

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ДУПЛИЙ НАДЕЖДА ГЕННАДЬЕВНА

**ДЕЙСТВИЕ ПРОИЗВОДНЫХ ПЛАСТОХИНОНА КЛАССА SkQ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ К ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ
ФАКТОРАМ СРЕДЫ**

1.5.15. Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Ростов-на-Дону – 2026

Работа выполнена на кафедре экологии и природопользования
Академии биологии и медицины имени Д. И. Ивановского
Южного федерального университета

Научный руководитель: **Усатов Александр Вячеславович,**
доктор биологических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет», Академия
биологии и медицины им. Д. И. Ивановского,
кафедра генетики, профессор.

Официальные оппоненты: **Демури Яков Николаевич,**
доктор биологических наук, профессор,
ФГБНУ «Федеральный научный центр
«Всероссийский научно-исследовательский
институт масличных культур им. В.С. Пустовойта»,
лаборатория генетики, главный научный сотрудник;

Полиенко Елена Александровна,
кандидат биологических наук,
ФГБНУ «Федеральный Ростовский аграрный
научный центр», лаборатория защиты растений,
заведующая.

Защита диссертации состоится **30 июня 2026 г. в 15:30** на заседании диссертационного совета ЮФУ 801.01.14 по биологическим наукам на базе Академии биологии и медицины им. Д. И. Ивановского Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю. А. Жданова Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 21ж, и на сайте Южного федерального университета <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1348604/>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзыв на автореферат в двух экз. (с указанием даты, полностью ФИО, ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 804, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ 801.01.14 Тимошенко А. Н., а также в формате *.pdf* на e-mail: atimoshenko@sfedu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимошенко Алёна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Исследование механизмов действия экстремальных факторов среды на растительные организмы представляет интерес, как для фундаментальной, так и прикладной науки, особенно в области современных агротехнологий. Универсальным ответом на воздействие абиотических факторов различной природы является повышение в клетках синтеза активных форм кислорода (АФК) (Sachdev et al., 2021). Регуляция уровня АФК посредством антиоксидантов может стать эффективным способом снижения негативных воздействий стрессовых факторов на растения (Blokina, et al., 2003; Flieger et al., 2021). Исходя из этого поиск и апробация новых препаратов на основе антиоксидантов — перспективная и востребованная задача, поскольку их применение позволяет значительно повышать урожайность сельскохозяйственных культур (Rady et al., 2023). Внедрение таких препаратов особенно актуально для регионов с высокой вероятностью затопления территорий, загрязнения почв различными поллютантами, либо районов, испытывающих дефицит почвенной влаги, таких как юг России. (Колесников и др., 2013; Gudko V. et al., 2021).

Научным коллективом академика В. П. Скулачева создан ряд веществ, относящихся к классу митохондриально-направленных антиоксидантов. Наиболее выраженный эффект продемонстрировала группа веществ, получившая название SkQ (Скулачев, 2007; Skulachev, 2012). Основой их структуры служит пластохиноновый фрагмент, который способен восстанавливаться в дыхательной цепи митохондрий. Благодаря этому соединения SkQ проявляют долгосрочную антиоксидантную активность (Antonenko et al., 2008). и эффективны даже при крайне низких концентрациях (Samuilov et al., 2019; Goleva et al., 2020). Однако подавляющее количество исследований SkQ было проведено на животных и микроорганизмах (Murphy, 2009; Skulachev et al., 2009; Dvoretzkaya, 2021). На растениях подобные эксперименты приведены только в единичных публикациях.

Цель работы – исследовать действие производных пластохинона SkQ1 (10-(6'-пластохинонил) децилтриметилфосфония) и SkQ3 (10-(6'-метилпластохинонил) децилтрифенилфосфония) на устойчивость растений к экстремальным факторам окружающей среды.

Для достижения указанной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1). Исследовать действие SkQ1 и SkQ3 на скорость роста пшеницы, ячменя, подсолнечника и кукурузы в лабораторных и оранжерейных экспериментах в норме и при недостатке почвенной влаги.
- 2). Определить по результатам полевых испытаний влияние SkQ3 на урожайность сельскохозяйственных культур (пшеницы, ячменя, подсолнечника).
- 3). Проанализировать влияние SkQ1 и SkQ3 на рост и развитие проростков ячменя в присутствии частиц оксида цинка в микро- и нано- форме.

4). Изучить действие SkQ1 и SkQ3 на динамику транскрипционной активности генов антиоксидантной системы проростков ячменя в норме, в условиях недостатка почвенной влаги, а также в присутствии частиц оксида цинка в микро- и нано- форме.

5). Исследовать влияние SkQ1 на всхожесть семян, скорость роста, содержание АФК и уровень экспрессии генов антиоксидантной системы проростков риса в норме и в условиях гипоксии.

Положения, выносимые на защиту:

1. В засушливых условиях вегетации предпосевная обработка семян сельскохозяйственных культур водными растворами производных пластохинона (SkQ1 и SkQ3) увеличивает урожайность пшеницы, ячменя, подсолнечника и кукурузы на 10–20 %.

2. В присутствии частиц оксида цинка SkQ1 и SkQ3 повышают скорость роста проростков ячменя и снижают транскрипционную активность генов антиоксидантной системы в корнях растений.

3. При прорастании семян риса из-под слоя воды в условиях гипоксии (3 % содержания кислорода от его уровня при нормоксии), SkQ1 повышает всхожесть и скорость прорастания семян, а также снижает уровень АФК и транскрипционную активность генов антиоксидантной системы проростков.

Научная новизна.

Впервые проведена оценка засухоустойчивости растений после однократной обработки семян митохондриально-направленными антиоксидантами SkQ1 и SkQ3 в лабораторных, оранжерейных и полевых опытах. Проанализированы показатели морфометрии и урожайности пшеницы, ячменя, подсолнечника и кукурузы.

Исследовано действие SkQ1 на всхожесть семян, скорость роста и транскрипционную активность генов антиоксидантной системы проростков риса как в норме, так и при недостатке кислорода. Впервые изучена динамика экспрессии генов окислительного стресса проростков ячменя при обработке семян SkQ1 и SkQ3 в условиях дефицита влаги, а также в присутствии частиц оксида цинка различной дисперсности и концентрации.

Теоретическая и практическая значимость.

Полученные результаты расширяют современные представления о влиянии антиоксидантов на устойчивость растительных организмов к таким абиотическим факторам, как засуха, тяжелые металлы и гипоксия.

Результаты исследования, доказывающие, что предпосевная обработка семян сельскохозяйственных культур митохондриально-направленными антиоксидантами класса SkQ повышает устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды, могут стать основой новых биотехнологических решений, направленных на создание препаратов, способных повышать стрессоустойчивость растений и, как следствие, их урожайность.

Апробация результатов.

Материалы исследования были представлены на Международной научно-практической конференции, посвященной 130-й годовщине со дня рождения

академика Н. И. Вавилова «Вавиловские чтения; 2017» (Саратов 2017); всероссийской научной конференции «Проблемы социально-экономической географии и природопользования» (Ростов-на-Дону, 2017); научной конференции и школы молодых учёных «Экспериментальная биология растений: фундаментальные и прикладные аспекты» (г. Судак, 2017); Международном молодежном научном форуме «Ломоносов-2019» (г. Москва, 2019); VIII научно-практической конференции с международным участием «Генетика; фундаментальная основа инноваций в медицине и селекции» (г. Ростов-на-Дону, 2019); Международной конференции «Биологическое разнообразие и биоресурсы степной зоны в условиях изменяющегося климата» (г. Ростов-на-Дону, 2022), международном форуме «Степная Евразия – устойчивое развитие» (г. Ростов-на-Дону, 2022); международной молодежной научной школе «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки» (г. Ростов-на-Дону, 2022), международной научной конференции «Генетика и биотехнология XXI века: проблемы, достижения, перспективы» (г. Минск, Республика Беларусь, 2022); III международной молодежной научной школе «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки» (г. Геленджик, 2024).

Личный вклад автора. Все этапы лабораторных, оранжерейных и полевых исследований, а также обработка и анализ данных выполнены лично автором в период с 2016 по 2025 год. Работа выполнена на кафедре экологии и природопользования Академии биологии и медицины им. Д. И. Ивановского ЮФУ.

Публикации. По итогам исследований было опубликовано 17 научных работ, включая 2 статьи в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и Web of Science, 4 статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, выводов, списка литературы, приложения. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 28 таблиц, 37 рисунков, 1 приложение. Список литературы включает 217 источников, из них 192 на иностранном языке.

