

УДК 631.1:631.98:546.215

ОЦЕНКА УРОЖАЙНОСТИ ТРИТИКАЛЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА В ПРИСУТСТВИИ КАТАЛИЗАТОРОВ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ХАРАКТЕРА

© 2024 г. Е. К. Барнашова¹, С. Н. Сергеев², М. И. Будник^{3,*}, К. А. Тараскин^{2,**},
С. С. Деревягин⁴, О. Т. Касаикина⁵, Л. М. Апашева⁵, Е. Н. Овчаренко⁵,
А. В. Лобанов⁵, А. В. Грудзинский³

¹Российский государственный аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева
127434 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

²Научно-исследовательский институт прикладной акустики
141981 Дубна, Московская обл., ул. 9 Мая, 7а, Россия

³Российская академия ракетных и артиллерийских наук
107564 Москва, ул. 1-я Мясниковская, 3, стр. 3, Россия

⁴Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока
410010 Саратов, ул. Тулайкова, 7, Россия

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н.Н. Семенова РАН
119991 Москва, ул. Косыгина, 4, Россия

*E-mail: ziraf@mail.ru

**E-mail: kant1958@yandex.ru

Проведена экспериментальная оценка влияния активаторов окислительных процессов на урожайность зерновой культуры тритикале на опытных участках Федерального аграрного научного центра Юго-Востока, г. Саратов. Растения тритикале в период вегетации опрыскивали водным раствором пероксида водорода с концентрацией 5 мкмоль/л в присутствии катализаторов окислительного характера на основе кислородсодержащих соединений: 2-бутанона, 1-тетралона, циклогексанона. Показана эффективность применения всех использованных в настоящей работе катализаторов. Наилучшие результаты получены при двукратной обработке водным раствором циклогексанона в перексиде водорода с концентрацией 5 мкмоль/л в соотношении 1 : 300, проведенной за 4 и 3 нед до начала уборки урожая, что привело к увеличению урожайности зерна тритикале на 176% относительно контроля. Пероксид водорода является дополнительным источником кислорода, ускоряющим метаболизм в растениях. Еще большая активация обменных процессов в растениях происходила в присутствии катализаторов окислительного характера (2-бутанона, 1-тетралона, циклогексанона), обусловленная образованием в водных растворах высокоактивных кислородсодержащих структур, что в конечном итоге приводило к более высоким показателям урожайности культурных растений, в частности, тритикале.

Ключевые слова: пероксид водорода, тритикале, катализатор, урожайность, зерновая культура, окислительные процессы.

DOI: 10.31857/S0002188124070049, **EDN:** CGAIBO

ВВЕДЕНИЕ

Химические взаимодействия, лежащие в основе окислительных процессов, происходящих в растениях, вносят, безусловно, существенный вклад во многие аспекты жизнедеятельности как на клеточном, так и на тканевом уровнях. Вместе с тем до настоящего времени остается актуальной проблема недостаточной изученности роли отдельных кислородсодержащих соединений в регуляции ростовых функций растений. Особое значение имеет

этот вопрос при оценке возможности влияния регуляторной функции растительных систем на интенсификацию ростовых процессов, в том числе на увеличение урожайности сельскохозяйственных культур [1]. Дальнейшие исследования в этом направлении будут иметь большое значение при решении задач, поставленных в доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной указом Президента России от 21 января 2020 г., в частности, для “обеспечения

населения качественной и безопасной пищевой продукцией”, а также в рамках реализации федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства, которая продлена до 2030 г. Одним из перспективных направлений увеличения урожайности культурных растений является обработка посевов активными химическими средствами, улучшающими усвоение питательных веществ и способствующих активизации биохимических процессов.

Известно, что одним из ключевых положений перекисной теории биологического окисления А.Н. Баха, впервые обнаружившего в клетках растений пероксид водорода (H_2O_2), является необходимость предварительной активации кислородсодержащих молекул в биологических системах [2], что нашло свое дальнейшее развитие в фундаментальной работе Комиссарова [3]. Окислительные реакции оказывают существенное влияние на метаболические взаимодействия в живых организмах [4], также велика их роль в биохимических превращениях, обеспечивающих течение ростовых процессов [5, 6]. Пероксид водорода является одним из важных природных окислительных агентов [7], играющих существенную роль в жизнедеятельности растений, что в значительной степени определяется его относительной стабильностью среди прочих активных форм кислорода. По всей видимости, это свойство является фундаментальным условием, обеспечивающим участие пероксида водорода в биологических процессах, в частности, в жизнедеятельности растений.

