

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ
МЕТАЛЛОВ НА АКТИВНОСТЬ АНТИОКСИДАНТНЫХ
ФЕРМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ ГЕНОТИПОВ ПШЕНИЦЫ**

Специальность: 2406.02 – Биохимия

Отрасль науки: Биология

Соискатель: **Гюнель Гусейнага гызы Исмаилова**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии

Баку – 2025

Диссертационная работа выполнена на кафедре Биофизики и биохимии Бакинского Государственного Университета.

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент НАНА
Ибрагим Вахаб оглы Азизов

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент НАНА

Новруз Магамед оглы Гулиев

доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент НАНА

Панах Зульфигар оглы Мурадов

доктор философии по биологическим наукам
Рена Руфат гызы Рагимова



Диссертационный совет ФД 2.31 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующий на базе Бакинского Государственного Университета

Председатель диссертационного совета:

доктор биологических наук, профессор
Ральфрид Ахадович Гасанов

Ученый секретарь диссертационного совета:

доктор философии по биологическим наукам, доцент
Самира Джафар гызы Салаева

Председатель научного семинара:

доктор биологических наук
Карим Уллаев оглы Гасымов



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень проработанности.

Основную часть сельскохозяйственных посевов составляют злаковые культуры, играющие важную роль в удовлетворении продовольственных потребностей мирового населения. Одна из насущных проблем современности – это нехватка продуктов питания и необходимость принятия в этих целях профилактических мер. Решением этой проблемы может стать повышение продуктивности сельскохозяйственных культур.

За последние годы возрос интерес к нанотехнологиям (НТ) в растениеводстве, что имеет решающее значение для внедрения инновационных агро-нанотехнологических инструментов в сельское хозяйство для создания высокоурожайных сортов, особенно стойких к неблагоприятным экологическим условиям¹, а также устойчивых к болезням и вредителям.

В ранних экспериментах по биотестированию наночастиц (НЧ) основное внимание уделялось исследованиям на растениях, т.к. они разнообразны и являются более доступными объектами. Хотя понятие токсичности НЧ для злаковых культур еще находится на ранней стадии изучения, их возрастающая концентрация в окружающей среде может нанести в будущем серьезный ущерб сельскому хозяйству².

Критически важно разработать методы оценки результатов воздействия (НЧ) на биообъекты, т.к. в зависимости от их концентрации и свойств они могут стимулировать или, наоборот, ингибировать биохимические процессы в растениях³.

¹ Федоренко, В.Ф. 2011. Нанотехнологии и наноматериалы в агропромышленном комплексе / В.Ф.Федоренко М.Н.Ерохин, В.И.Балабанов [и др.] – Москва: ФГБНУ “Росинформагротех”, – 2011. – 312 с.

² Bhagat, Y. Nanotechnology in agriculture: a review / Y.Bhagat, K. Gangadhara, S.Rabinal [et al.] // Journal of Pure and Applied Microbiology, – 2015, vol. 9, – p. 737-747.

³ Yatts, D., Ling, Y. Nanoparticles could have a negative effect on plant growth // Nanotechnology News, – 2007, № 3. – p. 86-92.

С этой точки зрения, для растений более целесообразно использование НЧ, профиль безопасности которых для живых систем уже определен.

Все вышеперечисленное подтверждает актуальность и важность осуществления данной исследовательской работы.

Объект и предмет исследования. Объектами исследования служили двухнедельные ростки различных сортов твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) Гырмызы бугда, Гарагылчыг-2, Ягут, Карабах и мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) Мирбашир-128, Гобустан, Шеки-1 и Дагдаш, полученные из НИИ земледелия Азербайджана, а предметом исследования было изучение влияния молярных растворов НЧ оксидов железа (Fe_2O_3), алюминия (Al_2O_3), цинка (ZnO) и титана (TiO_2) на морфофизиологические и биохимические характеристики культур.

Цель и задачи исследования.

Целью исследовательской работы являлось изучение влияния различных концентраций НЧ Fe_2O_3 , Al_2O_3 , ZnO и TiO_2 на активность и изоферментный спектр антиоксидантных ферментов, содержание фотосинтетических пигментов, урожайность растений и морфологические характеристики различных генотипов пшеницы. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучение влияния различных концентраций НЧ Fe_2O_3 , Al_2O_3 , ZnO и TiO_2 на активность аскорбатпероксидазы (АПО), полифенолоксидазы (ПФО), супероксиддисмутазы (СОД) и каталазы (КАТ) в листьях генотипов пшеницы;

2. Определение изоферментного спектра антиоксидантных ферментов (АПО, СОД, КАТ) в двухнедельных проростках различных сортов пшеницы;

3. Оценка воздействия молярных растворов НЧ Fe_2O_3 , Al_2O_3 , ZnO и TiO_2 на морфофизиологические характеристики и урожайность различных мягких и твердых сортов пшеницы в условиях нормального полива;

4. Кластеризация образцов пшеницы по показателям урожайности под действием НЧ Fe_2O_3 , Al_2O_3 , ZnO , TiO_2 и выбор высокоурожайных сортов пшеницы;

5. Изучение действия растворов НЧ Fe_2O_3 , Al_2O_3 , ZnO и TiO_2 на содержание фотосинтетических пигментов в пшеничных ростках;

6. Проведение корреляционного анализа полученных данных между активностью антиоксидантных ферментов, содержанием фотосинтетических пигментов, морфологическими особенностями и показателями урожайности ряда твердых и мягких сортов пшеницы.

Методы исследования.

После обработки семян различных генотипов пшеницы НЧ оксидов металлов, в пшеничных ростках изучали активность антиоксидантных ферментов, их изоферментный состав, содержание фотосинтетических пигментов и урожайность с применением соответствующих методов анализа.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Воздействие применяемых НЧ на проростки пшеницы носило дозозависимый характер: при низких концентрациях НЧ Fe_2O_3 , ZnO и TiO_2 стимулировали физиологические и биохимические процессы, тогда как при высоких концентрациях, наоборот, оказывали токсическое действие;

2. НЧ Al_2O_3 оказывали ингибирующее действие на активность антиоксидантных ферментов, содержание фотосинтетических пигментов и урожайность исследуемых твердых и мягких сортов пшеницы;

3. НЧ Fe_2O_3 , ZnO и TiO_2 в концентрации 0,01 мМ оказывали положительное действие на содержание фотосинтетических пигментов, морфологические особенности и структуру урожая различных твердых и мягких сортов пшеницы в условиях нормального полива;

4. Сорта твердой и мягкой пшеницы отвечают на воздействие НЧ за счет регуляции активности и изоферментного состава антиоксидантных ферментов. Изоферментный спектр указанных ферментов может изменяться в зависимости от

химической природы, фотокаталитической активности, характера взаимодействия с внутриклеточными биомолекулами и способами проникновения НЧ в клетку;

5. С точки зрения воздействия на активность антиоксидантных ферментов в изучаемых твердых и мягких сортах пшеницы в условиях нормального полива оптимальной дозой НЧ Fe_2O_3 стало 0,1 мМ, а НЧ ZnO и TiO_2 - 0,01 мМ;

6. В проростках как мягких, так и твердых сортов пшеницы была установлена высоко достоверная положительная корреляционная зависимость между активностями ПФО, КАТ, СОД ($r=0,723^{**}$; $r=0,653^{**}$; $r=0,874^{**}$) и отрицательная корреляция с активностью АПО ($r=-0,632^{**}$; $r=-0,627^{**}$; $r=-0,516^{**}$);

7. Среди исследуемых сортов пшеницы наиболее продуктивными оказались Гарагылчыг-2 (*Triticum durum* Desf.) и Дагдаш (*Triticum aestivum* L.), и это наблюдалось при воздействии 0,01 мМ концентрации наночастиц TiO_2 и ZnO .

Научная новизна исследования.

В данной исследовательской работе впервые было комплексно изучено влияние различных концентраций НЧ оксидов металлов на биохимические, физиологические и агрономические характеристики различных генотипов пшеницы, были установлены и рекомендованы оптимальные концентрации НЧ оксидов металлов, оказывающие положительное действие на активность ряда антиоксидантных ферментов, содержание фотосинтетических пигментов и урожайность сортов пшеницы, избранных в качестве объектов исследования, в условиях нормального полива.

Кроме того, был изучен изоферментный спектр СОД, КАТ и АПО, что открывает новые горизонты для дальнейших биохимических исследований. Определены корреляционные зависимости между исследуемыми показателями, и наряду с этим обсуждены возможные механизмы воздействия НЧ. Полученные результаты позволяют выдвинуть идею о функционировании НЧ как стимуляторов роста и их роли в увеличении устойчивости растений.

Таким образом, анализ реакций различных генотипов пшеницы на воздействие НЧ позволил выявить наиболее устойчивые сорта, которые имеют важное значение в развитии сельскохозяйственных работ в Азербайджане.

Практическая и теоретическая значимость работы. Исследование влияния НЧ на работу фотосинтетического аппарата и морфофизиологические характеристики проростков расширяет представление о возможностях управления урожайностью культур через внешнее воздействие.

Проведенные работы продемонстрировали положительное или отрицательное воздействие НЧ оксидов металлов на активность ферментов антиоксидантной защитной системы, морфофизиологические особенности и показатели урожайности у двухнедельных проростков различных мягких и твердых сортов пшеницы, что имеет большую практическую значимость. Возрастание активности АПО в проводимых нами экспериментах доказывает защитную функцию растений, направленную на восстановление гидроксильных радикалов. В целях минимизации рисков, избегания негативного воздействия НЧ и обеспечения безопасности злаковых культур были рекомендованы оптимальные дозы НЧ Fe_2O_3 , TiO_2 и ZnO . Эти дозы оказывали положительное воздействие на морфофизиологические признаки и урожайность исследуемых сортов пшеницы в условиях нормального полива. Также были обсуждены возможные механизмы действия НЧ. Генотип Дагдаш, как невосприимчивый к воздействию повышенных доз НЧ Fe_2O_3 , может быть рекомендован для использования в качестве ценного первичного материала в селекции растений для создания устойчивых генотипов пшеницы.

Данный подход может быть внедрен в практику сельского хозяйства для разработки рекомендаций по оптимизации использования НЧ в агрономии для выведения новых сортов пшеницы с повышенной устойчивостью к стрессам и улучшенными продуктивными свойствами.

Апробация научно-исследовательской работы. Результаты диссертации докладывались на различных

международных местных и зарубежных конференциях: материалы XXIII Республиканской научной конференции докторантов и молодых исследователей при Министерстве Образования АР (Баку, 2019); материалы IX Международной научной конференции “Инновационные подходы в современной биологии”, посвященной 100-летию Бакинского Государственного Университета (Баку, 2019); материалы XIX Международной научно-практической конференции: “Интеграционные процессы в современной науке: новые подходы и актуальные вопросы” (РФ, Анапа, 2024); материалы LXXXI-LXXXIII международной научно-практической конференции: “Химия, физика, биология, математика: теоретические и прикладные исследования” (РФ, Москва, 2024); материалы научно-практической конференции на тему “Роль общенационального лидера Гейдара Алиева в оздоровлении окружающей среды Азербайджана” (Баку, 2024); материалы LXXVII Международной научно-практической конференции: “Естественные науки и медицина: теория и практика” (РФ, Новосибирск, 2024); II Международная Конференция Защиты Растений (Пакистан, Тандолам, 2025).