Конкурсная поддержка работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям) в рамках проекта №27000, а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2026-0019.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д. б. н., профессору А.В. Усатову за помощь и советы. Также автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории молекулярной генетики и кафедры экологии и природопользования ЮФУ за помощь на разных этапах исследования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В трех подглавах работы представлен обзор отечественной и зарубежной литературы по теме исследования. Описаны абиотические стрессовые факторы, влияющие на рост и развитие растений, раскрыты механизмы антиоксидантной защиты растений при окислительном стрессе, а также описано строение и свойства антиоксидантов класса SkQ и показано их действие на организмы.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служили растения озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.), риса посевного (*Oryza sativa* L.), подсолнечника (*Helianthus annuus* L.) и кукурузы (*Zea mays* L.)

В лабораторных и оранжерейных экспериментах моделировали засуху путем внесения в почву ПЭГ 6000 (Круглова, 2012) или фиксированным поливом почвы в вегетационных сосудах до достижения заданной влажности (ГОСТ 28268-89).

Полевые испытания на зерновых культурах проводили в 2017-2018 гг. в Армавирском районе республики Армения на Эчмиадзинской экспериментальной базе научного центра земледелия и в Зерноградском районе Ростовской области РФ на базе ФГБНУ «АНЦ «Донской», а также в хозяйствах ОАО «Колос», ООО «Аргмак», ООО «Буденновское», ООО «Новошербиновская» Ростовской области и Краснодарского края. Полевые опыты на подсолнечнике проводили на базе предприятия ООО «Степное» в Верхнедонском районе Ростовской области в 2017-2018 гг.

Для исследования влияния оксида цинка на скорость роста и транскрипционную активность проростков ячменя в водный раствор вносили частицы оксида цинка в микро- и наноформе в концентрациях 300 мг/л и 2000 мг/л (Azarin et al., 2022).

Антирадикальную активность и перекисную резистентность у проростков риса исследовали с помощью H₂O₂-индуцированного люминол-зависимого хемилюминесцентного анализа (ХЛ) на приборе Auto Lumat Plus LB 953 (Berhold Technologies, Германия).

Все варианты лабораторных экспериментов проводили в трех независимых повторностях. Полученные результаты статистически обрабатывали с помощью программы Statistica 10. Достоверность различий данных оценивали с использованием t-критерия Стьюдента, $p < 0,05$.

РНК из растений выделяли по методу Хомчинского (Chomczynski, 1987) с помощью коммерческого набора ExtractRNA (Евроген, Россия). Полученную РНК обрабатывали ДНКазой из набора DNase I, Rnase-free (Thermo Fisher Scientific, США). Реакцию обратной транскрипции осуществляли с использованием набора MMLVRTkit (Евроген, Россия). Полученную в результате проведения обратной транскрипции кДНК использовали в качестве матрицы для ПЦР в реальном времени с красителем SYBR Green I (Евроген, Россия).

Экспрессию генов антиоксидантной системы: *HvSodA1*, *HvSodB*, *HvGR*, *HvGST1*, *HvGST6*, *HvCat1*, *HvCat2*, *HvApx* проростков ячменя (Aslam et al., 2015; Laxa et al., 2019; Azarin et al., 2024) анализировали при индукции стресса водным дефицитом и частицами оксида цинка в микро- и наноформе, а генов: *OsAPX1*, *OsAPX2*, *OsCATA*, *OsCATB*, *OsCATC*, *OsSODA*, *OsSODB* (Moursi et al., 2021; Duplii et al., 2025) у проростков риса в условиях гипоксии.

Уровень транскрипции генов определяли методом $2^{-\Delta\Delta Ct}$. В качестве референсных генов использовали *actin* и *b-tubulin* (Sulistyaningsih et al., 2024; Azarin et al., 2024). Результаты ПЦР анализов статистически обрабатывали с помощью программы R-Studio. Тепловая карта построена с помощью программы Heatmaper. Статистическую значимость результатов оценивали непараметрическим U - критерием Манна-Уитни.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Влияние производных пластохинона (SkQ1 и SkQ3) на устойчивость растений к почвенной засухе

Для определения эффективности действия митохондриально-направленных антиоксидантов SkQ1 и SkQ3 на рост и развитие растений в условиях водного дефицита, был проведен сравнительный анализ действия этих соединений на скорость роста озимой пшеницы и ярового ячменя в различных режимах почвенного увлажнения. Результаты эксперимента суммированы в таблице 1.

Таблица 1. - Влияние SkQ1 и SkQ3 на сухую массу побегов и корней 14-дневных проростков пшеницы сорта «Калым» и ячменя сорта «Сокол» при различных режимах почвенного увлажнения

Вариант опыта	Пшеница сорта «Калым»		Ячмень сорта «Сокол»	
	сухая масса побега, мг	сухая масса корня, мг	сухая масса побега, мг	сухая масса корня, мг
Влажность почвы 70 % (контроль)				
контроль	18,7±0,3	6,5±0,1	19,5±0,4	8,5±0,3
SkQ1	19,2±0,2	6,9±0,2	20,1±0,4	9,0±0,2
% от контроля	102,6 %	105,8 %	103,0 %	105,6 %
SkQ3	19,1±0,2	6,8±0,2	19,7±0,3	8,9±0,3
% от контроля	102,1 %	104,4 %	101,1 %	104,5 %

Влажность почвы 50 %				
контроль	16,1±0,2	5,2±0,1	17,7±0,3	7,8±0,3
SkQ1	17,9*±0,1	6,7*±0,1	18,2±0,2	8,2±0,3
% от контроля	110,1 %	122,4 %	102,8 %	104,9 %
SkQ3	17,5*±0,2	6,5*±0,1	17,9±0,3	8,3±0,2
% от контроля	108,0 %	120,0 %	101,2 %	106,1 %
Влажность почвы 40 %				
контроль	15,1±0,2	4,3±0,1	16,8±0,2	6,7±0,2
SkQ1	18,1*±0,2	5,7*±0,1	19,3*±0,2	7,8*±0,2
% от контроля	116,6 %	124,6 %	113,0 %	114,2 %
SkQ3	17,9*±0,1	5,9*±0,1	19,4*±0,2	8,3*±0,3
% от контроля	115,7 %	127,2 %	113,4 %	119,3 %
Влажность почвы 30 %				
контроль	10,5±0,2	4,5±0,1	11,2±0,2	3,1±0,2
SkQ1	13,8*±0,2	6,2*±0,1	14,9*±0,3	4,5*±0,2
% от контроля	124,0 %	127,5 %	124,9 %	131,2 %
SkQ3	14,3*±0,1	5,9*±0,1	15,6*±0,3	4,8*±0,2
% от контроля	126,6 %	123,8 %	128,3 %	135,5 %

*достоверные отличия по сравнению с контролем при $p < 0,05$

Как видно из таблицы 1 при понижении влажности почвы с 70 % до 30 % масса побегов и корней, как у пшеницы, так и у ячменя достоверно снижалась по сравнению с контрольными показателями. В условиях нормального увлажнения растворы SkQ1 и SkQ3 не оказали влияния на рост и развитие растений.

При 50 % влажности почвы у озимой пшеницы масса обработанных SkQ1 и SkQ3 побегов и корней увеличивается в среднем на 10 % и 20 %, соответственно по сравнению с аналогичными показателями необработанных растений. При снижении влажности почвы до 40 % масса побегов и корней растений, обработанных SkQ1 и SkQ3, возрастала в среднем на 15 % и 25 % по сравнению с растениями пшеницы, и на 15 % и 20 % у ячменя, выращенными в аналогичных условиях, соответственно. При дальнейшем снижении влажности почвы до 30 % влияние антиоксидантов проявляется более выражено. Так, масса побегов и корней растений, обработанных SkQ1 и SkQ3, возрастала в среднем на 25 % у пшеницы, и на 25 - 35 % у ячменя, относительно необработанных растений.

Таким образом, в условиях дефицита влаги у растений, обработанных растворами SkQ1 и SkQ3, повышается прирост биомассы по сравнению с необработанными.

Для определения механизмов действия SkQ1 и SkQ3 на устойчивость зерновых культур к засухе был проведен анализ транскрипционной активности генов *HvSodA1*, *HvSodB*, *HvGR*, *HvGST1*, *HvGST6*, *HvCat1*, *HvCat2*, *HvApx1* антиоксидантной системы проростков ячменя.