В настоящее время, с одной стороны, установлено влияние пероксида водорода на регулирование ряда биохимических процессов в качестве сигнального медиатора [8–10], а также средства, активирующего ростовые процессы в семенном материале [11, 12]. С другой стороны, пероксид водорода, как источник ряда высоко агрессивных кислородсодержащих агентов — ионов и радикалов, представляет опасность в качестве разрушительного фактора клеточных структур живого организма [13]. Таким образом, необходимо констатировать, что роль этого химического вещества в биохимических превращениях многофункциональна и до конца не изучена. Вместе с тем исследования в области биохимии окислительных процессов в растениях показали [7], что эффективность таких взаимодействий возможна лишь при образовании активных форм кислорода, образующихся при воздействии внешних иницирующих факторов.

Настоящее исследование посвящено изучению влияния на ростовые процессы культурных растений активных химических субстанций, создаваемых на основе пероксида водорода действием катализаторов окислительного характера: 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона. Объектом исследования



Рис. 1. Выращивание тритикале на опытных участках ФАНЦ Юго-Востока, г. Саратов.

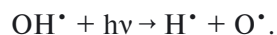
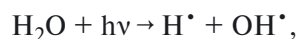
была выбрана зерновая культура тритикале [14], культивация и исследование которой освоено на опытных участках Федерального аграрного научного центра (ФАНЦ) Юго-Востока [15, 16] (рис. 1).

В соответствии с данными ранее проведенных исследований [17], среднегодовая урожайность зерна тритикале при выращивании в регионе Нижнего Поволжья находится в пределах от 120 до 780 г/м² (в среднем во всех образцах — 431 г/м²) [18] и в значительной степени определяется условиями культивирования, составом почв, сезонными климатическими особенностями и рядом других факторов воздействия [19].

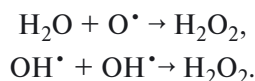
Цель работы — установление зависимости показателей урожайности тритикале при воздействии пероксида водорода, активированного внесением катализирующих добавок в рецептуру для обработки растений в период вегетации.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве активатора биологических процессов в настоящем исследовании был использован водный раствор пероксида водорода слабой концентрации — экопероксид. Экологически чистый водный раствор пероксида водорода, применяемый для обработки культурных растений, был получен без использования химических субстанций, при реализации высокоэнергетического бесконтактного воздействия на дистиллированную воду стримерами высоковольтного электрического разряда [20]. В основе настоящего процесса лежит фотодиссоциация, т.е. распад молекул воды с образованием свободных радикалов:



При взаимодействии свободных радикалов с водой и друг с другом происходят следующие химические превращения:



В результате радикальных реакций образуется пероксид водорода.

Концентрацию пероксида водорода определяли с помощью йодометрического титрования [21]. С этой целью через фиксированный промежуток времени из реакционного раствора отбирали пробу объемом 1 мл, добавляли к ней 1 мл H_2SO_4 (0.2 моль/л), вытесняли растворенный кислород, продувая углекислым газом, после чего смешивали с 2 мл обескислороженного 5%-ного водного раствора йодида калия. Выделение йода, образующего с избытком йодида комплексный анион I_3^- , регистрировали методом спектрофотометрии ($\lambda_{\text{max}} = 351 \text{ нм}$, $\epsilon = 26400 \text{ М}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$).

На первом этапе проведения экспериментов использовали экопероксид с концентрацией 1, 5, 50 мкмоль/л, а также растворы 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона в дистиллированной воде в соотношении 1: 300 для определения наиболее эффективных растворов для дальнейших исследований. 2-Бутанон и 1-тетралон, использованные в опытах для приготовления растворов, предназначенных для обработки тритикале, соответствовали качеству фирмы Merck. Циклогексанон был получен синтетическим путем в лабораторном процессе каталитического гетерофазного взаимодействия [22] и очищен по методике [23].