Основные результаты диссертации были опубликованы в местных и зарубежных изданиях. Всего опубликовано 18 научных трудов (10 статей, 8 материалов конференции).

Место проведения научно-исследовательской работы. Работа была проведена на кафедре Биофизики и биохимии Бакинского Государственного Университета.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения (12473 символа), 5 глав (I глава (42718 символов), II глава (17158 символов), III глава (32455 символов), IV глава (75533 символа), V глава (9529 символов)), заключения (2747 символов), выводов (2184 символа), практических рекомендаций (512 символов), списка литературы, включающий 282 источника и списка сокращений (323 символа), занимает 178 компьютерных страниц, общий ее объем составляет 195632 символа. Диссертация включает 20 рисунков и 8 таблиц.

ГЛАВА I. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В главе представлены сведения об основных событиях в истории развития НТ, был осуществлен сравнительный анализ библиографических данных о воздействии НЧ различных оксидов металлов на морфофизиологические особенности, активность антиоксидантной системы (АОС) растений. Согласно литературным источникам, применение НЧ в растениеводстве позволит получить в будущем высокоурожайные генотипы, и в особенности устойчивые к неблагоприятным условиям окружающей среды.

ГЛАВА II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования выбрали сорта твердой пшеницы Гырмызы бугда, Гарагылчыг-2, Ягут, Карабах и мягкой пшеницы Мирбашир-128, Гобустан, Шеки-1 и Дагдаш, приобретенные в НИИ Земледелия Азербайджана. Семена этих сортов обрабатывали растворами НЧ оксидов металлов различной молярности с использованием методов нанопрайминга и ультрасонификации⁴. У двухнедельных проростков, выращенных в условиях нормального полива, определяли активность ферментов ПФО⁵, АПО¹², СОД⁶ и КАТ⁷, используя спектрофотометрический и титриметрический методы анализа. Определение изоферментного спектра антиоксидантных ферментов проводилось электрофоретическим методом в

⁴Marthandan, V.J. Seed priming: a feasible strategy to enhance drought tolerance in crop plants / V.J. Marthandan, R. Geetha, K. Kumutha [et al.] // Int. J. Mol. Sci., – 2020, vol. 21, – p. 1-23.

⁵Ермаков И.П. и др. Физиология растений: учебник для студ. вузов. Москва: Академия, – 2007. – 465 с.

⁶ Никерова, К.М. Определение активности супероксиддисмутазы и полифенолоксидазы в древесине *Betula pendula* var. *carelica* (*Betulaceae*) при разной степени нарушения ксилогенеза / К.М.Никерова, Н.А.Галибина, Ю.Л.Мошенская [и др.] // Растительные ресурсы, – Санкт-Петербург – 2019, т. 55, №2, – с. 213-230

⁷Шапкарин, В.В. Биохимия: сборник лабораторных работ / В.В. Шапкарин, А.П.Королев, С.Б.Гридина [и др.] – Кемерово: изд-во Кемеровского технологич. ин-та пищевой промышленности, – 2005. – 84 с.

полиакриламидном геле (PAGE) при постоянном электрическом токе 30 мА в течение 3 часов при температуре 4°С^{8, 9, 10}. Для КАТ использовали 7% гель, а для СОД и АПО - 10%-ные гели. Изоферменты обнаруживали в результате окрашивания гелей красящими буферами, соответствующими каждому ферменту. Для установления содержания фотосинтетических пигментов были использованы методы спектрального анализа¹¹. Оценка показателей урожайности различных сортов пшеницы проводилась по методу международных дескрипторов.

Статистические методы анализа. Все эксперименты проводились в 3-х кратной биологической повторности, проверку значимости различий между контрольными и опытными сериями проводили по t-критерию Стьюдента, различия в средних значениях считались значимыми при $p \leq 0,01$ и $p \leq 0,05$. Корреляционный анализ исследуемых показателей осуществляли с помощью метода Пирсона, а кластеризацию на основе показателей урожайности генотипов пшеницы проводили методом Уорда на основе индекса генетического расстояния Эвклида с помощью программы IBM SPSS Statistics 26.0.

ГЛАВА III. ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ НА АКТИВНОСТЬ АНТИОКСИДАНТНЫХ ФЕРМЕНТОВ В ЛИСТЯХ ПШЕНИЦЫ

В этой главе представлены результаты изучения влияния различных концентраций НЧ оксидов металлов на активности

⁸Davis, B.J. Disc Electrophoresis-II method and application to human serum proteins // Annals of the New York Academy of Sciences, – 1964, vol. 121, – p. 404-427.

⁹Mittler, R., Zilinskas, B.A. Detection of ascorbate peroxidase activity in native gels by inhibition of the ascorbate-dependent reduction of nitroblue tetrazolium. // Analytical Biochemistry, – 1993, vol. 212, – p. 540-546.

¹⁰Anderson, M.D., Prasad, T.K., Steward, C.R. Changes in isozyme profiles of catalase, peroxidase, and glutathione reductase during acclimation to chilling in mesocotyls of maize seedlings // Plant Physiol, – 1995, vol. 109 (4), – p. 1247-1257.

¹¹Калинина, А.В., Лящева, С.В. Состав и содержание пигментов фотосинтеза в листьях проростков озимой мягкой пшеницы // – Самара: Известия Самарского научного центра Российской академии наук, – 2018, т. 20, № 2 (2), – с. 286-290.

ферментов СОД, КАТ, АПО и ПФО, анализа изоферментов и проведен сравнительный обзор полученных результатов с библиографическими источниками.

3.1. Влияние различных концентраций НЧ оксида трехвалентного железа на активность антиоксидантных ферментов в листьях пшеницы

В процессе жизнедеятельности растения периодически или непрерывно подвергаются воздействию неблагоприятных факторов среды обитания, что ведет к нарастанию производства активных форм кислорода (АФК), уровень которых в клетке растений контролируется АОС.

В ходе экспериментов для обработки различных семян пшеницы использовали разные концентрации НЧ Fe_2O_3 (0,1 мМ; 0,2 мМ; 0,3 мМ и 0,6 мМ).

3.1.1. Влияние различных концентраций НЧ оксида трехвалентного железа на активность аскорбатпероксидазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Результаты работ показали различие в активности АПО у опытных и контрольных образцов изучаемых сортов пшеницы при воздействии НЧ Fe_2O_3 (рисунок 1).

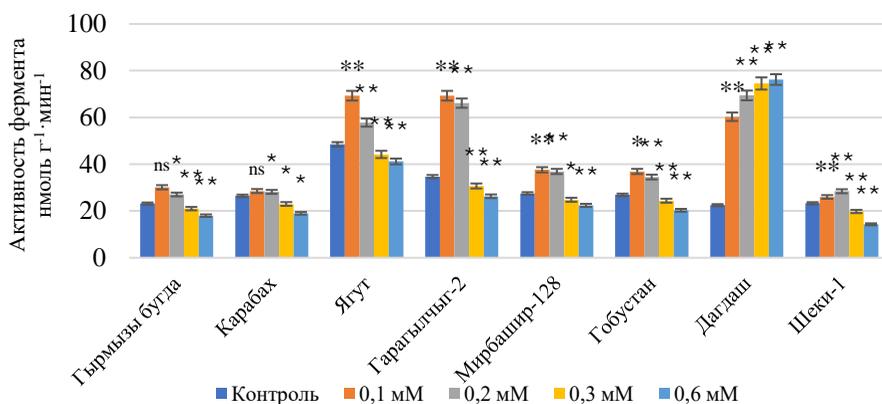


Рисунок 1. Влияние НЧ Fe_2O_3 на активность АПО в пшеничных ростках

Анализ показал, что действие 0,1 мМ и 0,2 мМ концентраций НЧ способствовало генерации АФК, что активизировало защитные механизмы клетки, увеличивая тем самым активность АПО. В проростках сортов пшеницы Карабах и Гырмызы бугда влияние НЧ на активность фермента было незначительным, тогда как у пшеницы сортов Ягут и Гарагылчыг-2 в сравнении с контрольным вариантом активность АПО увеличивалась на 42%, 19% и 100%, 91% соответственно. Что касается мягких сортов пшеницы, то в проростках сорта Шеки-1 изменение активности фермента в сравнении с контролем было незначительным, хотя в ростках Мирбашир-128 и Гобустан этот показатель повышался в сравнении с контролем на 36%, 34% и 37%, 28% соответственно.

Наибольшая активность АПО наблюдалась в проростках сорта Дагдаш при обработке НЧ с концентрацией 0,6 мМ, наименьшая при той же концентрации - в образцах сорта Шеки-1. За исключением сорта Дагдаш, во всех остальных вариантах увеличение концентрации НЧ влекло за собой снижение активности АПО, что говорит о токсическом эффекте высокой дозы НЧ оксида металла.

При концентрациях 0,3 мМ и 0,6 мМ НЧ Fe_2O_3 в образцах Гарагылчыг-2, Гырмызы бугда и Карабах ферментативная активность АПО в сравнении с контролем понижалась соответственно до 2%, 25%; 10%, 20% и 13%, 28%, в проростках Ягут снижалась до 9%, 15%, а у образцов генотипов Гобустан и Мирбашир-128 снижалась по сравнению с контролем до 7%, 25% и 10%, 19% соответственно. В проростках сорта Шеки-1 при действии двух последних концентраций отслеживалось уменьшение активности АПО, что составило в сравнении с контролем 15% и 39% соответственно.

Ингибирующий эффект повышенных концентраций НЧ можно объяснить перегрузкой защитных механизмов клеток в ответ на большое количество образованных АФК.

Детальное рассмотрение полученных данных позволило установить, что при концентрации НЧ Fe_2O_3 0,1 мМ в сортах Гарагылчыг-2 и Ягут образовывалось умеренное количество активных форм кислорода, поэтому, эти сорта обладали

сбалансированной степенью свободнорадикальных оксидативных процессов, нежели другие варианты.

3.1.2. Влияние различных концентраций НЧ оксида трехвалентного железа на активность полифенолоксидазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Максимальная активность ПФО наблюдалась у проростков сорта Мирбашир-128 при концентрации НЧ 0,1 мМ (рисунок 2). Минимальная же активность ПФО обнаружена в генотипе Ягут при воздействии НЧ с концентрацией 0,6 мМ, при этом окисления фенолов, можно сказать, не происходило.