Относительный уровень транскрипции генов окислительного стресса в листьях и корнях растений ячменя при влажности почвы 30 % представлен на рисунках 1 и 2.

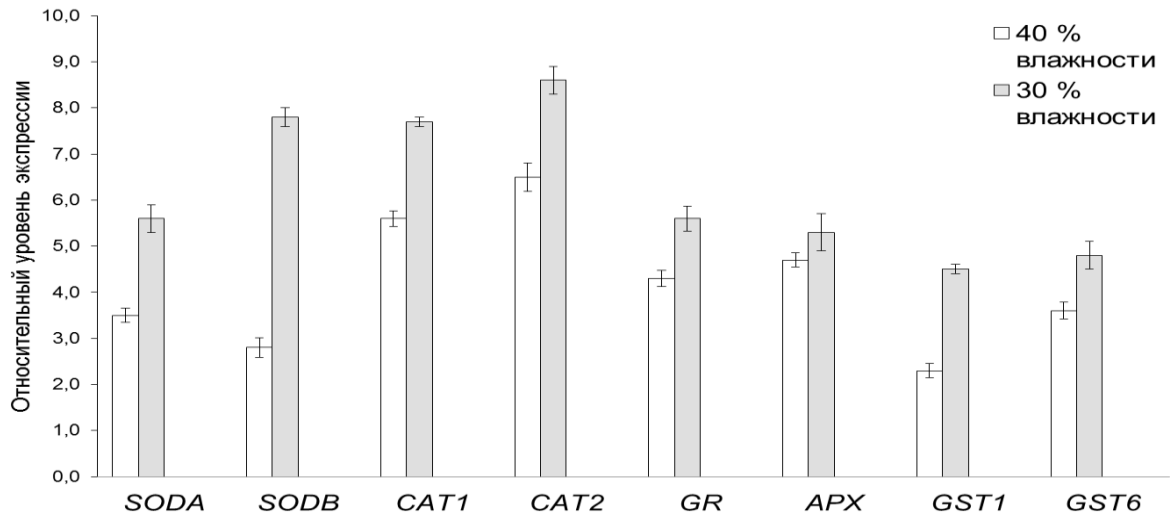


Рисунок 1 — Уровень транскрипции генов окислительного стресса, относительно контроля (70 % влажности почвы) в листьях 14-дневных проростков ячменя в условиях водного дефицита

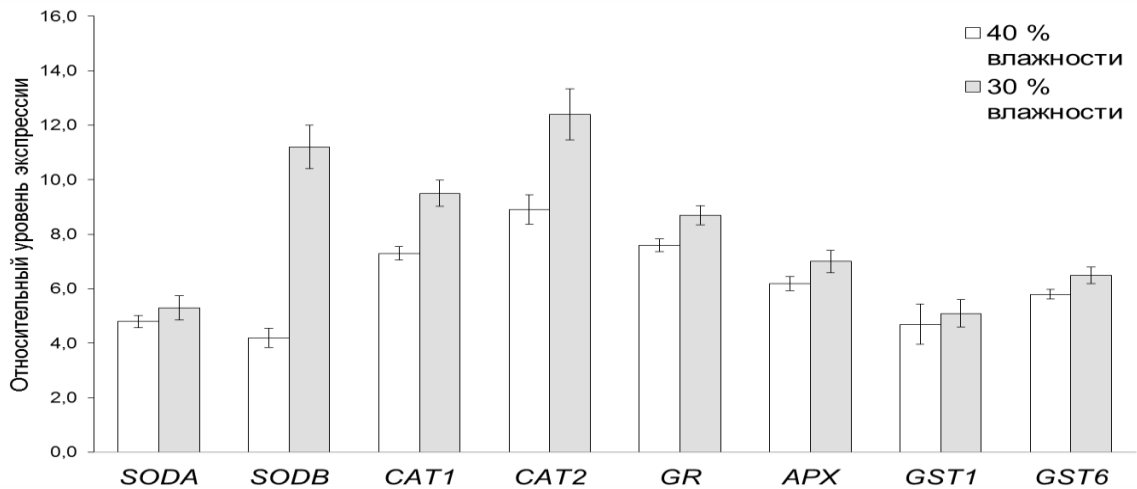


Рисунок 2 — Уровень транскрипции генов окислительного стресса, относительно контроля (70 % влажности почвы) в корнях 14-дневных проростков ячменя в условиях водного дефицита

Как видно на рисунках 1 и 2, при недостатке влаги экспрессия всех исследуемых генов повышается, как в листьях (в 2,3–8,6 раз), так и в корнях (в 4,2–12,4 раз), относительно контроля.

Изменение уровня экспрессии в листьях и корнях растений ячменя при влажности почвы 30 %, что соответствует сильной засухе представлены на рисунках 3 и 4.

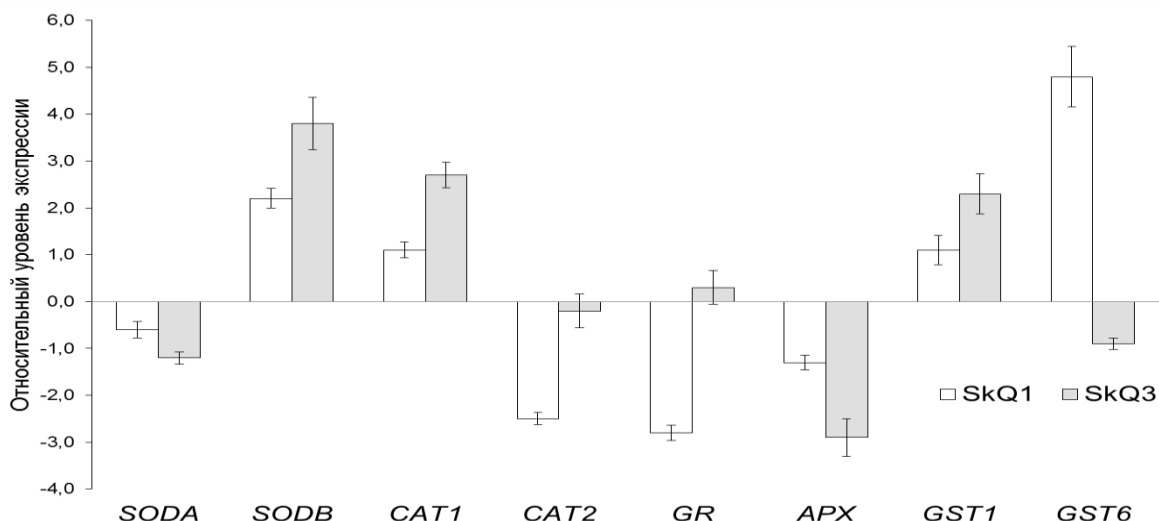


Рисунок 3 — Влияние SkQ1 и SkQ3 на уровень транскрипции генов окислительного стресса в листьях 14-дневных проростков ячменя при влажности почвы 30 %, относительно необработанных растений

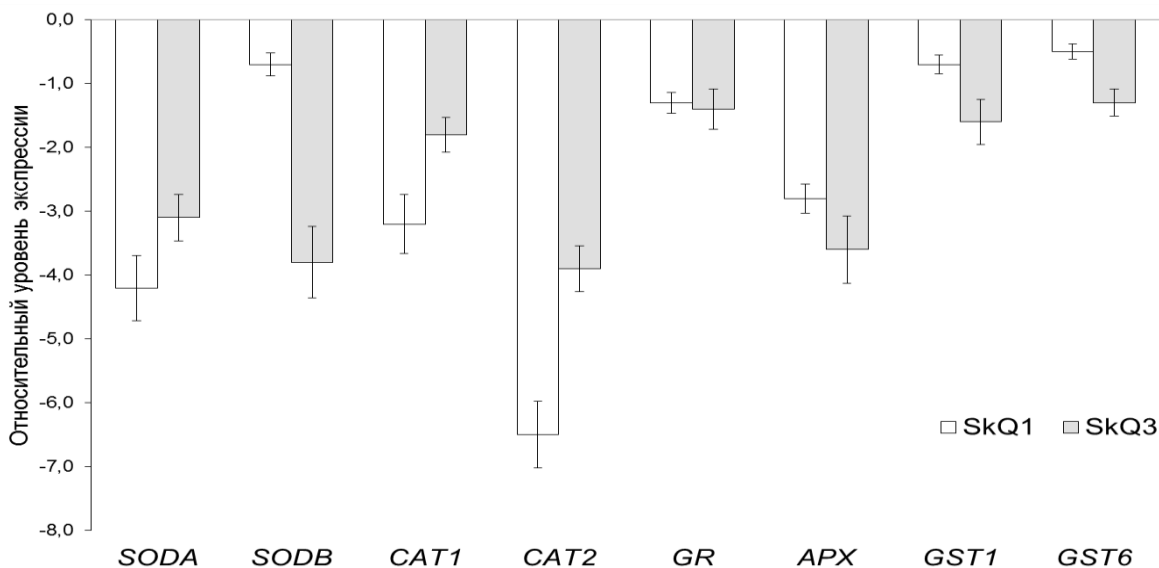


Рисунок 4 — Влияние SkQ1 и SkQ3 на уровень транскрипции генов окислительного стресса в корнях 14-дневных проростков ячменя при влажности почвы 30 %, относительно необработанных растений