На втором этапе использовали растворы 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона в перексиде водорода с концентрацией 5 мкмоль/л. Количество катализатора рассчитывали, исходя из обоснованных величин [24], составляющих 1 объемную долю на 300 объемных долей раствора экопероксида с концентрацией 5 мкмоль/л.

Для проведения полевых экспериментов использовали зерновую культуру тритикале, сорт Зубр селекции ФАНЦ Юго-Востока [25]. Настоящий сорт является высокопродуктивным образцом озимой гексаплоидной тритикале ($\times \text{Triticosecale Wittmack}$), разработанным специально для культивации в засушливых условиях Нижнего Поволжья. По результатам наблюдений за 2016–2020 гг. урожай зерна сорта Зубр в среднем составил 42.1 ц/га. Эксперимент в рамках настоящего исследования проведен на озимых посевах тритикале сезона 2022–2023 гг., на опытных стандартных делянках площадью 18 м² каждая. Посев семенного материала производили во 2-й декаде июля 2022 г. В течение сезонного выращивания посевы обрабатывали с использованием стандартных методов агротехники, разработанных

для озимых зерновых культур, выращиваемых в климатических условиях Юго-Восточного региона Российской Федерации [26]. Обработку надземной части растений водным раствором экологически чистого пероксида водорода, а также растворами, содержащими каталитические добавки, производили методом однократного или двукратного опрыскивания в 3-й декаде июня 2023 г. Такой выбор срока обработки соответствовал периоду вегетации – за 4 и 3 нед (повторное опрыскивание) до начала уборки урожая. Расход готового рабочего раствора на одну обработку составил 300 мл/м² стандартного опытного участка. Обработку посевов проводили в сухую безветренную погоду. Уборку культуры произвели в 3-й декаде июля 2022 г. Зерновой материал обрабатывали с использованием стандартных методов [27–29].

Оценка урожайности в рамках настоящего исследования проведена гравиметрическим методом по факту установления количества полученного зерна тритикале. Расчет прибавки урожайности, полученной в результате применения экспериментальных растворов, производили в % по отношению к урожайности, установленной на контрольном участке, где для опрыскивания вегетирующих растений тритикале использовали дистиллированную воду, соблюдая неизменными прочие параметры эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения поставленной задачи – повышения урожайности тритикале – использовали однократное и двукратное опрыскивание надземной части зерновой культуры тритикале в поздний период вегетации водным раствором, полученным в результате растворения катализаторов окислительного характера: 2-бутанона, 1-тетралона, циклогексанона в экологически чистом водном растворе пероксида водорода в соотношении 1 : 300.

На первом этапе были проведены эксперименты по однократной обработке надземной части посевов тритикале на опытных участках в период вегетации за 4 нед до уборки урожая растворами экопероксида различной концентрации (1, 5, 50 мкмоль/л), а также растворами 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона в дистиллированной воде в соотношении 1: 300 для определения наиболее эффективных растворов для дальнейших исследований. Контрольный опыт предполагал однократное опрыскивание надземной части растений дистиллированной водой. Каждый полученный результат включал среднее арифметическое трехкратной повторности опытов, проведенных в одинаковых условиях. Урожайность тритикале сорта Зубр по результатам проведенных

Таблица 1. Влияние однократной обработки посевов тритикале в период вегетации растворами экопероксида различной концентрации, 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона на урожайность зерна

Вариант			Урожайность зерна		
Повторность	Раствор для обработки	Концентрация раствора	кг/м ²		прибавка к контролю, %
			в отдельной повторности	среднее арифметическое	
1	Дистиллированная вода (контроль)	—	0.462	0.465	—
2			0.470		
3			0.464		
4	Экопероксид	1 мкмоль/л	0.487	0.495	106
5			0.506		
6			0.492		
7	Экопероксид	5 мкмоль/л	0.516	0.530	114
8			0.532		
9			0.541		
10	Экопероксид	50 мкмоль/л	0.453	0.447	96
11			0.446		
12			0.447		
13	2-Бутанон	1 : 300 объемных долей дистиллированной воды	0.469	0.462	99
14			0.458		
15			0.460		
16	1-Тетралон	1 : 300 объемных долей дистиллированной воды	0.461	0.466	100
17			0.467		
18			0.468		
19	Циклогексанон	1 : 300 объемных долей дистиллированной воды	0.460	0.459	99
20			0.463		
21			0.453		

экспериментов представлена в табл. 1. Долю прироста урожайности рассчитывали по отношению к результату, полученному в контрольном опыте.