Как видно из рисунка 2, у всех генотипов, за исключением сорта Дагдаш, с повышением концентрации НЧ Fe_2O_3 активность ПФО уменьшалась. В проростках генотипа Ягут окисление полифенолов под влиянием НЧ с концентрацией 0,6 мМ уменьшилось на 87%, что можно объяснить их цитотоксическим эффектом. В проростках сортов Гырмызы бугда и Карабах повышенная активность фермента отмечалась при первых двух концентрациях НЧ, в то время как у сортов Ягут и Гарагылычг-2 опытные варианты мало отличались от контрольных. Вероятно, эти различия связаны с индивидуальными особенностями каждого сорта пшеницы.

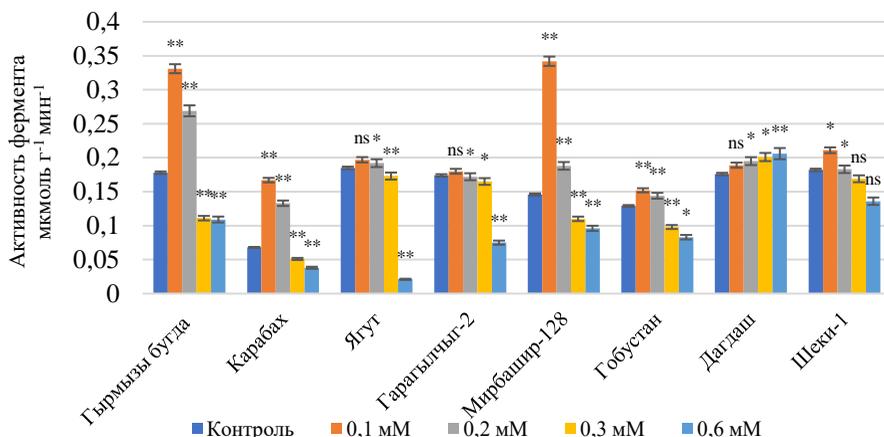


Рисунок 2. Влияние НЧ Fe_2O_3 на активность ПФО в пшеничных ростках

Что касается мягких сортов пшеницы, при действии НЧ с концентрацией 0,6 мМ, в трех из четырех протестированных сортов обработка семян приводила к понижению скорости окисления полифенолов, что носило более выраженный характер для ростков сорта Гобустан и составляло приблизительно 36% по сравнению с контролем. Высокая активность фермента отмечалась при 0,1 мМ и 0,2 мМ концентрациях НЧ в ростках сорта Мирбашир-128, тогда как при концентрации 0,6 мМ в проростках данного сорта НЧ практически не способствовали повышению активности ПФО. Возможно, это связано с повреждением клеточных мембран и белков, вызванных избыточным накоплением АФК в ответ на действие повышенных доз НЧ.

В проростках Дагдаш с повышением концентрации НЧ, активность фермента также увеличивалась, что можно объяснить генетическими особенностями сорта.

Таким образом, в ходе выполненных работ было установлено, что скорость метаболизма фенолов под влиянием НЧ в ростках пшеницы обуславливалась как индивидуальными особенностями, так и дозой НЧ. Вследствие этого изучение окисления полифенолов под действием НЧ оксидов металлов в разных сортах пшеницы представляет большой потенциал для их дальнейшего исследования в этом направлении.

3.1.3. Влияние различных концентраций НЧ оксида трехвалентного железа на активность каталазы в ростках разных сортов *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Наивысшая активность фермента КАТ отмечалась у проростков сорта Мирбашир-128 при воздействии НЧ с концентрацией 0,1 мМ, что примерно в 2,5 раза больше контрольных значений данного сорта. Минимальная активность фермента была отмечена у ростков Карабах под действием НЧ с концентрацией 0,6 мМ (рисунок 3).

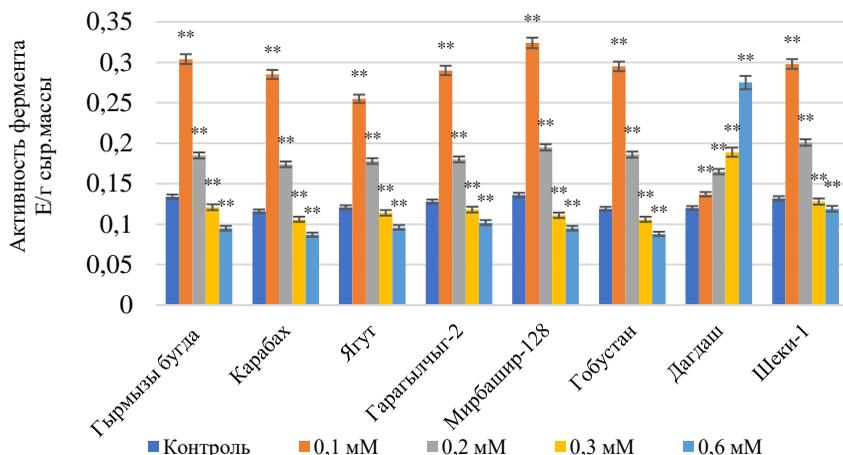


Рисунок 3. Влияние НЧ Fe₂O₃ на активность КАТ в пшеничных ростках

Относительно низкие концентрации (0,1-0,2 мМ) НЧ оказывали стимулирующее действие на активность КАТ. При концентрации НЧ 0,6 мМ активность фермента заметно снижалась во всех исследуемых сортах пшеницы, за исключением проростков Дагдаш. Это можно объяснить чрезмерным накоплением АФК при действии повышенных доз НЧ, вызывающим ослабление ферментативной активности и деградацию мембран клеток. Наряду с этим, не следует забывать об индивидуальных особенностях проростков пшеницы. Судя по результатам исследований, наиболее оптимальной концентрацией НЧ при действии на активность КАТ оказалась 0,1 мМ.

3.1.4. Влияние различных концентраций НЧ оксида трехвалентного железа на активность супероксиддисмутазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Действие НЧ Fe₂O₃ с концентрациями 0,1 мМ и 0,2 мМ способствовало повышению активности фермента у всех исследуемых сортов, а при действии НЧ с концентрациями 0,3

мМ и 0,6 мМ наблюдалось значительное снижение активности СОД у всех генотипов за исключением сорта Дагдаш (рисунок 4).

Как известно, низкие концентрации НЧ действуют стимулирующе, тогда как повышенные дозы за счет образования множественного количества АФК, повреждающих клеточные структуры, ингибируют работу АОС.

Наивысшая активность фермента была характерна для проростков генотипа Карабах при концентрации НЧ 0,1 мМ, что приблизительно на 83% выше контроля. Наименьшая активность наблюдалась у ростков генотипа Шеки-1 при действии НЧ с концентрацией 0,6 мМ.

Таким образом, увеличение активности различных антиоксидантных ферментов генотипа Дагдаш при увеличении концентрации НЧ Fe_2O_3 позволяет рекомендовать его использование в селекции устойчивых сортов пшеницы.

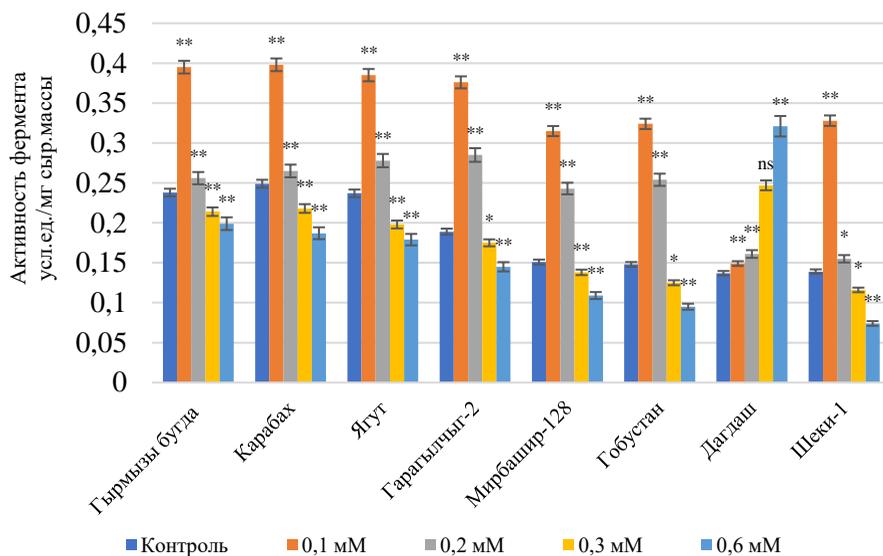


Рисунок 4. Влияние НЧ Fe_2O_3 на активность СОД в пшеничных ростках

3.2. Влияние различных концентраций НЧ оксида алюминия на активность антиоксидантных ферментов в листьях пшеницы

В экспериментах для обработки семян различных генотипов пшеницы использовали 0,001 мМ, 0,01 мМ и 0,1 мМ и растворы НЧ оксида алюминия.

3.2.1. Влияние различных концентраций НЧ оксида алюминия на активность аскорбатпероксидазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Среди твердых сортов пшеницы минимальная активность фермента отмечалась у проростков сорта Гырмызы бугда под действием НЧ Al_2O_3 с концентрацией 0,1 мМ, что в 4-5 раз ниже контроля. Что касается мягких сортов пшеницы, наименьшая активность АПО при той же концентрации НЧ была характерна для генотипа Дагдаш. Наивысшая активность фермента отмечалась у проростков контрольной группы как у твердого генотипа Ягут, так и у мягкого сорта пшеницы Мирбашир-128 (рисунок 5).

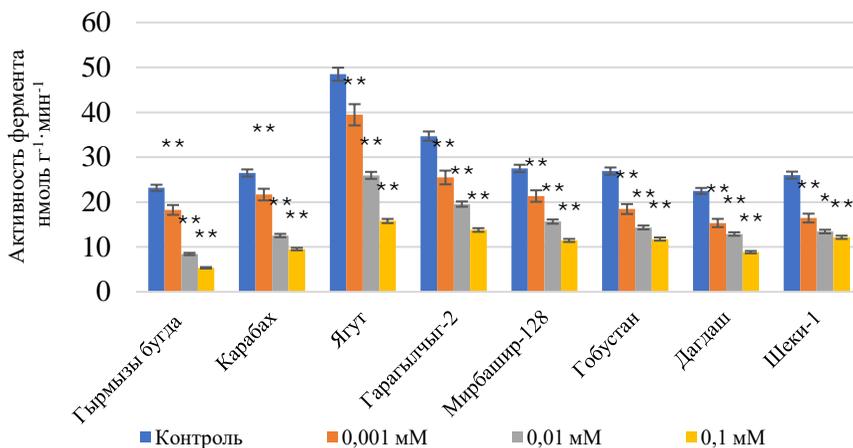


Рисунок 5. Влияние НЧ Al_2O_3 на активность АПО в пшеничных ростках

Таким образом, анализ представленных данных показал, что с повышением концентрации НЧ активность АПО уменьшалась. Следовательно, влияние повышенных доз НЧ Al_2O_3 отрицательно действовало на активность ферментов, и соответственно, на функционирование АОС в растениях.