Как видно на рисунках 3 и 4, в условиях экстремального дефицита почвенной влаги при обработке растворами SkQ1 и SkQ3 уровень экспрессии всех исследуемых 8-ми генов ячменя в корнях растений снижался. Однако в листьях уровень экспрессии генов *GST6*, *SODB*, *CAT1* и *GST1* повышался более, чем в 4 раза при обработке SkQ1 и SkQ3, а уровень экспрессии генов *SOD*, *CAT2*, *APX1* и *GR* также, как и в корнях снижался до 3 раз при обработке SkQ1.

Лабораторные опыты были подтверждены полевыми испытаниями, в ходе которых показано, что обработка семян SkQ3 привела к увеличению показателей продуктивности озимой пшеницы, ярового ячменя и подсолнечника.

Влияние предпосевной обработки семян раствором SkQ3 на урожайность озимой пшеницы суммировано в таблице 2.

Таблица 2. - Влияние SkQ3 на урожайность озимой пшеницы (2017–2018 гг.), т/га

Вариант опыта	Сорт Лидия		Сорт Лазурит	
	Урожайность	Прибавка	Урожайность	Прибавка
Контроль	8,86	-	8,30	-
SkQ3	9,04	0,18	8,55	0,25
Винцит-форте	9,14	0,28	8,66	0,36
SkQ3 + Винцит-форте	9,23	0,37	8,74	0,44
НСР _{0,05}	0,22	-	0,24	-

Обработка зерна SkQ3 позволила получить превышение урожайности озимой пшеницы по сравнению с контролем. Совместная обработка SkQ3 с протравителем семян «Винцит-Форте» увеличила урожайность до 9,23 т/га и 8,74 т/га при возделывании озимой пшеницы сорта «Лидия» и «Лазурит» соответственно.

Полевые испытания, проведенные в Армавирском районе республики Армения и Зерноградском районе Ростовской области также подтвердили результаты лабораторных экспериментов. Результаты предпосевной обработки SkQ3 на структурные элементы урожая ячменя суммированы в таблице 3.

Таблица 3. - Влияние SkQ3 на структурные элементы урожая ярового ячменя сорта «Щедрый»

Вариант	Длина колоса, см	Число колосков с одного колоса, шт.	Число зерен с одного колоса, шт.	Масса зерен с одного колоса, мг	Урожайность, ц/га
Зерноградский район (РФ) 2017					
контроль	6,3±0,4	20,7±1,3	19,1±2,6	67,1±2,6	47,1
SkQ3	6,8±0,6	23,8±2,0	20,4±3,1	70,5±1,7	49,0

Зерноградский район (РФ) 2018					
контроль	6,5±0,7	19,6±1,3	20,1±1,3	65,8±1,8	39,4
SkQ3	7,2±0,5	24,8*±1,1	26,2*±1,9	74,6*±2,0	46,8
Армавирский район (Армения) 2017					
контроль	6,1±0,2	19,1±1,1	19,6±2,1	65,3±1,3	41,1
SkQ3	7,4±0,3*	22,8±1,9	23,3±2,8	74,7±1,5*	50,8
Армавирский район (Армения) 2018					
контроль	7,04±0,28	21,5±1,53	21,21±1,68	67,2±1,4	39,0
SkQ3	8,59±0,61*	23,36±1,81*	23,58±1,95	75,3±1,6*	49,0

*достоверные отличия по сравнению с контролем при $p < 0,05$

Как видно из таблицы 3 обработка SkQ3 увеличила длину колоса, количества колосков и количества зерен в колосе, и, как следствие, повысила урожайность ячменя в исследуемых регионах. В Зерноградском районе результаты структуры урожая превысили контрольные на 4–13 % в 2017 году и на 10–21 % в 2018 году. В Армавирском районе как в 2017, так и в 2018 гг. эти показатели урожайности после обработки SkQ3 были выше по сравнению с контролем на 11–26 %.

Стоит отметить, что 2017-2018 гг., как в Зернограде, так и в Армавире отличался по температурным условиям и количеству осадков. Значения температуры воздуха и количество осадков, представлены на рисунках 5–8.

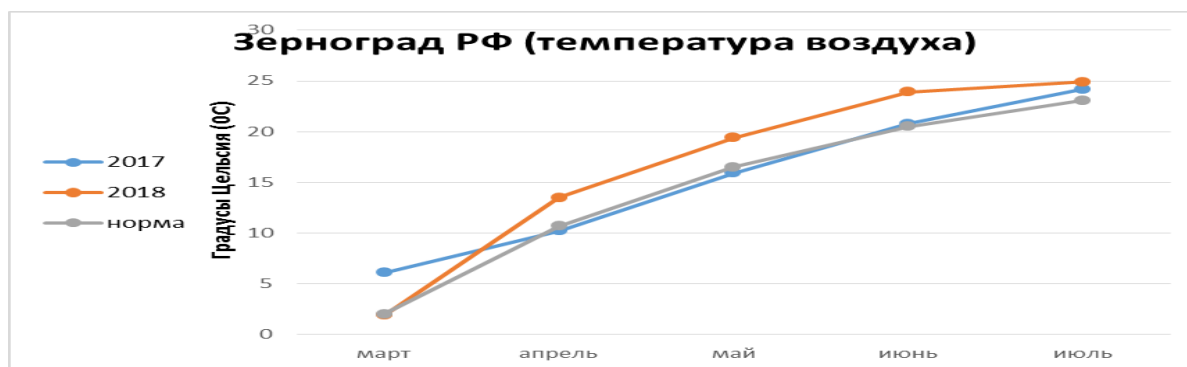


Рисунок 5 — Среднемесячные показатели температуры воздуха за период вегетации ячменя (март-июль) в 2017-2018 гг., на метеостанции «Зерноградская»

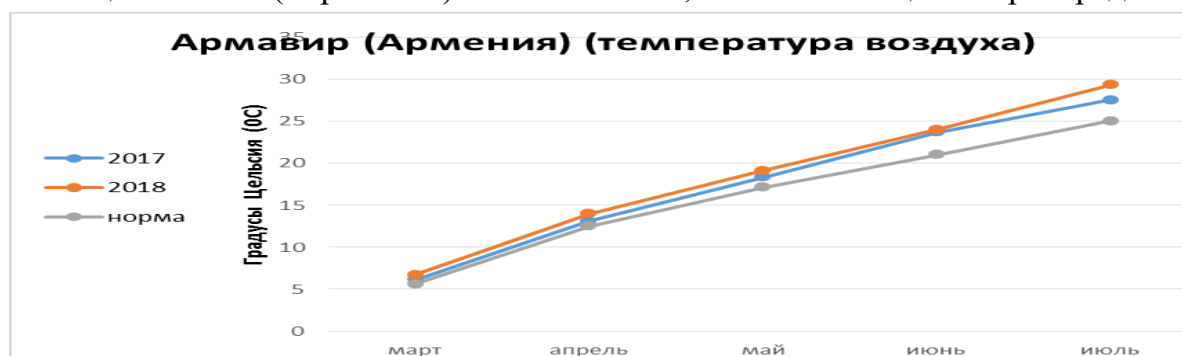


Рисунок 6 — Среднемесячные показатели температуры воздуха за период вегетации ячменя (март-июль) в 2017-2018 гг., на метеостанции «Армавирская»