Результаты экспериментов, полученных на первом этапе, показали, что обработка надземной части растений экопероксидом с концентрацией 5 мкмоль/л приводила к максимальному увеличению урожайности тритикале по сравнению с контролем, в котором опрыскивание производили дистиллированной водой. Существенных различий при обработке тритикале растворами 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона по сравнению с дистиллированной водой не выявлено.

Одним из ключевых механизмов, обеспечивающих рост и развитие растений при применении экологически чистого водного раствора пероксида водорода, является образование из H_2O_2 кислорода, что было доказано в исследованиях [1, 30]. Кислород, в свою очередь, ускоряет метаболизм в растениях, что и приводит к активации обменных процессов и в конечном итоге более высоким

показателям урожайности культурных растений. Однако необходимо иметь в виду, что такие превращения происходят при определенных оптимальных для растений концентрациях пероксида водорода. Было показано, что экопероксид можно отнести к регуляторам роста растений при использовании его растворов в определенной концентрации для получения эффектов блокирования, либо стимулирования развития растений с учетом вида растения [31]. Это соответствовало определению “регулятор роста растений”, когда действие препарата эффективно при учете видовой и сортовой специфичности в определенной концентрации действующего вещества, что согласуется с полученными данными на первом этапе экспериментов (табл. 1).

Далее, на 2-м этапе экспериментальных исследований были проведены опыты, включающие опрыскивание растений тритикале в период вегетации водным раствором экопероксида с концентрацией 5 мкмоль/л и добавлением катализаторов окислительного характера (2-бутанона,

Таблица 2. Влияние однократной и двукратной обработок раствором экопероксида с концентрацией 5 мкмоль/л в присутствии 2-бутанона, 1-тетралона и циклогексанона посевов тритикале в период вегетации

повторность, %	Вариант раствор для обработки в соотношении 1 : 300	количество обработок	Урожай зерна кг/м ²		*Прибавка, % относительно контроля
			в отдельной повторности	среднее арифметическое	
22	2-Бутанон: экопероксид	1	0.648	0.643	138
23			0.639		
24			0.644		
25	2-Бутанон: экопероксид	2	0.679	0.684	147
26			0.687		
27			0.683		
28	1-Тетралон: экопероксид	1	0.495	0.492	106
29			0.499		
30			0.481		
31	1-Тетралон: экопероксид	2	0.635	0.629	135
32			0.619		
33			0.627		
34	Циклогексанон: экопероксид	1	0.683	0.689	148
35			0.691		
36			0.693		
37	Циклогексанон: экопероксид	2	0.827	0.820	176
38			0.812		
39			0.821		

* Относительно средней величины урожайности зерна при использовании дистиллированной воды при однократной обработке – 0.465 кг/м² (табл. 1).

1-тетралона и циклогексанона). Расчетную долю катализатора устанавливали из соотношения 1: 300 объемных частей к раствору экопероксида. Режим обработки посевов тритикале в период вегетации включал 2 варианта опрыскивания до уборки урожая: 1 – однократное за 4 нед, 2 – двукратное за 4 и 3 нед (повторное опрыскивание). Полученные результаты представлены в табл. 2.

В соответствии с представленными в табл. 2 данными, было установлено, что каталитические добавки активировали воздействие экопероксида на растения тритикале, обеспечивая значимое повышение урожайности зерна. Активность была зарегистрирована при участии всех видов использованных катализаторов окислительного характера, что могло свидетельствовать об их способности воздействовать на окислительные биохимические процессы с участием пероксида водорода, при этом максимальное увеличение урожайности отмечали при использовании циклогексанона как при однократной (148%), так и двукратной (176%) обработке посевов тритикале. Необходимо отметить, что 2-бутанон и циклогексанон проявляли высокую активность как при однократной, так и двукратной обработке растения, а 1-тетралон был эффективен

лишь при двукратном применении. Однако необходимо отметить следующую особенность, имеющую практическое значение: разница между однократной и двукратной обработкой экопероксидом с добавкой 2-бутанона составляла всего 9% (138 и 147% соответственно), а для экопероксида с циклогексаном эта разница соответствовала 28% (148 и 176% соответственно). Можно сделать заключение, что двукратная обработка экопероксидом с добавкой 2-бутанона может быть признана малорентабельной.