3.2.2. Влияние различных концентраций НЧ оксида алюминия на активность полифенолоксидазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

НЧ оказывали ингибирующее действие на активность фермента при всех исследуемых концентрациях. Наивысшая активность ПФО была характерна для контрольного варианта проростков генотипа Мирбашир-128, наименьшая – для сорта Шеки-1 при концентрации НЧ 0,1 мМ, что приблизительно на 73% ниже контроля (рисунок 6).

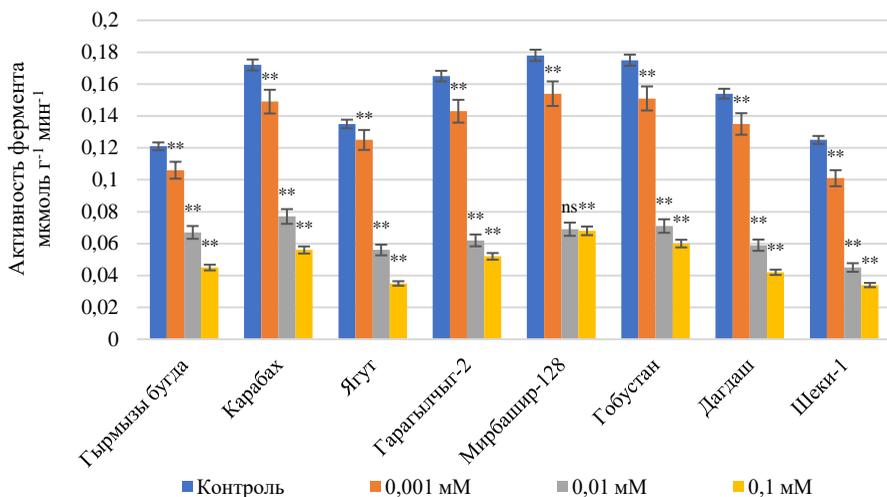


Рисунок 6. Влияние НЧ Al_2O_3 на активность ПФО в пшеничных ростках

Исследуя полученные данные, можно заметить, что с повышением концентрации НЧ ингибирующий эффект их действия возрастал. Следовательно, применение НЧ Al_2O_3 в сельском хозяйстве нецелесообразно.

3.2.3 Влияние различных концентраций НЧ оксида алюминия на активность каталазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Максимальная активность фермента наблюдалась у контрольных вариантов сорта Гобустан (1,91 Е/г). Наименьшая активность КАТ была характерна для проростков генотипа Шеки-1 при воздействии НЧ с концентрацией 0,1 мМ (рисунок 7).

Анализ результатов показал, что с повышением концентрации НЧ Al_2O_3 ингибирующий характер их действия на функционирование АОС усиливался, что могло бы в будущем выявлять допустимые риски, связанные с применением данных НЧ в агрономии.

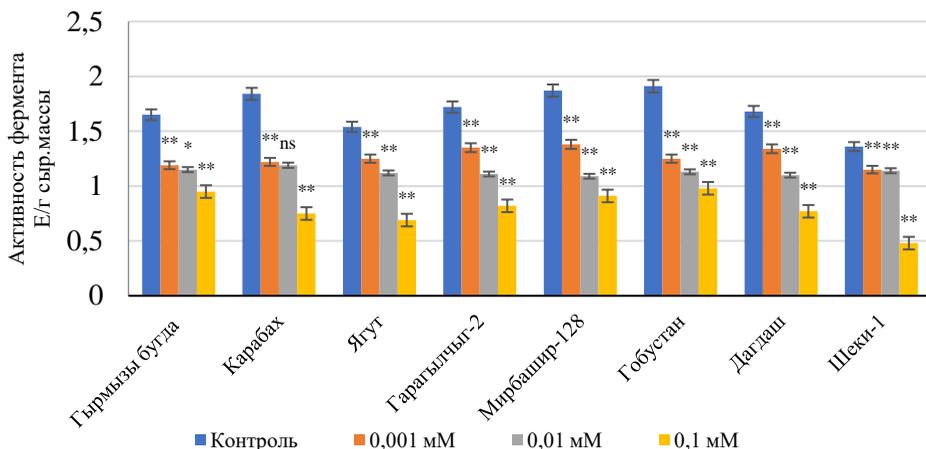


Рисунок 7. Влияние НЧ Al_2O_3 на активность КАТ в пшеничных ростках

3.2.4. Влияние различных концентраций НЧ оксида алюминия на активность супероксиддисмутазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Эффект воздействия НЧ носил дозозависимый характер, наивысшая активность фермента отмечалась у контрольных образцов генотипа Гобустан, минимальная же активность СОД

была характерна для ростков Шеки-1 при действии НЧ с концентрацией 0,1 мМ (рисунок 8).

Все концентрации НЧ имели ингибирующий характер воздействия на активность СОД. 0,1 мМ концентрация НЧ вызывала значительное снижение активности СОД в проростках пшеницы, что доказывает их токсическое действие.

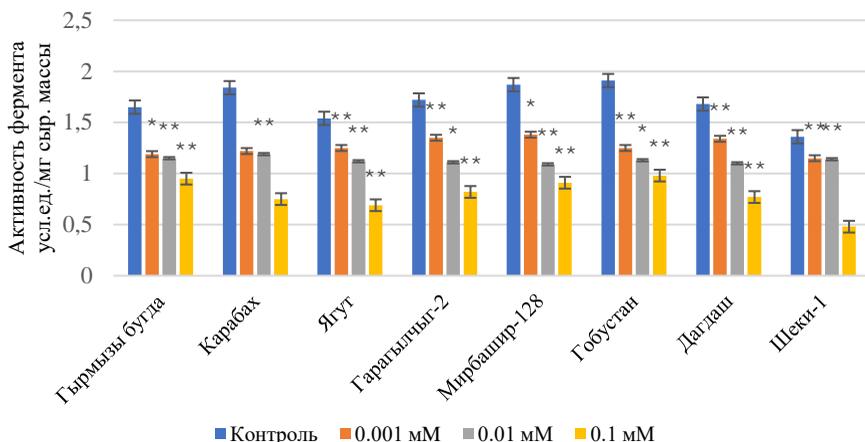


Рисунок 8. Влияние НЧ Al_2O_3 на активность СОД в пшеничных ростках

3.3 Влияние различных концентраций НЧ оксида цинка на активность антиоксидантных ферментов в листьях пшеницы

В ходе проведенных исследований было изучено влияние НЧ с концентрациями 0,001 мМ, 0,01 мМ и 0,1 мМ на активность антиоксидантных ферментов у проростков различных сортов пшеницы.

3.3.1. Влияние различных концентраций НЧ оксида цинка на активность аскорбатпероксидазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

НЧ оказывали положительное действие на активность АПО в проростках пшеницы при всех исследуемых концентрациях.

Согласно рисунку 9, 0,01 мМ концентрация НЧ оказывала оптимальное воздействие на активность фермента во всех генотипах за исключением сортов Шеки-1 и Мирбашир-128.

Максимальная активность фермента наблюдалась у сорта Гобустан при концентрации НЧ 0,01 мМ (этот показатель на 164% выше контроля), минимальная – у проростков сорта Гырмызы бугда при концентрации НЧ 0,001 мМ (рисунок 9).

Хотя 0,01 мМ концентрация НЧ оказалась наиболее оптимальной для всех исследуемых сортов пшеницы, 0,1 мМ и 0,001 мМ концентрации НЧ также оказывали положительное действие на активность фермента. А это позволяет предположить зависимость действия НЧ на активность АПО от индивидуальных особенностей генотипов пшеницы.

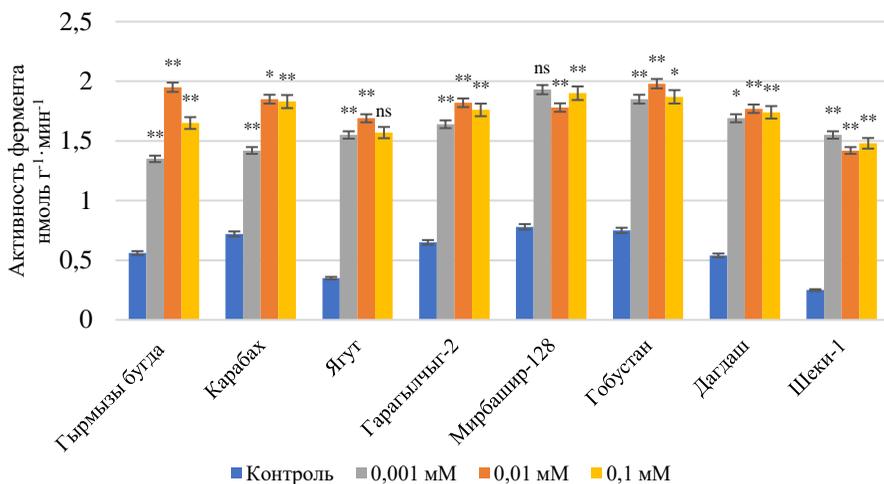


Рисунок 9. Влияние НЧ ZnO на активность АПО в пшеничных ростках

3.3.2. Влияние различных концентраций НЧ оксида цинка на активность полифенолоксидазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Согласно результатам проведенных экспериментов, НЧ ZnO всех исследуемых концентраций оказывали стимулирующее действие на активность ПФО в проростках изучаемых сортов

пшеницы, а оптимальная концентрация была установлена при 0,01 мМ. Максимальные показатели активности ПФО отмечались при действии НЧ с концентрацией 0,01 мМ, а минимальные - при действии НЧ с концентрацией 0,001 мМ, за исключением проростков генотипов Мирбашир-128 и Шеки-1 (рисунок 10).

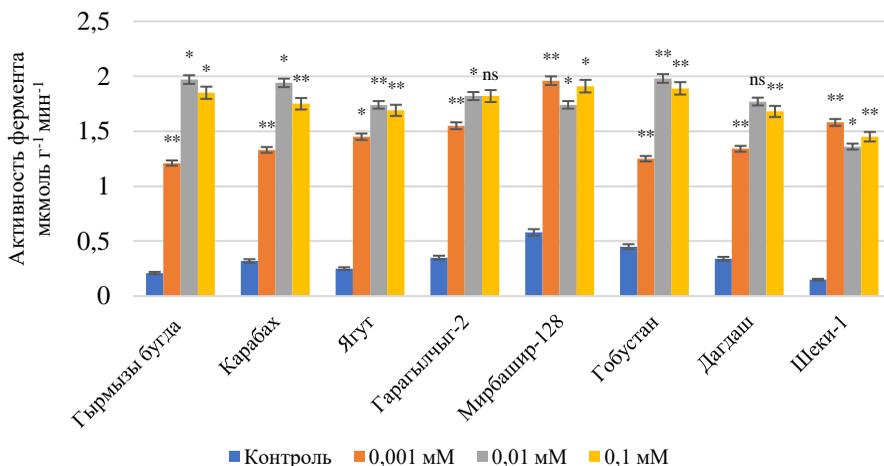


Рисунок 10. Влияние НЧ ZnO на активность ПФО в пшеничных ростках

На основе полученных данных можно сказать, что наивысшая активность фермента была характерна для проростков генотипа Гобустан при концентрации НЧ 0,01 мМ, что примерно в четыре-пять раз больше контроля. Минимальная активность ПФО среди исследуемых образцов была отмечена у проростков генотипа Гыргызы бугда при действии 0,001 мМ концентрации НЧ.