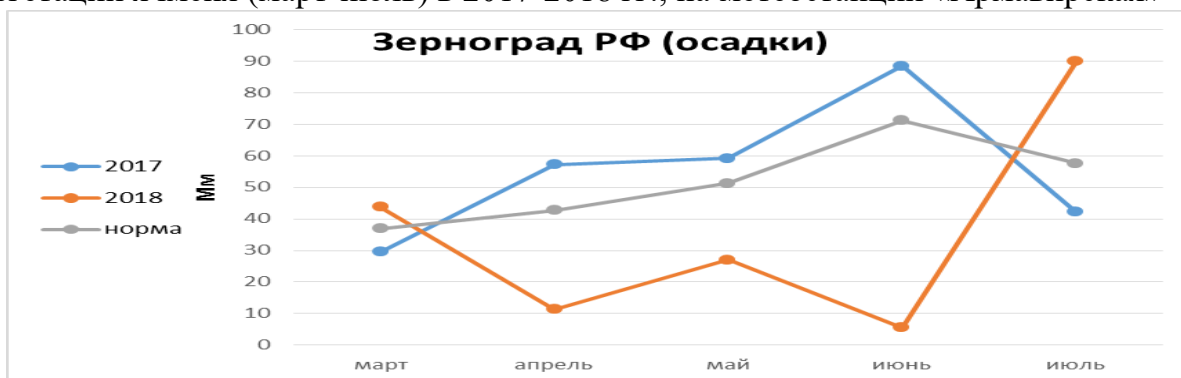


Рисунок 7 — Сумма атмосферных осадков за период вегетации ячменя (март-июль) в 2017-2018 гг., на метеостанции «Зерноградская»

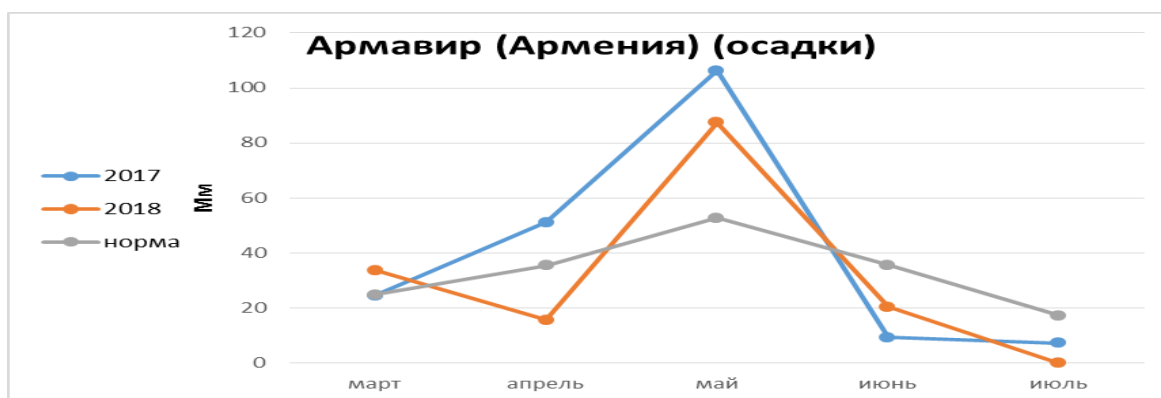


Рисунок 8 — Сумма атмосферных осадков за период вегетации ячменя (март-июль) в 2017-2018 гг., на метеостанции «Армавирская»

Так, в 2017 году значения близки к климатической норме, однако в 2018 году наблюдается превышение температуры воздуха по сравнению со среднегодовыми значениями и дефицит атмосферных осадков в период вегетации ячменя, как в Зерноградском районе Ростовской области РФ, так в Армавирском районе республики Армения.

Таким образом, результаты полевого опыта показывают, что обработка SkQ3 приводила к повышению показателей урожайности ярового ячменя сорта «Щедрый», особенно выражено в 2018 г. в обоих исследуемых регионах.

Полевые 2-х летние испытания на подсолнечнике, проведенные в ООО «Степное», показали, что обработка семян SkQ3 привела к увеличению показателей урожайности (табл. 4).

Таблица 4. - Влияние SkQ3 на структурные элементы урожая гибрида подсолнечника НК Конди в 2017-2018 гг.

	Диаметр корзинки, см	Масса семян одной корзинки, г	Масса тысячи семян, г	Урожайность (ц/га)
Контроль				
2017	19,3±0,4	69,3±4,6	58,6±3,7	19,7
SkQ3				
2017	20,8*±0,5	75,6±5,1	65,3±4,2	22,5
	Диаметр корзинки, см	Масса семян одной корзинки, г	Масса тысячи семян, г	Урожайность (ц/га)
Контроль				
2018	18,5±0,3	61,2±4,8	54,7±2,3	17,8
SkQ3				
2018	21,6*±0,4	83,6*±5,2	63,8*±3,1	21,6

*достоверные отличия по сравнению с контролем при $p < 0,05$

Как видно из таблицы 4, в 2018 г показатели продуктивности подсолнечника в контроле были ниже, чем в 2017 г (масса тысячи семян на 6,7 %, урожайность на 9,7 %). Обработка семян подсолнечника раствором SkQ3 в 2017 г. привела к увеличению диаметра корзинки на 7,2 % и урожайности на 12,5 % по сравнению с контролем. В 2018 г. увеличились все исследуемые показатели продуктивности: диаметр корзинки, масса семян одной корзинки и масса тысячи семян на 14,4 %, 26,8 % и 14,3 % соответственно. Урожайность повысилась на 17,6 % по сравнению с контролем.

Обработка семян SkQ3 в полевых условиях привела к незначительному увеличению показателей продуктивности подсолнечника в 2017 года, однако в 2018 г, показатели продуктивности значительно возросли после обработки семян SkQ3.

3.2. Влияние производных пластохинона (SkQ1 и SkQ3) на скорость роста и экспрессию генов антиоксидантной системы ячменя в норме и в присутствии частиц оксида цинка

Увеличение скорости роста в условиях высокой концентрации оксида цинка при обработке производными пластохинона SkQ1 и SkQ3 может косвенно свидетельствовать о восстановлении баланса между образованием и элиминацией АФК под действием антиоксиданта при воздействии тяжелых металлов.

Действие SkQ1 и SkQ3 на скорость роста проростков ярового ячменя в присутствии частиц оксида цинка представлено в таблице 5.

Таблица 5. - Влияние SKQ1 и SKQ3 на показатели скорости роста проростков ячменя в норме и при действии микро- и наночастиц оксида цинка

Варианты опыта	Длина листьев, см	Сухая масса листьев, мг	Длина корней, см	Сухая масса корней, мг
Контроль	13,5±1,2	20,5±1,3	13,0±0,8	10,3±0,5
ZnO 300 микро	13,2±1,3	19,8±1,8	11,6±0,7	9,6±0,7
ZnO 300 нано	13,2±1,5	19,6±2,1	11,2±0,6*	9,1±0,5*
ZnO 2000 микро	12,1±1,7	17,9±1,8	7,6±0,6*	7,9±0,5*
ZnO 2000 нано	12,3±1,6	18,1±1,6	6,0±0,5*	6,3±0,4*
ZnO 300 микро + SkQ1	13,4±1,3	19,7±2,0	11,5±0,8	9,9±0,7
ZnO 300 нано + SkQ1	13,5±1,4	19,5±1,7	11,9±0,9	9,8±0,8
ZnO 2000 микро + SkQ1	12,6±1,6	18,6±1,8	8,9±0,6*	9,0±0,5*
ZnO 2000 нано + SkQ1	12,7±1,2	18,8±1,6	7,1±0,5*	7,5±0,6*
ZnO 300 микро + SkQ3	13,8±1,5	19,4±1,5	12,1±0,6	9,7±0,8
ZnO 300 нано + SkQ3	13,9±1,2	19,5±1,9	11,8±0,7	10,0±0,6
ZnO 2000 микро + SkQ3	12,6±1,1	18,7±1,6	9,2±0,7*	9,1±0,4*
ZnO 2000 нано + SkQ3	12,4±1,4	18,5±1,8	7,0±0,4*	7,6±0,5*

*достоверные отличия по сравнению с контролем при $p < 0,05$

При концентрации ZnO до 2000 мг/л (табл. 5) длина и масса корней снижается практически в 2 раза. В аналогичных условиях, но при обработке растений SkQ1 и SkQ3, наблюдается увеличение длины корней на 14,6 % и 17,4 % соответственно, а сухая масса возрастает на 12,2 % и 13,2 % по сравнению с необработанными растениями. При внесении аналогичной концентрации оксида цинка в форме наночастиц длина корней увеличивается на 15,5 % и 14,3 %, а сухая масса на 16,0 % и 17,1 % соответственно.