Представленные экспериментальные результаты показали, что применение пероксида водорода в качестве средства обработки вегетирующих растений способствовало активации биохимических процессов, обеспечивающих увеличение урожайности зерновой культуры тритикале. Вместе с тем было показано, что дополнительная активация механизма окислительного процесса, достигаемая внесением каталитических добавок, способствовала существенному увеличению показателей урожайности. Наилучшие показатели урожайности были достигнуты при использовании циклогексанона. Такой эффект, зарегистрированный при использовании катализаторов окислительного

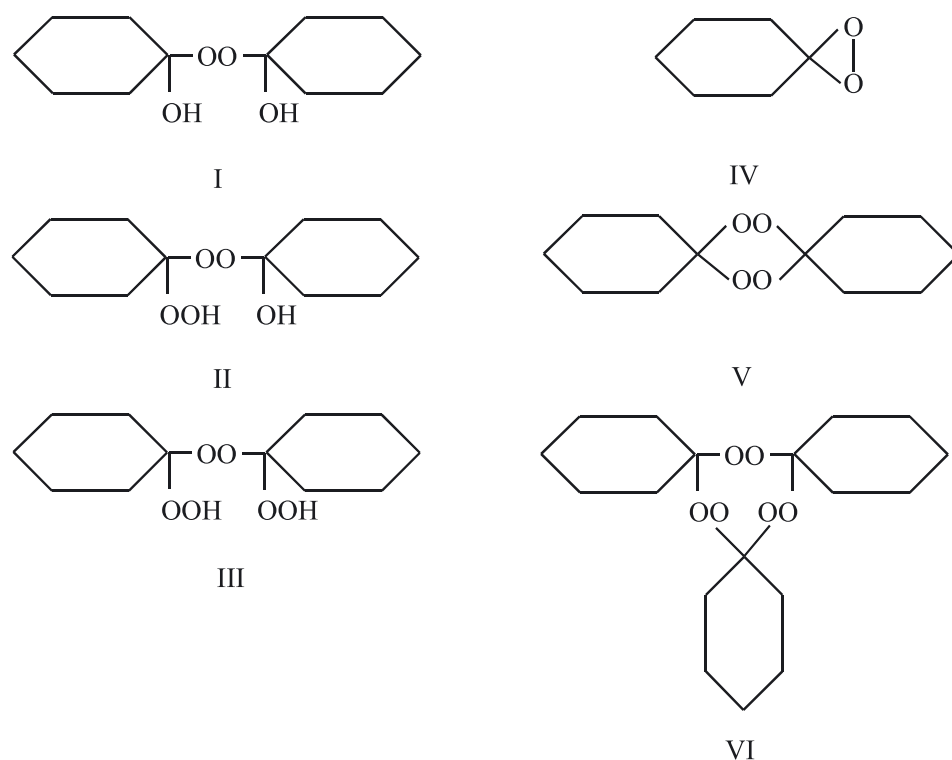


Рис. 2. Структурное строение соединений, образующихся при взаимодействии пероксида водорода и циклогексана в водном растворе.

характера, может быть обусловлен образованием высокоактивных кислородосодержащих соединений [32], имеющих структурное строение I–VI [33], представленное на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведена оценка влияния активатора ростовых процессов пероксида водорода в присутствии катализаторов окислительного характера. В результате экспериментальных исследований, проведенных на посевах зерновой культуры тритикале на опытных участках ФАНЦ Юго-Востока, г. Саратов, было показано, что влияние пероксида водорода на окислительные процессы, происходящие в структуре культурных растений, в значительной степени усиливают каталитические добавки кислородосодержащих соединений: 2-бутанона, 1-тетралона, циклогексанона.