3.3.3. Влияние различных концентраций НЧ оксида цинка на активность каталазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Наивысшая активность КАТ из всех генотипов твердой пшеницы была установлена у проростков Гыргызы бугда при концентрации 0,01 мМ НЧ, что в пять раз выше показателей контроля для данного генотипа, а из генотипов мягкой пшеницы

максимальная активность фермента при действии той же концентрации НЧ наблюдалась у проростков сорта Гобустан.

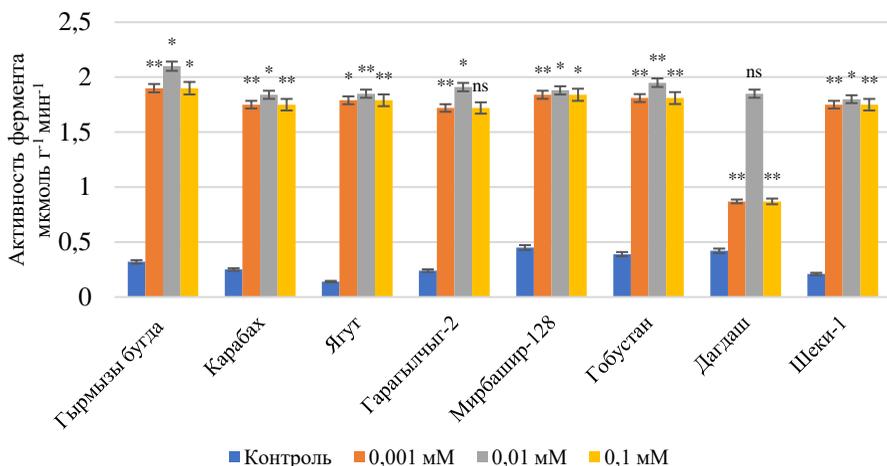


Рисунок 11. Влияние НЧ ZnO на активность КАТ в пшеничных ростках

Минимальная активность фермента из генотипов твердой пшеницы была характерна для сорта Гарагылчыг-2 при действии НЧ с концентрацией 0,001 мМ, а из мягких сортов – для проростков генотипа Дагдаш при концентрации 0,1 мМ, что дает нам основание говорить о зависимости воздействия НЧ на активность КАТ от индивидуальных особенностей исследуемых культур (рисунок 11). Несмотря на это, на основании полученных результатов было обнаружено, что концентрацией НЧ, оказывающих оптимальное действие на активность КАТ, была 0,01 мМ.

3.3.4. Влияние различных концентраций НЧ оксида цинка на активность супероксиддисмутазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Как видно из рисунка 12, результаты действия НЧ на проростки мягкой и твердой пшеницы имели различия. В проростках пшеницы мягких и твердых сортов, за исключением генотипов Мирбашир-128 и Шеки-1, активность СОД под

воздействием различных концентраций НЧ по сравнению с контролем возростала, но несмотря на это, оптимальной определена концентрация НЧ 0,01 мМ.

Среди твердых сортов пшеницы максимальная активность СОД была характерна для проростков Гырмызы бугда при воздействии НЧ с концентрацией 0,01 мМ, что в пять раз выше контроля. Что же касается мягких генотипов, то наивысшая активность отмечалась при той же концентрации НЧ у проростков сорта Гобустан.

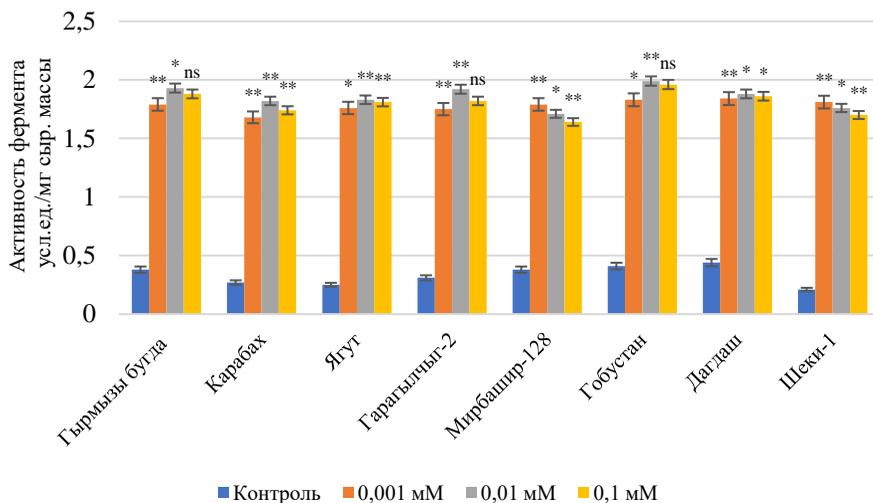


Рисунок 12. Влияние НЧ ZnO на активность СОД в пшеничных ростках

Минимальная активность фермента СОД среди опытных вариантов мягкой и твердой пшеницы была характерна для сортов Карабах и Мирбашир-128 при концентрациях НЧ 0,001 мМ и 0,1 мМ соответственно.

Таким образом, анализ полученных данных позволил предположить, что воздействие НЧ на активность СОД в исследуемых генотипах пшеницы также зависит от генотипических особенностей сортов.

3.4. Влияние различных концентраций НЧ диоксида титана на активность антиоксидантных ферментов в листьях пшеницы

В ходе проведения исследований было изучено воздействие НЧ TiO_2 в концентрациях 0,001 мМ, 0,01 мМ и 0,1 мМ на активность антиоксидантных ферментов в листьях различных генотипов пшеницы.

3.4.1. Влияние различных концентраций НЧ диоксида титана на активность аскорбатпероксидазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

НЧ TiO_2 при всех исследуемых концентрациях оказывали стимулирующее действие на активность АПО в проростках различных сортов пшеницы, а оптимальной концентрацией НЧ была 0,01 мМ (рисунок 13). Максимальная активность фермента была отмечена у генотипа Гобустан при концентрации НЧ 0,01 мМ, а минимальная – у образцов Гырмызы бугда при действии НЧ с концентрацией 0,001 мМ.

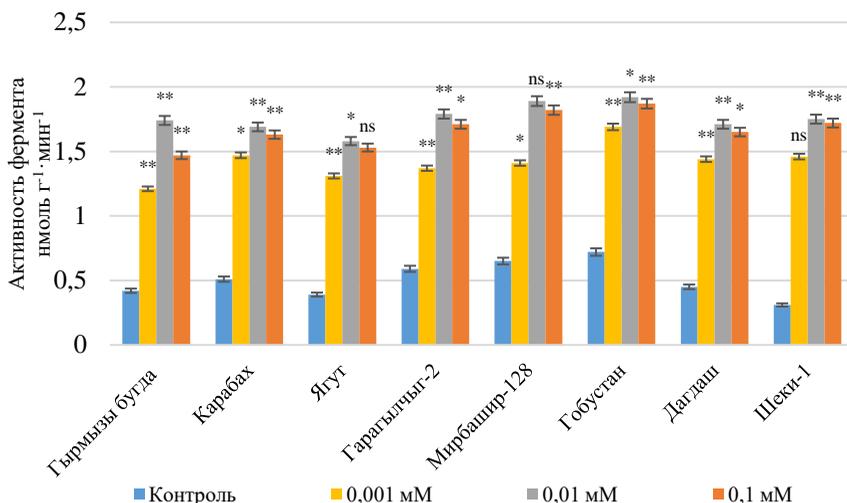


Рисунок 13. Влияние НЧ TiO_2 на активность АПО в пшеничных ростках

Несмотря на положительное действие 0,1 мМ концентрации НЧ на активность АПО в сортах пшеницы, эффект воздействия

данной концентрации имел менее выраженное стимулирующее действие. Кроме того, в целях минимизации рисков и избегания негативного воздействия НЧ, 0,01 мМ концентрация будет безопаснее для изучаемых сортов пшеницы.

3.4.2. Влияние различных концентраций НЧ диоксида титана на активность полифенолоксидазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Согласно результатам экспериментов, НЧ при всех исследуемых концентрациях оказывали положительное действие на активность ПФО у изучаемых сортов пшеницы (рисунок 14).

Мониторинг полученных данных о действии НЧ на активность ПФО в листьях пшеницы позволил установить 0,01 мМ концентрацию оптимальной. Было обнаружено, что при воздействии на образцы пшеницы других концентраций НЧ активность фермента в сравнении с контролем также повышалась. Но несмотря на это, максимальные значения были отмечены у проростков сорта Гобустан при концентрации НЧ 0,01 мМ, что на 156% выше контроля этого сорта.

Минимальная активность ПФО была характерна для сорта Гырмызы бугда при воздействии НЧ с концентрацией 0,001 мМ.

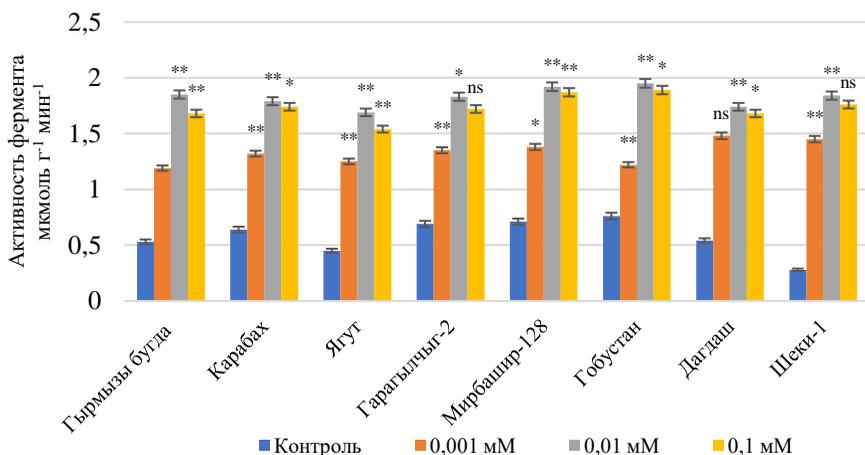


Рисунок 14. Влияние НЧ TiO₂ на активность ПФО в пшеничных ростках

3.4.3. Влияние различных концентраций НЧ диоксида титана на активность каталазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

НЧ при всех концентрациях оказывали стимулирующее действие на активность фермента в исследуемых сортах пшеницы.