Влияние частиц оксида цинка различной степени дисперсности и концентраций на экспрессию генов окислительного стресса в листьях и корнях 14-ти дневных проростков ячменя представлено в виде тепловой карты на рисунке 9.

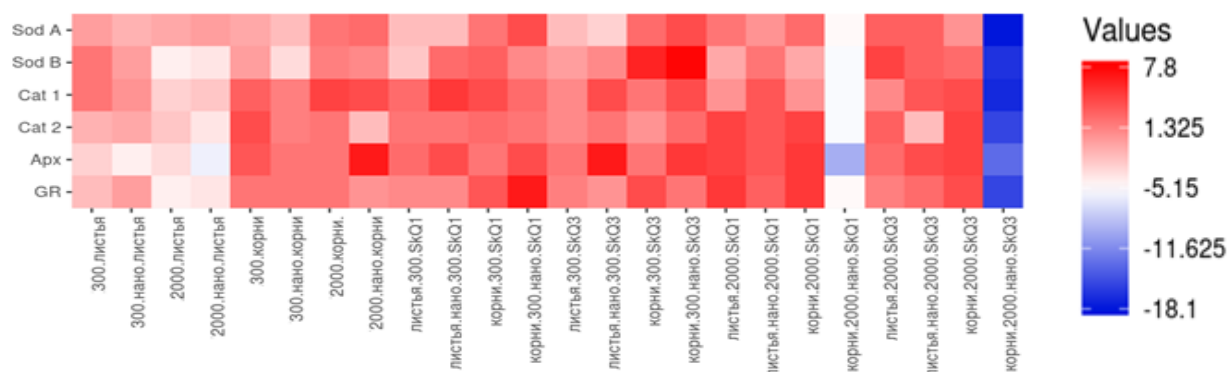


Рисунок 9 — Тепловая карта действия SkQ1 и SkQ3 на уровень экспрессии генов окислительного стресса в листьях и корнях 14-дневных проростков ячменя в присутствии частиц ZnO в концентрации 300 мг/л и 2000 мг/л

Как видно на рисунке 9, уровень транскрипционной активности генов окислительного стресса ячменя при воздействии оксида цинка в корнях возрастает до 3-х раз по сравнению с контролем (за исключением генов *CAT2* и *APX*), а в листьях изменение данного показателя варьировалось в зависимости от концентрации. Так, наибольшее воздействие оказали частицы ZnO в концентрации 2000 мг/л, что привело к снижению в листьях транскрипционной активности генов *SODB* и *CAT* до 1,5 раз.

При обработке проростков митохондриально-направленными антиоксидантами SkQ1 и SkQ3 уровень относительной экспрессии генов антиоксидантной системы в листьях и корнях растений ячменя варьировался.

Как видно на представленной тепловой карте, уровень экспрессии всех изучаемых генов в листьях повышается (за исключением генов *SOD*) до 6 раз, а в корнях до 8 раз при обработке семян SkQ1 и SkQ3 при внесении ZnO в концентрации 300 мг/л. При повышении концентрации оксида цинка до 2000 мг/л уровень экспрессии всех исследуемых генов, кроме *Cat 2* в листьях повышается до 4,8 раз, а в корнях уменьшается в 5-18 раз.

3.3 Анализ протекторного эффекта SkQ1 на скорость роста, уровень АФК и экспрессию генов антиоксидантной системы риса в норме и в условиях гипоксии

В таблице 7 суммированы показатели всхожести семян, массы корней и побегов 7-ми дневных проростков риса в контроле и в условиях их полного затопления в растворах SkQ1 в концентрациях 10^{-9} - 10^{-5} М.

Таблица 7. - Влияние различных концентраций SkQ1 на всхожесть семян и накопление биомассы проростков риса в условиях полного затопления

Вариант опыта	Всхожесть семян, %	Сырой вес, мг		Сухой вес, мг	
		Побег	Корень	Побег	Корень
Нормоксия, O ₂ ~ 298,9 мг/л	83,3 ± 1,00	15,5 ± 0,32	6,7 ± 0,37	1,7 ± 0,09	0,9 ± 0,06
Затопление, O ₂ - 9,2 мг/л	83,5 ± 2,57	10,7 ± 0,20*	4,1 ± 0,42*	1,4 ± 0,03*	0,8 ± 0,04
Затопление, O ₂ - 9,2 мг/л + SkQ1 10 ⁻⁹ М	92,0 ± 1,56**	14,6 ± 0,36**	5,4 ± 0,64**	1,6 ± 0,04**	0,7 ± 0,08
Затопление, O ₂ - 9,2 мг/л + SkQ1 10 ⁻⁸ М	93,3 ± 1,20**	16,8 ± 0,54**	8,3 ± 0,63**	2,0 ± 0,06**	1,2 ± 0,05**

Затопление, O ₂ - 9,2 мг/л+ SkQ1 10 ⁻⁷ М	98,2 ± 1,70**	15,0 ± 0,30**	5,0 ± 0,83	1,5 ± 0,04	0,6 ± 0,10
Затопление O ₂ - 9,2 мг/л) + SkQ1 10 ⁻⁶ М	83,0 ± 3,72	14,9 ± 0,33**	4,6 ± 0,33	1,4 ± 0,07	0,6±0,04**
Затопление O ₂ - 9,2 мг/л) + SkQ1 10 ⁻⁵ М	66,7 ± 1,66**	3,0 ± 0,47 **	0,1 ± 0,11**	1,2 ± 0,04**	-

* достоверные отличия по сравнению с контролем при $p < 0,05$

** достоверные отличия по сравнению с затоплением без обработки SkQ1

Из результатов таблицы видно, что внесение SkQ1 в концентрации 10⁻⁹ М увеличивает всхожесть семян и прирост массы побегов растений. При концентрации SkQ1 10⁻⁸ М значения сырой и сухой массы побегов риса статистически значимо превышают таковые у растений, выращенных не только в условиях затопления, но и при нормальной аэрации.

Анализ содержания АФК в проростках риса установил, что внесение SkQ1 в наномолярных концентрациях приводило к снижению общего уровня радикалов кислорода по сравнению с контролем (рис. 10). С другой стороны, дальнейшее увеличение концентрации SkQ1 индуцировало дозозависимое увеличение количества АФК в тканях растений, что свидетельствует о его прооксидантной активности. Так, например, 10⁻⁵ М SkQ1 повышало содержание АФК в корне в 2,8 раза по сравнению с контролем, и в 5,1 раз по сравнению с нормоксией.

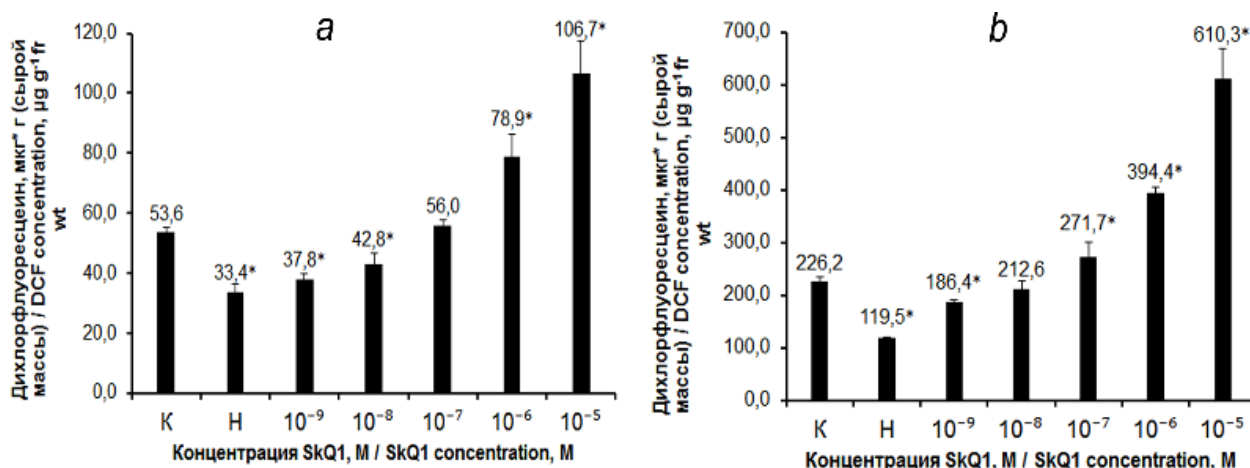


Рисунок 10 — Влияние различных концентраций SkQ1 (10⁻⁹ – 10⁻⁵ М) на суммарный уровень АФК 7-ми дневных проростков риса: *a* – побеги, *b* – корни, Н – нормоксия, К – контроль (гипоксия), содержание кислорода 3 % от уровня нормоксии

* достоверные отличия по сравнению с контролем при $p < 0,05$

Результаты транскрипционного анализа свидетельствуют, что в концентрациях 10^{-9} и 10^{-8} М SkQ1 в целом снижает уровень экспрессии генов изоформ антиоксидантных ферментов в затопленных проростках до уровня их активности характерного при условиях нормальной аэрации или даже ниже (рис. 11). В свою очередь, повышение содержания АФК при высоких концентрациях SkQ1 приводит к гиперэкспрессии соответствующих генов.