Обработка культурных растений, выращенных на опытных участках в открытом грунте, проведенная методом опрыскивания вегетирующих растений активатором роста, показала, что наилучшие результаты были получены при использовании водного раствора пероксида водорода с концентрацией 5 ммоль/л, усиленного катализатором окислительного характера — циклогексаном. Двукратная обработка указанным раствором, проведенная за 4 и 3 нед

до начала уборки урожая, привела к увеличению урожайности зерна тритикале на 176% относительно контроля.

Повышение активности воздействия пероксида водорода на биохимические процессы, происходящие в растениях в присутствии катализаторов окислительного характера 2-бутанона, 1-тетралона, циклогексанона, могла быть обоснована образованием в водных растворах высокоактивных кислородосодержащих структур, оказывающих существенное влияние на регуляторные функции растений, что в конечном итоге приводило к более высоким показателям урожайности культурных растений, в частности, тритикале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стребков Д.С., Будник М.И., Душков В.Ю., Апашева Л.М., Лобанов А.В., Овчаренко Е.Н., Турбин В.В., Розанцев М.В., Беляков А.М., Кулик К.Н. Повышение урожайности озимой пшеницы с помощью экологически чистого водного раствора пероксида водорода природной концентрации // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2022. № 4. С. 64–67.
2. Бах А.Н. Собрание трудов по химии и биохимии. М.: АН СССР, 1950. 648 с.