Максимальная активность КАТ была характерна для проростков сорта Гобустан при концентрации НЧ 0,01 мМ, у твердых сортов – для ростков сорта Гарагылчыг-2. Минимальная активность КАТ при действии НЧ Шеки-1 и Ягут при концентрации НЧ 0,1 мМ (рисунок 15).

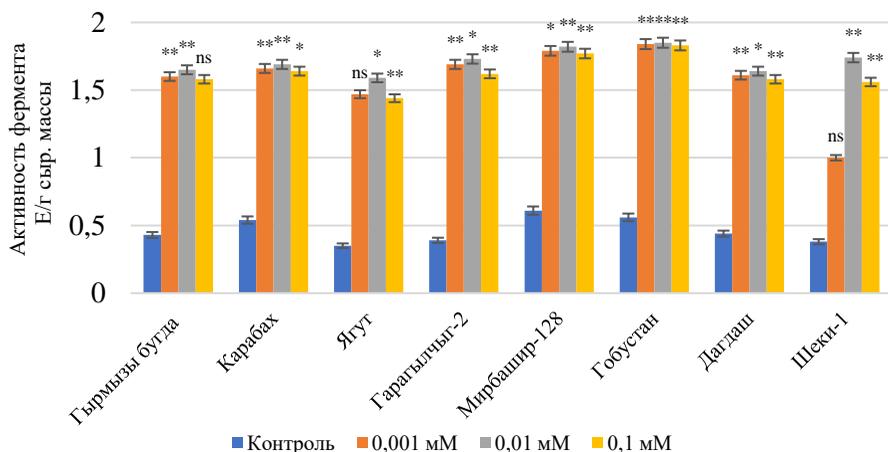


Рисунок 15. Влияние НЧ TiO_2 на активность КАТ в пшеничных ростках

3.4.4. Влияние различных концентраций НЧ диоксида титана на активность супероксиддисмутазы в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Во всех исследуемых сортах пшеницы было установлено стимулирующее действие НЧ на активность СОД. Из генотипов твердой пшеницы наивысшие показатели активности фермента были характерны для проростков Гарагылчыг-2, а среди мягких

сортов – проростков сорта Шеки-1 при действии НЧ с концентрацией 0,01 мМ (рисунок 16).

Полученные значения были намного выше контроля, следовательно, 0,01 мМ можно считать оптимальной концентрацией НЧ при действии на активность СОД. Что касается минимальной активности фермента, она наблюдалась под действием НЧ с концентрацией 0,001 мМ у сортов Карабах и Мирбашир-128 (рисунок 16).

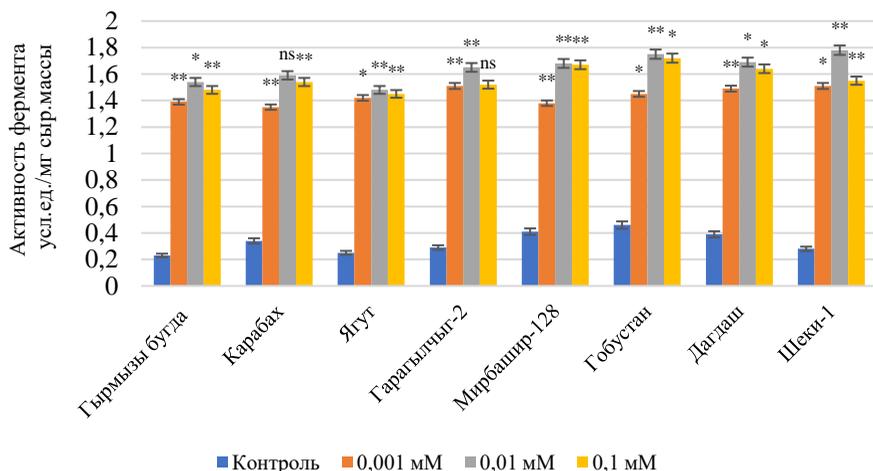


Рисунок 16. Влияние НЧ TiO₂ на активность СОД в пшеничных ростках

На основании данных, представленных в этой главе, можно сделать общее заключение, что НЧ оксидов различных металлов могут оказывать воздействие на активность антиоксидантных ферментов и это действие носит дозозависимый характер. Так, результаты воздействия НЧ на растения зависят как от сорта, так и от применяемой концентрации НЧ, поэтому прежде чем использовать их, следует установить тип и оптимальную дозу НЧ, оказывающих положительное влияние на метаболические процессы, ускоряющие процессы фотосинтеза, увеличивающие содержание хлорофиллов, и активность антиоксидантных ферментов.

3.5. Изоферментный анализ ферментов антиоксидантной системы

Был исследован изоферментный состав ферментов КАТ, СОД и АПО в проростках высокоурожайных сортов – Гарагылчыг-2 (твердой пшеницы) и Дагдаш (мягкой пшеницы) при воздействии оптимальных концентраций НЧ (рисунки 17, 18 и 19).

Результаты проведенных исследований показали, что НЧ TiO_2 и ZnO значительно усиливали экспрессию КАТ и СОД, тогда как воздействие НЧ Fe_2O_3 оказывало менее выраженное действие. Однако на электрофореграммах фермента АПО под действием НЧ Fe_2O_3 спектр интенсивности был выражен сильнее. Это свидетельствует о регуляторной роли НЧ в активности антиоксидантных ферментов.

В ходе экспериментов было выявлено 5 изоформ АПО, 7 изоформ СОД и одна изоформа КАТ, интенсивность экспрессии которых варьировала в зависимости от типа НЧ.

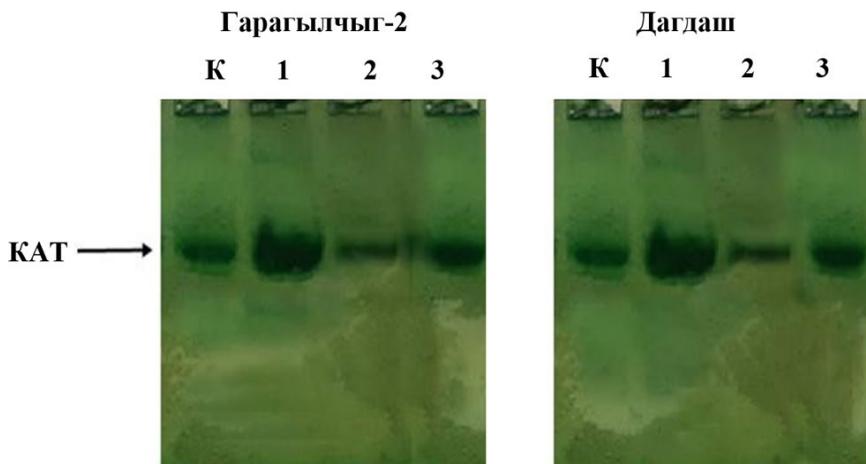


Рисунок 17. Влияние НЧ Fe_2O_3 , TiO_2 и ZnO на изоферментный состав КАТ в листьях генотипов пшеницы Гарагылчыг-2 и Дагдаш: К-контроль, 1-образцы, обработанные НЧ TiO_2 , 2-образцы, обработанные НЧ Fe_2O_3 , 3-образцы, обработанные НЧ ZnO

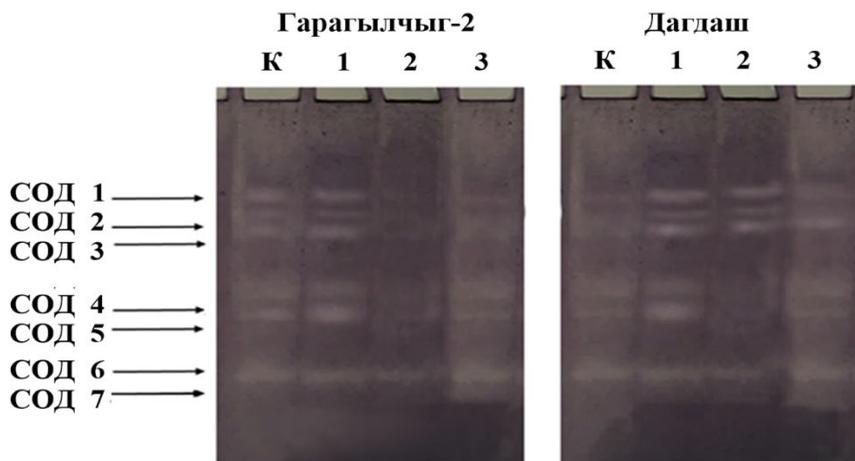


Рисунок 18. Влияние НЧ Fe_2O_3 , TiO_2 и ZnO на изоферментный состав СОД в листьях генотипов пшеницы **Гараğылçыг-2** и **Даğдаш**: К-контроль, 1-образцы, обработанные НЧ TiO_2 , 2-образцы, обработанные НЧ Fe_2O_3 , 3-образцы, обработанные НЧ ZnO

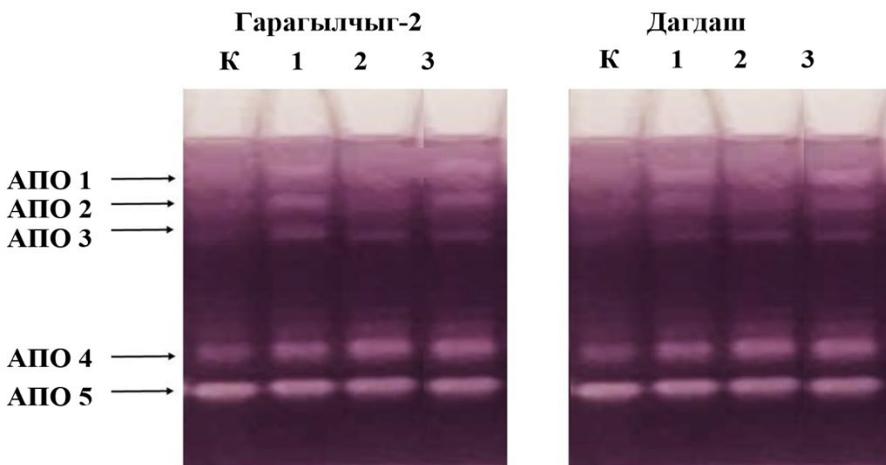


Рисунок 19. Влияние НЧ Fe_2O_3 , TiO_2 и ZnO на изоферментный состав АПО в листьях генотипов пшеницы **Гараğылçыг-2** и **Даğдаш**: К-контроль, 1-образцы, обработанные НЧ TiO_2 , 2-образцы, обработанные НЧ Fe_2O_3 , 3-образцы, обработанные НЧ ZnO

ГЛАВА IV. ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ НА МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И УРОЖАЙНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ГЕНОТИПОВ ПШЕНИЦЫ

Тенденция прогрессивного совершенствования применения НЧ различных металлов и их оксидов практически во всех отраслях сельского хозяйства требует глубокого изучения их биологической безопасности. Очевидно, что некоторые металлы и их оксиды могут иметь токсические и прооксидантные свойства¹².