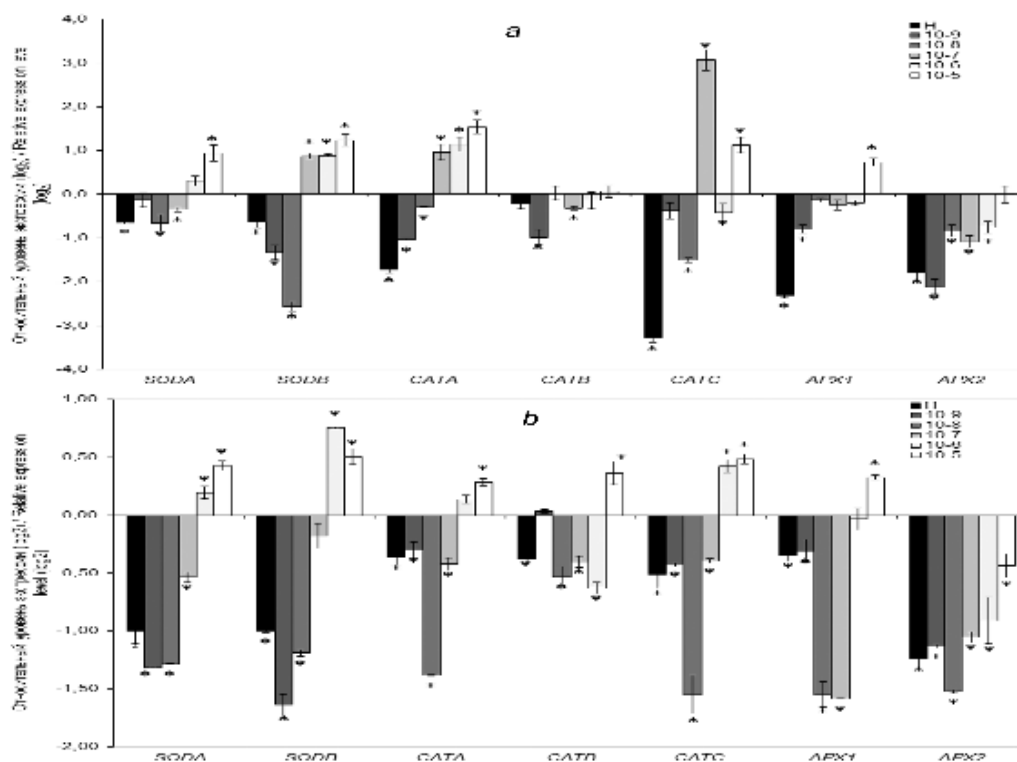


Рисунок 11 — Влияние различных концентраций SkQ1 (10^{-9} – 10^{-5} М) на уровень экспрессии генов антиоксидантных ферментов: SODA - супероксиддисмутазаА, SODB - супероксиддисмутазаВ, CATA - каталаза А, CATВ- каталаза В, CATС - каталаза С, APX1 - аскорбатпероксидаза 1, APX2 - аскорбатпероксидаза 2 7-ми дневных проростков риса: *a* – побеги, *b* – корни, Н – нормоксия.

Уровень экспрессии целевых генов растений, обработанных SkQ, представлен относительно уровня их экспрессии при гипоксии (содержание кислорода 3 % от уровня нормоксии),* – достоверные отличия по сравнению с контролем при $p < 0,05$

Таким образом, митохондриально-направленный антиоксидант SkQ1 является эффективным протектором в условиях гипоксии на начальных этапах развития растений риса.

В целом, можно заключить, что соединения ряда SkQ (SkQ1 и SkQ3) могут быть перспективными в современных агротехнологиях в качестве средств защиты растений от экстремальных факторов окружающей среды.

ВЫВОДЫ

1) В условиях пониженного содержания почвенной влаги (30 %–50 % от полной влагоемкости) одноразовая обработка семян водными растворами SkQ1 и SkQ3 в концентрации 2,5 нМ повышает массу побегов и корней на 15–40 % у озимой пшеницы, ярового ячменя, подсолнечника и кукурузы.

2) Анализ транскрипционной активности генов окислительного стресса: *SodA1*, *SodB*, *GR*, *GST1*, *GST6*, *Cat1*, *Cat2*, *Apx1*, показал, что обработка семян ячменя растворами SkQ1 и SkQ3 в концентрации 2,5 нМ в условиях пониженного содержания почвенной влаги (30 %–50 % от полной влагоемкости) уменьшает в 3–11 раз транскрипционную активность этих генов в корнях растений.

3) В присутствии микрочастиц оксида цинка в концентрации 300 мг/л длина и масса побегов и корней 14-ти дневных проростков ячменя не изменяются по сравнению с контролем, однако при воздействии наночастиц в той же концентрации длина и масса корней уменьшается на 14 % и 12 % соответственно. При совместной обработке семян ячменя растворами SkQ1 или SkQ3 в концентрации 2,5 нМ с наночастицами оксида цинка в концентрации 300 мг/л длина и масса корней увеличиваются на 10 %, достигая уровня контрольных показателей.

4) В присутствии оксида цинка в концентрации 2000 мг/л, как в микро-, так и в наноформе длина и масса корней 14-ти дневных проростков ячменя снижаются в 2 раза сравнению с контролем. При совместной обработке семян ячменя растворами SkQ1 или SkQ3 в концентрации 2,5 нМ длина и масса корней увеличиваются на 12–17 % соответственно по сравнению с необработанными SkQ семенами.

5) При прорастании семян ячменя, предварительно обработанных растворами SkQ1 или SkQ3 в концентрации 2,5 нМ в присутствии частиц оксида цинка в концентрации 300 мг/л, как в микро-, так и в наноформе, уровень транскрипции генов окислительного стресса (*SodA1*, *SodB*, *GR*, *GST1*, *GST6*, *Cat1*, *Cat2*, *Apx1*) в листьях и корнях 14-ти дневных проростков повышался в 6–8 раз по сравнению с необработанными SkQ семенами. При увеличении концентрации оксида цинка, как в микро-, так и в наноформе до 2000 мг/л в тех же условиях эксперимента уровень транскрипции этих генов в листьях возрастал (за исключением генов *SodB* и *Cat2*) в 0,5–4,8 раза, а в корнях, наоборот, снижался в 5–18 раз, по сравнению с необработанными SkQ семенами

6) При прорастании риса из-под слоя воды в условиях гипоксии (содержание кислорода 3 % от уровня нормоксии), SkQ1 в концентрации 10 нМ увеличивает на 12 % всхожесть семян, на 57 % массу побегов и на 102 % массу корней 7-дневных проростков, а также снижает у них на 20 % содержание активных форм кислорода и уровень экспрессии генов антиоксидантных ферментов.