3. Комиссаров Г.Г. Фотосинтез: физико-химический подход. М.: Едиториал УРСС, 2003. 224 с.
4. Полесская О.Г. Растительная клетка и активные формы кислорода / Под ред. И.П. Ермакова. М.: КДУ, 2007. 140 с.
5. Турпаев К.Т. Активные формы кислорода и регуляция экспрессии генов // Биохимия. 2002. Т. 67. № 3. С. 339–352.
6. Изменение содержания агглютинаина зародышей пшеницы в растениях, обработанных перекисью водорода // Прикл. биохим. и микробиол. 2007. Т. 42. С. 247–251.
7. Møller I.M., Jensen P.E., Hansson A. Oxidative modifications to cellular components in plants // Ann. Rev. Plant Biol. 2007. V. 58. P. 459–481.
8. Lander H.M. An essential role for free radicals and derived species in signal transduction // FASEB J. 1997. V. 11. № 1. P. 118–124.
9. Bhattacharjee S. Reactive oxygen species and oxidative burst: roles in stress, senescence and signal transduction in plants // Curr. Sci. 2005. V. 89. P. 1113–1121.
10. Жук В.В., Мусиенко Н.Н. Сигнальная функция перекиси водорода в адаптации растений пшеницы к условиям засухи // Мат-лы Международ. научн. конф. “Физиология растений – теоретическая основа инновационных агро- и фитобиотехнологий”. Калининград, 2014. Т. 2. С. 169–171.
11. Будник М.И., Сергеев С.Н., Тараскин К.А., Апашева Л.М., Ростовцев Р.А., Ущановский И.В., Пролетова Н.В., Лобанов А.В., Степнова А.Ф., Казиев Г.З., Овчаренко Е.Н., Барнашова Е.К., Смурова Л.А., Грудзинский А.В. Новый научно-методический подход к экологической обработке семян льна, повышающей всхожесть и предотвращающей слипание посевного материала // Мат-лы XVIII Международ. научн. конф. “Актуальные вопросы биологической физики и химии. БФФХ – 2023”, Севастополь. ГУ, МГУ им. М.В. Ломоносова. Севастополь, 2023. С. 116–117.
12. Сергеев С.Н., Тараскин К.А., Касаикина О.Т., Лобанов А.В., Будник М.И., Грудзинский А.В., Сорокин П.А., Барнашова Е.К., Апашева Л.М., Овчаренко Е.Н., Лебедев С.В., Шербакова Э.А., Бондар Ю.В., Касимцева К.С. Разработка метода химической активации светонезависимых окислительных процессов в стадии прорастивания семенного материала // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2023. № 6. С. 24–37.
13. Шлапакова Т.И., Костин Р.К., Тягунова Е.Е. Активные формы кислорода: участие в клеточных процессах и развитии патологии // Биоорг. химия. 2020. Т. 46. № 5. С. 466–485.
14. Дьячук Т.И., Акинина В.Н., Жилин С.В., Хомякова О.В., Барнашова Е.К., Калашникова Э.В., Окладникова В.П. Гаплоидия тритикале *in vitro* // Зерн. хоз-во России. 2022. № 1(79). С. 39–45.
15. Дьячук Т.И., Рудных С.К., Барнашова Е.К., Грибова Е.Д. Разработка процесса выделения глиаина из зерновой культуры тритикале и способа идентификации образца методом капиллярного электрофореза // Вестн. Международ. ун-та природы, общества и человека “Дубна”. Сер. Естеств. и инж. науки. 2020. № 4(49). С. 23–29.
16. Барнашова Е.К., Покидышев А.Н., Слюзова О.В., Гардина Ю.С., Жилин С.В., Тараскин К.А. Адаптация метода аналитического контроля содержания α-амилазы в зерне тритикале // Агрохимия. 2023. № 9. С. 56–64.
17. Жилин С.В., Акинина В.Н., Дьячук Т.И., Хомякова О.В., Барнашова Е.К., Калашникова Э.В., Куликова В.П., Сайфетдинов Е.А. ДГ линии – исходный материал для селекции тритикале в Нижнем Поволжье // Генофонд и селекция растений: Сб. мат-лов 6-й Международ. конф., Новосибирск, 23–25 ноября 2022 г. Новосибирск: ФИЦ Институт цитологии и генетики СО РАН, 2022. С. 66–68.
18. Поминов А.В. Исходный материал для селекции тритикале в Нижнем Поволжье: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2015. 22 с.
19. Акинина В.Н., Дьячук Т.И., Хомякова О.В., Жилин С.В., Барнашова Е.К., Калашникова Э.В., Куликова В.П. Характеристика сортов и перспективных линий тритикале в условиях Нижнего Поволжья // Тритикале: Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 7–8 июня 2022 г. Вып. 10. Ростов/нД.: Изд-во Юг, 2022. С. 42–52.
20. Стребков Д.С., Будник М.И. Апашева Л.М., Лобанов А.В., Овчаренко Е.Н. Получение экологически чистых растворов пероксида водорода при высокоэнергетическом бесконтактном воздействии на воду и их применение // Мат-лы XV Международ. научн. конф. БФФХ-2020. Севастополь, 2020. С. 191–192.
21. Лобанов А.В., Рубцова Н.А., Веденеева Ю.А., Комиссаров Г.Г. Фотокаталитическая активность хлорофилла в образовании пероксида водорода в воде // Докл. АН. 2008. Т. 421. № 6. С. 773–776.
22. Лебедев С.В., Шантроха А.В., Тараскин К.А. Окислительный катализ в процессе гетерофазного синтеза с участием олефинов циклического строения. Ч. 1. Обоснование направления исследований // Auditorium. 2022. № 3(35). С. 30–38.
23. Лебедев С.В., Шантроха А.В., Тараскин К.А. Окислительный катализ в процессе гетерофазного синтеза с участием олефинов циклического строения. Ч. 2. Экспериментальные исследования: результаты и обсуждение // Auditorium. 2022. № 3(35). С. 39–46.
24. Сергеев С.Н., Будник М.И., Лебедев С.В., Барнашова Е.К., Деревягин С.С., Тараскин К.А., Грудзинский А.В. Способ увеличения урожайности зерновой культуры тритикале путем опрыскивания водным раствором пероксида водорода и циклогексана надземной части растений в период

