative Stress in Plastids for Protection of Tobacco Plants from Cold Damage Ultrastructure Damage. *Int. J. Mol. Sci.* 2024. 25. 5544. doi: 10.3390/ijms25105544
 3. Beyer WF, Fridovich I. Assaying for superoxide dismutase activity: some large consequences of minor changes in conditions // *Anal Biochem*. 1987, V. 161. P. 559. doi: 10.1016/0003-2697(87)90489-1
 4. Bindschedler LV, Minibaeva F, Gardner SL et al. Early signalling events in the apoplastic oxidative burst in suspension cultured french bean cells involve cAMP and Ca²⁺. *New Phytol.* 2001. 151(1). 185-194. doi: 10.1046/j.1469-8137.2001.00170.x
 5. Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem*. 1976. 72. 248-254. doi: 10.1016/0003-2697(76)90527-3
 6. Dordio A, Ferro R, Teixeira D et al. Study on the use of *Typha* spp. for the phytotreatment of water contaminated with ibuprofen. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*. 2011. 91(7-8). 654-667. doi: 10.1080/03067311003782708
 7. He Y, Langenhoff AAM, Sutton NB, Rijnaarts HHM et al. Metabolism of Ibuprofen by *Phragmites australis*: Uptake and Phytodegradation. *Environ Sci Technol.* 2017. 51(8). 4576-4584. doi: 10.1021/acs.est.7b00458.
 8. Iori V, Pietrini F, Zacchini M. Assessment of ibuprofen tolerance and removal capability in *Populus nigra* L. by *in vitro* culture. *Journal of Hazardous Materials*. 2012. 229–230. 217-223. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.05.097
 9. Kaznina NM, Repkina NS, Batova YV et al. Seeds treatment with salicylic acid increases gene expression and activity of antioxidant enzymes in wheat plants under zinc or copper deficiency. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o žizni*. 2024. 515(1). 81-86. doi: 10.31857/S2686738924020154 (In Russian)
 10. Madikizela LM, Botha TL, Kamika I et al. Uptake, Occurrence, and Effects of Nonsteroidal Anti-Inflammatory Drugs and Analgesics in Plants and Edible Crops. *J. Agric. Food Chem.* 2022. 70(1). 34–45. doi: 10.1021/acs.jafc.1c06499
 11. Maslennikova DR, Ivanov SP, Petrova SF. The Role of Antioxidant System Components in the Effect of Ibuprofen on Wheat Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2025. 72. 64. DOI: 10.1134/S1021443724610437
 12. Minibayeva FV, Gordon LK, Kolesnikov OP et al. Role of extracellular peroxidase in the superoxide production by wheat root cells. *Protoplasma*. 2001. 217. 125. doi: 10.1007/BF01289421
 13. Niu L, Liao W. Hydrogen Peroxide Signaling in Plant Development and Abiotic Responses: Crosstalk with Nitric Oxide and Calcium. *Front Plant Sci*. 2016. 7. 230. doi: 10.3389/fpls.2016.00230
 14. Nurmaeimah N, Mat N, Suryati Mohd K et al. The Effects of Hydrogen Peroxide on Plant Growth, Mineral Accumulation, as Well as Biological and Chemical Properties of *Ficus deltoidea*. *Agronomy*. 2020. 10. 599. doi: 10.3390/agronomy10040599
 15. Opris O, Lung I, Soran ML et al. Investigating the effects of non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) on the composition and ultrastructure of green leafy vegetables with important nutritional values. *Plant Physiol. Biochem.* 2020. 151. 342–351. doi: 10.1016/j.plaphy.2020.03.046

16. Rajput VD, Harish Singh RK, Verma KK et al. Recent Developments in Enzymatic Antioxidant Defence Mechanism in Plants with Special Reference to Abiotic Stress. *Biology*. 2021. 10(4). 267. doi: 10.3390/biology10040267
17. Schmidt W, Redshaw CH. Evaluation of biological endpoints in crop plants after exposure to non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs): Implications for phytotoxicological assessment of novel contaminants. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2015. 112. 212-222. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.11.008
18. Schrader J, Shi P, Royer DL et al. Leaf size estimation based on leaf length, width and shape. *Annals of Botany*. 2021. 128(4). 395–406. doi: 10.1093/aob/mcab078
19. Shan C, Liang Z. Jasmonic acid regulates ascorbate and glutathione metabolism in *Agropyron cristatum* leaves under water stress. *Plant Science*. 2010. 178. 130-139. doi: 10.1016/j.plantsci.2009.11.002
20. Sharma H, Shivani G, Anjali M. Paracetamol and ibuprofen effect on seed quality attributes of *Triticum aestivum* (wheat). *Int. J. Environ. Sci.* 2018. 7(7). 44-48.
21. Sharma I, Ahmad P. Catalase: A Versatile Antioxidant in Plants. Chapter 4 in book *Oxidative Damage to Plants*. 2014. 131-148. doi: 10.1016/B978-0-12-799963-0.00004-6
22. Tan S, Di Donato M, Glanc M et al. Non-steroidal anti-inflammatory drugs target TWISTED DWARF1-regulated actin dynamics and auxin transport-mediated plant development. *Cell Rep*. 2020. 33. 108463. doi: 10.1016/j.celrep.2020.108463
23. Tarchevsky IA. Plant metabolism under stress. 2001. Kazan. Feng Publishing House. 448 p. (In Russian)
24. Wijaya L, Alyemeni M, Ahmad P et al. Ecotoxicological effects of ibuprofen on plant growth of *Vigna unguiculata* L. *Plants*. 2020. 9. 1473. doi: 10.3390/plants9111473
25. Zhang T, Li N, Chen G et al. Stress symptoms and plant hormone-modulated defense response induced by the uptake of carbamazepine and ibuprofen in Malabar spinach (*Basella alba* L.). *Sci. Total Environ*. 2021. 793. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148628