Однако сравнительные данные о биоактивности НЧ Fe_2O_3 , TiO_2 , ZnO и Al_2O_3 при воздействии на морфофизиологические особенности, урожайность и содержание фотосинтетических пигментов в двухнедельных проростках исследуемых сортов пшеницы отсутствуют.

Впервые нами был проведен комплексный анализ, направленный на исследование воздействия указанных выше НЧ на генотипы пшеницы.

Новейшие работы по применению НЧ оксидов металлов при разведении сельскохозяйственных культур доказывают их динамичное воздействие на рост и развитие семян растений. Работа фотосинтетического аппарата во многом зависит от действия применяемых НЧ и активности антиоксидантных ферментов. Поэтому изучение влияния НЧ оксидов металлов на структуру урожая и работу ФСА представляет большой теоретический и практический интерес¹³.

Как известно, прорастание семян в обычных условиях требует долгого времени, но при обработке их НЧ можно добиться отличных результатов всхожести, что позволяет

¹²Короткова, А.М. Морфофизиологические изменения у пшеницы (*Triticum vulgare* L.) под влиянием наночастиц металлов (Fe, Cu, Ni) и их оксидов (Fe_3O_4 , CuO, NiO) / А.М.Короткова, С.В.Лебедев, Ф.Г.Каюмов [и др.] // Сельскохозяйственная биология, – 2017, т. 52, №1, – с. 172-182.

¹³Chen, YE. Comparison of photosynthetic characteristics and antioxidant systems in different wheat strains / Y. Su, CM. Zhang [et al.] // J. Plant Growth Regul. – 2018, vol. 37. – p. 347–359.

использовать их в качестве эффективного средства для улучшения всхожести семян пшеницы.

Учитывая оптимальность концентрации 0,01 мМ НЧ при воздействии на активность АПО, СОД, КАТ, ПФО в проведенных нами исследованиях, было изучено влияние именно этой концентрации НЧ Fe_2O_3 , ZnO , TiO_2 и Al_2O_3 на содержание фотосинтетических пигментов и структуру урожая в проростках различных сортов пшеницы в условиях нормального полива. Анализ полученных данных показал, что за исключением НЧ Al_2O_3 все остальные НЧ оказывали положительное воздействие на отмеченные показатели в исследуемых сортах пшеницы.

В ходе анализа полученных данных было обнаружено, что при воздействии НЧ Fe_2O_3 все показатели достигали максимального уровня, что позволяет выделить эти НЧ для широкомасштабного использования в сельском хозяйстве.

Итак, предпосевная обработка семян НЧ вызывала не только неоднозначные изменения морфофизиологических параметров, но и выявляла различную чувствительность этих сортов к данным НЧ.

Учитывая минимальное ингибирующее воздействие 0,01 мМ концентрации НЧ оксидов металлов на ферментативную активность и содержание фотосинтетических пигментов, данная концентрация была признана наиболее безопасной и эффективной для применения в дальнейших исследованиях.

ГЛАВА V. МНОГОМЕРНЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ АНАЛИЗЫ МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ И БИОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ГЕНОТИПОВ ПШЕНИЦЫ

Одной из ключевых задач сельского хозяйства является решение проблемы нехватки продовольствия. Поэтому

повышение урожайности зерновых культур считается одним из приоритетов современной науки¹⁴.

В целях оценки характера воздействия активности антиоксидантных ферментов на урожайность различных сортов пшеницы было необходимо проведение корреляционного анализа, устанавливающего взаимосвязь между содержанием фотосинтетических пигментов, биохимическими показателями АОС и элементами урожайности исследуемых культур. Корреляция данных параметров содействовала определению возможных механизмов, обеспечивающих наилучший прирост растений и повышающих их резистентность к стрессовым условиям окружающей среды.

5.1. Корреляционный анализ между элементами урожайности в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Во всех исследуемых сортах пшеницы отмечалась статистически значимая положительная корреляционная зависимость с 1% вероятностью между элементами урожайности, лишь в проростках мягких сортов пшеницы между массой зерна в колосе и урожайностью (г/м^2) отмечалась отрицательная статистически недостоверная корреляция ($r=-0,100$), в то время как у твердых сортов корреляция, обнаруженная между соответствующими факторами, была достоверной с 5% вероятностью ($r=0,306^*$).

Итак, для достижения максимальной продуктивности культур необходимо поддержание основных показателей урожайности на оптимальном уровне.

¹⁴Chaudhry, N. Bioinspired nanomaterials in agriculture and food industry: current state, predicted applications and problems / N.Chaudhry, S.Dwivedi, V.Chaudhry [et al.] // Microbe. Pathog., – 2018, vol. 123, – p. 196-200.

5.2. Корреляционные связи между содержанием фотосинтетических пигментов и активностью антиоксидантных ферментов в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Представленный анализ является важным для изучения механизмов резистентности растений к различным факторам стресса. Такая взаимозависимость способна отразить как их физиологическое состояние, так и адаптивный потенциал.

Согласно полученным данным, в твердых сортах пшеницы наблюдалась положительная линейная корреляция между содержанием фотосинтетических пигментов и активностью ПФО, тогда как между содержанием фотосинтетических пигментов и активностями ферментов СОД и КАТ – отрицательная корреляция (таблица 1), что, возможно, указывает на защитную реакцию проростков при изменении содержания пигментов. Что касается мягких сортов пшеницы, сильная положительная связь между пигментами все еще сохранялась, однако антиоксидантные ферменты демонстрировали либо значимую слабую, либо полностью отсутствующую корреляцию с пигментами, что указывает на различия в механизмах их взаимодействия (таблица 2).

В проведенных расчетах было установлено, что содержание фотосинтетических пигментов положительно коррелировало с показателями урожайности ($r=0,379^{**}$, $r=0,351^{**}$, $r=0,407^{**}$ и $r=0,523^{**}$, $r=0,492^{**}$, $r=0,411^{**}$ соответственно).

Во всех исследуемых сортах пшеницы каротиноиды демонстрировали сильную положительную линейную корреляцию с элементами урожайности, что подчеркивает их важную роль в защите фотосинтетического аппарата и повышении продуктивности злаковых культур. Соотношение хлорофиллов оказывало положительное действие, особенно на урожайность, что доказывает наличие иной метаболической динамики пигментов в мягких сортах ($r=0,462^{**}$). Между соотношением хлорофиллов и массой зерна в проростках твердых сортов наблюдалась отрицательная зависимость ($r=-$

0,470**), что, вероятно, связано с адаптацией фотосистем к условиям освещенности.

Таблица 1
Корреляционные связи между содержанием фотосинтетических пигментов и активностью антиоксидантных ферментов в ростках твердых сортов пшеницы (*Triticum durum* Desf.)

	Хл. а	Хл. в	Хл. а+в	Хл. а/в	Кар.	АПО	ПФО	КАТ	СОД
Хл. а	1	0,970**	0,997**	-0,513**	0,975**	0,027	0,375**	-0,283*	-0,348**
Хл. в		1	0,986**	-0,666**	0,975**	-0,068	0,426**	-0,228	-0,298*
Хл. а+в			1	-0,553**	0,983**	0,006	0,387**	-0,274*	-0,340**
Хл. а/в				1	-0,564**	0,492**	-0,558**	-0,177	-0,104
Кар.					1	-0,040	0,399**	-0,253*	-0,320**

Примечание: ** - высокая степень статистической значимости, $p \leq 0,01$; * - статистически значимые, $p \leq 0,05$ (согласно коэффициенту корреляции Пирсона)

Таблица 2
Корреляционные связи между содержанием фотосинтетических пигментов и активностью антиоксидантных ферментов в ростках мягких сортов пшеницы (*Triticum aestivum* L.)

	Хл. а	Хл. в	Хл. а+в	Хл. а/в	Кар.	АПО	ПФО	КАТ	СОД
Хл. а	1	0,993**	0,999**	0,463**	0,937**	0,144	0,366**	-0,212	-0,201
Хл. в		1	0,996**	0,378**	0,936**	0,112	0,403**	-0,186	-0,184
Хл. а+в			1	0,443**	0,937**	0,141	0,370**	-0,210	-0,201
Хл. а/в				1	0,459**	0,215	-0,027	-0,252*	-0,220
Кар.					1	0,047	0,387**	-0,190	-0,185

Примечание: ** - высокая степень статистической значимости, $p \leq 0,01$; * - статистически значимые, $p \leq 0,05$ (согласно коэффициенту корреляции Пирсона)

5.3. Корреляционные связи между содержанием фотосинтетических пигментов и показателями урожайности в ростках *Triticum durum* Desf. и *Triticum aestivum* L.

Наряду с корреляционным анализом проводился кластерный анализ по элементам урожайности образцов различных генотипов пшеницы, обработанных НЧ, и была построена дендрограмма (рисунок 20).

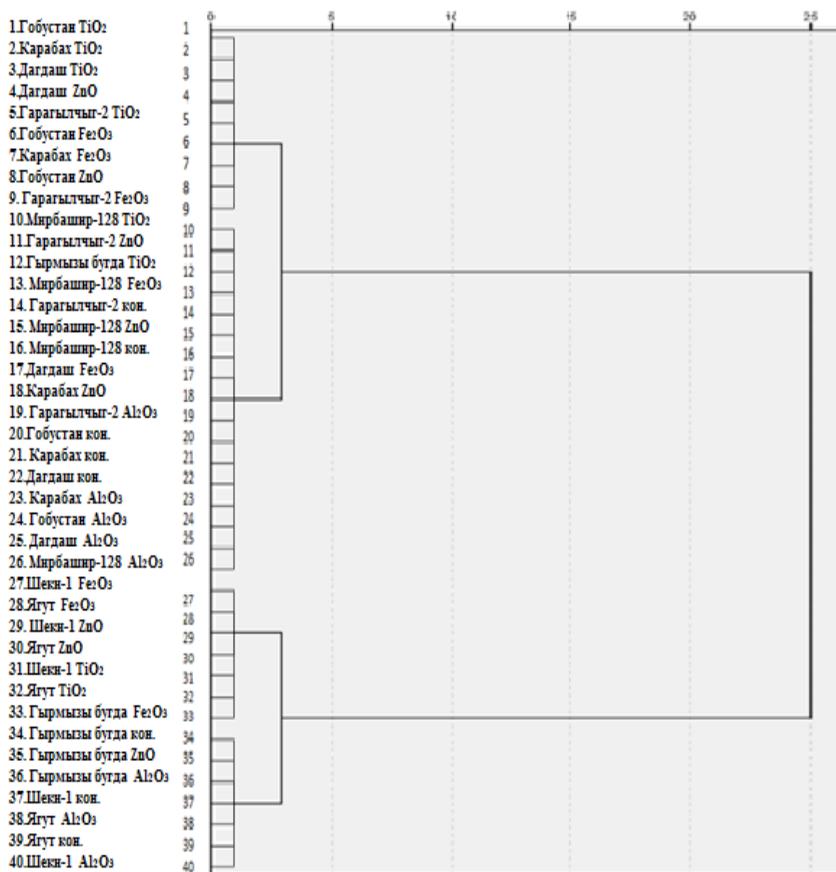


Рисунок 20. Кластерный анализ генотипов пшеницы согласно показателям урожайности

Согласно дендрограмме, построенной на основе показателей индекса генетического расстояния Эвклида, в I кластере сгруппированы высокопродуктивные генотипы (Гобустан, Карабах, Дагдаш и Гарагылчыг-2), обработанные 0,01 мМ концентрацией НЧ TiO_2 , ZnO и Fe_2O_3 , что эффективно отличало их от других генотипов. Во II кластере объединены среднеурожайные, в III кластере – низкоурожайные, а в IV кластере – представлены генотипы Гырмызы бугда, Шеки-1 и Ягут, демонстрирующие самые низкоурожайные показатели по сравнению с другими группами. Таким образом, применяемая кластеризация была эффективна в группировании исследуемых генотипов твердой и мягкой пшеницы по показателям урожайности.