- поздней вегетации: Пат. 2797916, РФ // Изобретения, полезные модели. 2023. № 17.
25. Дьячук Т.И., Акинина В.Н., Жилин С.В., Хомякова О.В., Барнашова Е.К., Калашникова Э.В., Куликова В.П. Новый сорт озимой тритикале Зубр // Аграрн. научн. журн. 2022. № 6. С. 19–22.
 26. Прянишников А.И., Гапонов С.Н., Ляцева С.В., Ермолаева Т.Я., Нуждина Н.Н., Дьячук Т.И., Заворотина А.Д., Жолинский Н.М., Деревягин С.С., Курдюков Ю.Ф., Азизов З.М., Стрижков Н.И., Левицкая Н.Г., Ярошенко Т.М. Озимые культуры. Саратов: НИИСХ Юго-Востока, 2017. 37 с.
 27. Munoz-Insa A., Gastl M., Becker T. Influence of malting on the protein composition of *Triticale* ($\times$ *Triticosecale* Wittmack) “Trigold” // *Cereal Chem.* 2016. Т. 93. № 1. Р. 10–19.
 28. Панкратов Г.Н., Кандроков Р.Х., Щербакова Е.В. Исследование процесса измельчения зерна тритикале // *Хлебопродукты*. 2016. № 10. С. 59–61.
 29. Мацкевич И.В., Невзоров В.Н., Кох Ж.А., Беззязов Д.С. Совершенствование технологии подготовки зерна к переработке // Мат-лы научн. конф. “Научно-практические аспекты развития АПК”. Т. 2. Красноярск: КрасГАУ, 2020. С. 25–27.
 30. Douglass W.C. Hydrogen peroxide — medical miracle. Rhino Publishing, S.A., 2003. 177 p.
 31. Апашева Л.М., Будник М.И., Лобанов А.В., Овчаренко Е.Н., Розанцев М.В., Турбин В.В., Сергеев А.И., Стребков Д.С. Экологически чистый пероксид водорода: получение, рострегулирующие свойства // *Актуал. вопр. биол. физики и хим.* 2021, Т. 6. № 2. С. 358–361.
 32. Антоновский В.Л., Хурсан С.Л. Физическая химия органических пероксидов. М.: Академкнига, 2003. 391 с.
 33. Гайфуллин А.А., Тунцева С.Н., Гайфуллин Р.А., Харлампиди Х.Э. Получение пероксида циклогексана с использованием пероксидсодержащих сточных вод // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2012. Т. 15. № 23. С. 26–30.

Evaluation of Triticale Yield under the Influence of Hydrogen Peroxide in the Presence of Oxidative Catalysts

**Е. К. Barnashova^a, S. N. Sergeev^b, M. I. Budnik^{c, #}, K. A. Taraskin^{b, ##},
S. S. Derevyagin^d, O. T. Kasaikin^e, L. M. Apasheva^e, E. N. Ovcharenko^e,
A. V. Lobanov^e, A. V. Grudzinsky^c**

^aRussian State Agrarian University—K.A. Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya ul. 49, Moscow 127434, Russia

^bScientific Research Institute of Applied Acoustics, ul. 9 May 7a, Moscow region, Dubna 141981, Russia

^cRussian Academy of Rocket and Artillery Sciences, 1st Myasnikovskaya ul. 3, bld. 3, Moscow 107564, Russia

^dFederal Agricultural Research Center of the South-East, ul. Tulaykova 7, Saratov 410010, Russia

^eFederal Research Center of Chemical Physics named after N.N. Semenov of the RAS,
ul. Kosygina 4, Moscow 119991, Russia

[#]E-mail: zjraf@mail.ru

^{##}E-mail: kant1958@yandex.ru

An experimental assessment of the effect of activators of oxidative processes on the yield of triticale grain crops was carried out at experimental sites of the Federal Agrarian Scientific Center of the South-East, Saratov. Triticale plants during the growing season were sprayed with an aqueous solution of hydrogen peroxide with a concentration of 5 mmol/l in the presence of oxidative catalysts based on oxygen-containing compounds: 2-butanone, 1-tetralone, cyclohexanone. The effectiveness of the use of all catalysts used in this work is shown. The best results were obtained by double treatment with an aqueous solution of cyclohexanone in hydrogen peroxide with a concentration of 5 mmol/l in a ratio of 1: 300, carried out 4 and 3 weeks before the start of harvesting, which led to an increase in the yield of triticale grain by 176% relative to the control. Hydrogen peroxide is an additional source of oxygen that accelerates metabolism in plants. An even greater activation of metabolic processes in plants occurred in the presence of oxidative catalysts (2-butanone, 1-tetralone, cyclohexanone), due to the formation of highly active oxygen-containing structures in aqueous solutions, which ultimately led to higher yields of cultivated plants, in particular triticale.

Keywords: hydrogen peroxide, triticale, catalyst, yield, grain crop, oxidative processes.