7) Предпосевная обработка семян водными растворами SkQ3 в концентрации 2,5 нМ повышает в засушливых условиях вегетации урожайность озимой пшеницы сорта «Лидия» и «Лазурит» в Зерноградском районе Ростовской области, на 3,7 и 4,4 ц/га, соответственно; ярового ячменя сорта «Щедрый» в Армавирском районе республики Армения и Зерноградском районе Ростовской области на 7,4 ц/га и 10 ц/га, соответственно, а также гибрида подсолнечника НК Конди в Верхнедонском районе Ростовской области на 3,3 ц/га.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. Дуплий, Н. Г. Влияние производного пластохинона SkQ3 на показатели роста и развития кукурузы в условиях засухи / Н. Г. Дуплий, А. В. Усатов // Живые и биокосные системы. – 2025. – № 52. – DOI 10.18522/2308-9709-2025-52-5. – EDN ONTOHL. (K3)

2. Дуплий, Н. Г. Влияние митохондриально-направленных антиоксидантов, производных пластохинона на устойчивость зерновых культур к водному дефициту / Н. Г. Дуплий, А. В. Усатов, К. В. Азарин // АгроЭкоИнфо. – 2024. – № 1(61). – DOI 10.51419/202141132. – EDN YKZIVE. (K3)

3. Дуплий, Н. Г. Влияние производных пластохинона класса SkQ на поддержание баланса АФК в растительных организмах под воздействием экстремальных факторов среды / Н. Г. Дуплий, А. В. Усатов // Живые и биокосные системы. – 2024. – № 50. – DOI 10.18522/2308-9709-2024-50-4. – EDN TDOAJZ. (K3)

4. Дуплий, Н. Г. Влияние предпосевной обработки семян 10-(6'-метилпластохинонил) децилтрифенилфосфонием (SkQ3) на скорость роста и урожайность подсолнечника / Н. Г. Дуплий, А. В. Усатов, А. С. Азаров // Социально-экологические технологии. – 2021. – Т. 11, № 2. – С. 204-214. – DOI 10.31862/2500-2961-2021-11-2-204-214. – EDN IKSZNY. (K2)

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science

5. The Effect of Plastoquinone Derivatives on Barley (*Hordeum vulgare* L.) Tolerance to Zinc Oxide Particles of Different Dispersion / N. G. Duplii, A. V. Usatov, K. V. Azarin [et al.] // Nature Environment and Pollution Technology. – 2025. – Vol. 24, No. 3. – P. D1736. – DOI 10.46488/nept.2025.v24i03.d1736. – EDN VFTOXC. (Q3) (K2)

6. Effects of ZnO nanoparticles and its bulk form on growth, antioxidant defense system and expression of oxidative stress related genes in *Hordeum vulgare* L / K. V. Azarin, A. V. Usatov, T. M. Minkina [et al.] // Chemosphere. – 2022. – Vol. 287. – P. 132167. – DOI 10.1016/j.chemosphere.2021.132167. – EDN DMXOMK. (K1)

Статьи и тезисы, опубликованные в других изданиях

7. Дуплий, Н. Г. Действие препарата "Агримитин" на показатели продуктивности у различных сортов озимой пшеницы / Н. Г. Дуплий, А. С. Азаров, А. В. Усатов // Вавиловские чтения - 2017 : сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 130-й годовщине со дня рождения академика Н. И. Вавилова / Министерство сельского хоз-ва Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова. – Саратов: Саратовский ГАУ, 2017. – С. 326-328. – EDN ZVOBBR.

8. Дуплий, Н. Г. Влияние SKQ3 (10-(6'-метилпластохинонил) децилтрифенилфосфония) на устойчивость кукурузы к почвенной засухе / Н. Г. Дуплий, А. С. Азаров, А. В. Усатов // Проблемы социально-экономической географии и природопользования : сборник трудов Всероссийской научной конференции (Ростов-на-Дону, 1 декабря 2017 г.) / Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет", Институт наук о Земле ; [редакционная коллегия: В. В. Латун - пред. и др.]. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – С. 169-171. – EDN JWZKHL.

9. Дуплий, Н. Г. Влияние 10-(6'-метилпластохинонил) децилтрифенилфосфония (SkQ3) на рост и развитие озимой пшеницы в условиях засухи / Н. Г. Дуплий // Экспериментальная биология растений: фундаментальные и прикладные аспекты : годичное собрание Общества физиологов растений России : научная конференция и школа молодых ученых, 18-24 сентября 2017 года, Крым, Судак : сборник материалов докладов. – Москва: АНО "Центр содействия научной, образовательной и просветительской деятельности "Соцветие", 2017. – С. 160. – EDN YSAWQQ.

10. Эффективность применения SKQ3 (10-(6'- метилпластохинонил децилтрифенилфосфония) при возделывании озимой пшеницы и ярового ячменя в условиях Ростовской области / Н. Г. Дуплий, А. С. Азаров, А. В. Усатов, А. С. Попов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2018. – № 140. – С. 60-72. – DOI 10.21515/1990-4665-140-022. – EDN VGKBWV.

11. Дуплий, Н. Г. Эффективность предпосевной обработки семян кукурузы стимуляторами роста для повышения ее продуктивности в условиях Ростовской области / Дуплий Надежда Геннадьевна // Ломоносов - 2019 : материалы XXVI международного молодежного научного форума, 8-12 апреля 2019 года, г. Москва : электронное издание комплексного распространения. Секция "Биология". Подсекция "Физиология растений" / отв. ред. И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов. – Москва: МАКС Пресс, 2019. – URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2019/data/16088/95345_uid342005_report.pdf (дата обращения 20.04.2026)

12. Сравнительный анализ действия митохондриальных антиоксидантов (SkQ1 и SkQ3) на скорость роста зерновых культур в различных условиях увлажнённости / Н. Г. Дуплий, А. В. Усатов, А. С. Азаров, А. А. Дворник // Генетика - фундаментальная основа инноваций в медицине и селекции : материалы VIII научно-практической конференции с международным участием Ростов-на-Дону, 26–29 сентября 2019 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» ; главный редактор: доктор биологических наук, профессор Т. П. Шкурат. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – С. 162-163. – EDN FIWYSN.

13. Дуплий, Н. Г. Влияние производных пластохинона на транскрипционную активность генов антиоксидантной системы растений ячменя в норме и при воздействии наночастиц оксида цинка / Н. Г. Дуплий, В. Д. Митюков // Биологическое разнообразие и биоресурсы степной зоны в условиях изменяющегося климата : сборник материалов Международной научной конференции, посвящённой 95-летию Ботанического сада Южного федерального университета (24-29 мая 2022 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» ; ответственные редакторы: Т. В. Вардуни, П. А. Дмитриев, В. А. Чохели. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2022. – С. 527-534. – EDN JWTKLR.

14. Дуплий, Н. Г. Применение производных пластохинона для повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к почвенной засухе / Н. Г. Дуплий // Степная Евразия - устойчивое развитие : международный форум, Ростов-на-Дону, 27-30 сентября 2022 г. : сборник материалов международного форума / Правительство Ростовской области, Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области, Южный федеральный университет [и др.] ; ответственный редактор: К. Ш. Казеев. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2022. – С. 128-130. – EDN FNCEDI.

15. Дуплий, Н. Г. Влияние митохондриально-направленных антиоксидантов на основе пластохинона на устойчивость растений к загрязнению почвы тяжелыми металлами / Н. Г. Дуплий, А. В. Усатов // Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки : материалы международной молодежной научной школы, Ростов-на-Дону, 27-30 сентября 2022 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет" ; главный редактор: Т. М. Минкина. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2022. – С. 366-369. – EDN DXSJBV.

16. Дуплий, Н. Г. Действие митохондриально-направленного антиоксиданта SKQ3 на скорость роста ячменя в условиях засухи и повышенного содержания оксида цинка / Н. Г. Дуплий, А. В. Усатов // Генетика и биотехнология XXI века: проблемы, достижения, перспективы : V Международная научная конференция, посвященная 135-летию со дня рождения Н. И. Вавилова, Минск, 21-25 ноября 2022 г. : материалы конференции / Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Общественное объединение "Белорусское общество генетиков и селекционеров" ; редкол.: А. В. Кильчевский [и др.]. – Минск, 2022. – С. 35. – URL: <https://igc.by/wp-content/uploads/2022/11/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F-2022.pdf> (дата обращения 20.04.2026)

17. Дуплий, Н. Г. Перспективы использования производных пластохинона для повышения устойчивости риса к глубоководному затоплению / Н. Г. Дуплий // Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки : сборник трудов III Международной молодежной научной

школы, Геленджик, 7-9 июня 2024 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южный федеральный университет, Филиал ЮФУ в г. Геленджике, Академия биологии и биотехнологии имени Д. И. Ивановского, Ростовское отделение общества почвоведов имени В. В. Докучаева ; ответственные редакторы: К. Ш. Казеев, В. В. Вилкова. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2024. – С. 75-77.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АФК – активные формы кислорода

SkQ1- 10-(6'-пластохинонил) децилтриметилфосфоний

SkQ3 - 10-(6'-метилпластохинонил) децилтрифенилфосфония

ПЭГ – полиэтиленгликоль

SOD - супероксиддисмутаза

CAT - каталаза

APX - аскорбатпероксидаза

GR - глутатионредуктаза

GST – глутатионтрансфераза