Результаты проведенных анализов позволяют глубже понять взаимосвязь между биохимическим статусом растений и их урожайностью, что может послужить основой для разработки более эффективных методов повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к стрессам.

ВЫВОДЫ

1. Действие наночастиц Fe_2O_3 , Al_2O_3 , ZnO и TiO_2 на активность антиоксидантных ферментов, содержание фотосинтетических пигментов и показатели урожайности обусловлено как концентрацией НЧ, так и генетическими особенностями, а также адаптивными реакциями культур на метаболические изменения [9, 13, 14].
2. Оптимальной концентрацией НЧ оксида железа (III) при влиянии на биохимические показатели ростков исследуемых твердых и мягких генотипов пшеницы стало 0,1 мМ [3, 7].
3. Применение НЧ Fe_2O_3 в концентрации 0,01 мМ способствовало увеличению содержания фотосинтетических пигментов на 5-19% и повышению урожайности в среднем на 2-13% по сравнению с контролем, максимальное содержание фотосинтетических пигментов было характерно для генотипов Гарагылчыг-2 и Дагдаш [5, 8].
4. Оптимальной концентрацией НЧ ZnO при действии на активность АПО, ПФО, КАТ и СОД в двухнедельных ростках твердых и мягких генотипов пшеницы (за исключением сортов Мирбашир-128 и Шеки-1) стала 0,01 мМ. 10-кратное повышение концентрации данных НЧ также имело положительный эффект воздействия на активность ферментов в исследуемых ростках, но с менее выраженным стимулирующим характером [10].
5. В условиях нормального полива, НЧ ZnO при концентрации 0,01 мМ увеличивали содержание пигментов (хлорофиллов, каротиноидов) на 4-13%, а урожайность повышалась на 2-16% по сравнению с контролем [8, 15].
6. НЧ TiO_2 при концентрации 0,01 мМ оказывали стимулирующее действие на активность антиоксидантных ферментов, способствуя одновременно увеличению содержания фотосинтетических пигментов на 9-13% и повышению урожайности на 5-16% по сравнению с контролем. Особенно выраженный эффект наблюдался у проростков генотипа Гырмызы бугда, где урожайность превышала контроль на 83% [9, 16].

7. Анализ изоферментного состава антиоксидантных ферментов в ростках различных генотипов твердой и мягкой пшеницы выявил на электрофореграммах 5 цитоплазматических изоформ АПО, 7 изоформ СОД и 1 изоформу КАТ. Установлено, что НЧ ZnO и TiO₂ значительно усиливали экспрессию ферментов КАТ и СОД, тогда как НЧ Fe₂O₃, оказывали менее выраженное действие на эти ферменты, но при этом способствовали увеличению спектральной интенсивности АПО [18].
8. В твердых и мягких генотипах пшеницы установлены статистически достоверные положительные корреляционные зависимости между урожайностью и содержанием фотосинтетических пигментов, а также между содержанием фотосинтетических пигментов и активностью ПФО [17].

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. НЧ Fe₂O₃, ZnO и TiO₂ могут быть использованы для предпосевной обработки семян различных сортов пшеницы и как микроудобрения при выращивании растений. При этом важным условием является установление их оптимальной дозы для исследуемых объектов.
2. НЧ Al₂O₃ при всех исследуемых концентрациях оказывали ингибирующее действие на активность антиоксидантных ферментов, содержание фотосинтетических пигментов и урожайность различных сортов пшеницы, поэтому применение их в сельском хозяйстве нерационально.

Список научных трудов, опубликованных по материалам диссертации

1. Мамедли, Г.Г. Влияние наночастиц оксида трехвалентного железа на активность полифенолоксидазы в проростках пшеницы / С.Н.Омарова, А.А.Гулиев, И.В.Азизов // Журнал Наук о жизни и биомедицины, – Баку: – 2019, т. 74 №2, – с. 63-68.
2. Mammadli, G.H. The activity of ascorbate peroxidase in seedlings of durum and soft wheat varieties under the influence of trivalent ferric oxides nanoparticles // International Journal of Scientific & Engineering Research, – 2020, vol. 11, №8, – p. 369-374.
3. Mammadli, G.H. Influence of ferric oxide nanoparticles on the activity of ascorbate peroxidase in wheat seedlings // The Scientific and Pedagogical News of Odlar Yurdu University, – 2020, №58, – p. 35-43.
4. Мамедли, Г.Г. Активность аскорбатпероксидазы в проростках твердых и мягких сортов пшеницы под влиянием наночастиц оксида трехвалентного железа // – Воронеж: Вестник ВГУ. Сер.: Химия. Биология. Фармация, – 2021, №1, – с. 48-54.
5. Ismayilova, G.H. Influence of iron oxide nanoparticles and complexes of biogenic metals with organic acids on physiological and biochemical characteristics of wheat seedlings / G.H.Ismayilova, Gahramanova Sh.I., Azizov I.V. [et al.] // Azerbaijan Chemical Journal, – 2022, №4, – p. 53-59.
6. Ismailova, G.H., Azizov, I.V. Effect of Fe_2O_3 and Al_2O_3 nanoparticles on the antioxidant enzymes in seedlings of *Triticum aestivum* L. // SABRAO Journal of Breeding and Genetics, – 2022, 54 (3), – p. 671-677.
7. Ismayilova, G.H. Effect of ferric iron oxide nanoparticles on ascorbate peroxidase activity in durum and bread wheat seedlings // Advanced Studies in Biology, – 2023, vol. 15, №1, – p. 47-54.
8. Ismayilova, G.H., Azizov, I.V. Influence of Ti, Zn and Fe oxide nanoparticles on seed germination capability, photosynthetic pigment content and activity of photosystem II *Triticum aestivum* L. // Advanced Studies in Biology, – 2023, vol.15, №1, – p.157-162.

9. Ismayilova, G.H., Azizov I.V. Effect of metal oxide nanoparticles on the activity of antioxidant enzymes and productivity of wheat genotypes // *Advanced Studies in Biology*, – 2024, vol. 16, №1, – p. 97-108.
10. Ismayilova, G.H., Azizov, I.V. The activity of catalase and superoxide dismutase under the influence of Fe and Zn oxide nanoparticles in wheat sprouts // *Bulitin of Science and Practice (Бюллетень науки и практики)*, – 2025, т. 11, №2, – с. 59-66.
11. Мамедли, Г.Г. Активность гваякол-зависимой пероксидазы в твердых сортах пшеницы под влиянием наночастиц оксида трехвалентного железа // XXIII Республиканская научная конференция докторантов и молодых исследователей при Министерстве Образования Азербайджанской Республики, – Баку: – 3 – 4 декабря, – 2019, – с. 97-99.
12. Джан Ахмед, Ф.С., Мамедли, Г.Г. Изучение активности полифенолоксидазы в различных генотипах проростков пшеницы // IX Международная научная конференция «Инновационные подходы в современной биологии», посвященная 100-летию Бакинского Государственного Университета, – Баку: – 24 – 25 мая, – 2019, – с. 57-58.
13. Исмаилова, Г.Г. Влияние различных концентраций наночастиц оксидов металлов на активность антиоксидантных ферментов в твердых и мягких сортах пшеницы // XIX Международная научно-практическая конференция: «Интеграционные процессы в современной науке: новые подходы и актуальные вопросы», – Анапа: – 26 марта, – 2024, – с. 4-7.
14. Исмаилова, Г.Г. Активность антиоксидантных ферментов ряда различных сортов пшеницы под действием наночастиц оксидов металлов // *Химия, физика, биология, математика: теоретические и прикладные исследования. Сборник статей по материалам LXXXI-LXXXIII международной научно-практической конференции*, – Москва: – 12 апреля, – 2024, №2-4 (63), – с. 18-21.
15. Ismailova, G. The effect of biogenic metal oxide nanoparticles on yield and content of photosynthetic pigments in different wheat

- varieties // Химия, физика, биология, математика: теоретические и прикладные исследования: сб. ст. по материалам LXXXI-LXXXIII - Международной научно-практической конференции, – Москва: – 2024, №2-4 (63), – с. 37-40.
16. Ismayilova, G.H. Influence of zinc and titanium dioxide nanoparticles on yield characteristics of several wheat varieties // “Azərbaycanda ətraf mühitin sağlamlaşdırılmasında Ümummilli Lider Heydər Əliyevin rolu” mövzusunda elmi-praktiki konfrans, – Bakı: – 23 – 24 may, – 2024, – s. 522.
17. Ismailova, G.H., Azizov, I.V. Correlation analysis between the content of photosynthetic pigments, yield and antioxidant enzyme activity in wheat varieties // LXXVII Международная научно-практическая конференция «Естественные науки и медицина: теория и практика, – Новосибирск: – 2024, №12 (54), – с. 96-10.
18. Ismailova, G.H Effect of different metal oxide nanoparticles on isoenzyme spectrum of antioxidant enzymes in wheat leaves // 2-nd International Conference on Plant Protection Sciences (ICPPS-2025), – Tandojam, Pakistan: – 9 – 10 April, – 2025, p. 103-105.



Защита диссертации состоится 27 мая 2025 года в 14⁰⁰ на заседании Диссертационного совета ФД 2.31, действующего на базе Бакинского Государственного Университета.

Адрес: г. Баку, ул. академика Захида Халилова, 33, AZ 1148.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Бакинского Государственного Университета.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Бакинского Государственного Университета (www.bsu.edu.az).

Автореферат разослан по соответствующим адресам 20 мая 2025 года.

Подписано в печать: 14.05.2025
Формат бумаги: 60×90 1/16
Объем: 39689
Тираж: 70