

Веснік

Брэсцкага ўніверсітэта

Рэдакцыйная калегія

галоўны рэдактар
А. М. Сендзер

намеснік галоўнага рэдактара
А. Я. Будзько

адказны рэдактар
Н. С. Ступень

І. В. Абрамава (Беларусь)
А. А. Афонін (Расія)
М. А. Багдасараў (Беларусь)
А. М. Вігчанка (Беларусь)
А. А. Волчак (Беларусь)
В. В. Грыгчык (Беларусь)
А. А. Махнач (Беларусь)
А. В. Мацвееў (Беларусь)
В. А. Несцяроўскі (Украіна)
У. У. Салтанаў (Беларусь)
Я. К. Яловічава (Беларусь)

Пасведчанне аб рэгістрацыі
ў Міністэрстве інфармацыі
Рэспублікі Беларусь
№ 1339 ад 28 красавіка 2010 г.

Адрас рэдакцыі:
224016, г. Брэст,
бульвар Касманаўтаў, 21
тэл.: +375-(162)-21-72-07
e-mail: vesnik@brsu.brest.by

Часопіс «Веснік Брэсцкага
ўніверсітэта» выдаецца
са снежня 1997 года

Серыя 5

БІЯЛОГІЯ

НАВУКІ АБ ЗЯМЛІ

НАВУКОВА-ТЭАРЭТЫЧНЫ ЧАСОПІС

Выходзіць два разы ў год

Заснавальнік – Установа адукацыі
«Брэсцкі дзяржаўны ўніверсітэт імя А. С. Пушкіна»

№ 2 / 2022

У адпаведнасці з Дадаткам да загада
Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь
ад 01.04.2014 № 94 у рэдакцыі загада Вышэйшай атэстацыйнай
камісіі Рэспублікі Беларусь ад 28.01.2022 № 14
(са змяненнямі, унесенымі загадам ВАК ад 20.09.2022 № 363)
часопіс «Веснік Брэсцкага ўніверсітэта.

Серыя 5. Біялогія. Навукі аб зямлі»
ўключаны ў Пералік навуковых выданняў Рэспублікі Беларусь
для апублікавання вынікаў дысертацыйных даследаванняў у 2022 г.
па біялагічных, геаграфічных і геалага-мінэралагічных навуках

◇ ◇ ◇

У адпаведнасці з дагаворам паміж установай адукацыі
«Брэсцкі дзяржаўны ўніверсітэт імя А. С. Пушкіна»
і ТАА «Навуковая электронная бібліятэка» (ліцэнзійны дагавор
№ 457-11/2020 ад 03.11.2020) часопіс «Веснік Брэсцкага ўніверсітэта.
Серыя 5. Біялогія. Навукі аб зямлі»
размяшчаецца на платформе eLIBRARY.RU
і ўключаны ў Расійскі індэкс навуковага цытавання (РІНЦ)

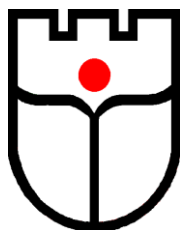
ЗМЕСТ

БІЯЛОГІЯ

Калиниченко С. А., Бондарь Ю. И., Браун Д., Дауделл М., Скипперуд Л., Забродский В. Н., Никитин А. Н. Накопление ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{241}Am в лесных растениях после пожаров в Чернобыльской зоне отчуждения	5
Ковалевич Н. Ф. Видовое разнообразие дрозофилид (Diptera: Drosophilidae) города Бреста и отдельных районов Брестской области	20
Ленивко С. М., Коваленко В. В., Ступень Н. С. Влияние in vitro гидрооксалата-γ-аминопропилсилана (KE-373) на морфогенез различных типов эксплантов пшеницы	29
Машков Е. И., Крищук И. А. Изменчивость морфологических характеристик черепа обыкновенной полевки на территории Беларуси	39
Хомюк Я. В., Артемук Е. Г., Литвиновская Р. П. Влияние эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами на морфометрические и физиолого-биохимические параметры <i>Trifolium pratense</i> L.	52

НАВУКІ АБ ЗЯМЛІ

Красовская И. А., Галкин А. Н., Торбенко А. Б. Геоморфологические особенности особо охраняемых природных территорий местного значения Россонского района Витебской области	63
Павловский А. И., Галкин А. Н., Моляренко В. Л., Андрушко С. В. Инженерно-геоморфологическая оценка экзогенной динамики рельефа Беларуси	72
Писарчук Н. М. Миграция основных лесобразующих пород в муравинское межледниковье на территории Беларуси	85
Сидорович А. А. Региональная миграционная обстановка в Беларуси в разрезе функционально-планировочных районов	98
Шелест Т. А., Полюхович А. Н. Современное состояние болот Белорусского Полесья (на примере Припятского Полесья)	108



Vesnik

of Brest University

Editorial Board

editor-in-chief
A. M. Sender

deputy editor-in-chief
A. Ya. Budzko

managing editor
N. S. Stupen

I. V. Abramava (Belarus)
A. A. Afonin (Russia)
M. A. Bahdasarau (Belarus)
A. M. Vitshanka (Belarus)
A. A. Volchak (Belarus)
V. V. Hrychyk (Belarus)
A. A. Makhnach (Belarus)
A. V. Matsveyeu (Belarus)
V. A. Nestsyaruski (Ukraine)
V. V. Saltanau (Belarus)
Ya. K. Yalovichava (Belarus)

Registration Certificate
by Ministry of Information
of the Republic of Belarus
nr 1339 from April 28, 2010

Editorial Office:
224016, Brest,
21, Kosmonavtov Boulevard
tel.: +375-(162)-21-72-07
e-mail: vesnik@brsu.brest.by

Published since December 1997

Series 5

BIOLOGY

SCIENCES ABOUT EARTH

SCIENTIFIC-THEORETICAL JOURNAL

Issued twice a year

Founder – Educational Establishment
«Brest State A. S. Pushkin University»

№ 2 / 2022

According to the Supplement to the order of Supreme Certification
Commission of the Republic of Belarus from April 01, 2014 nr 94
as revised by the order of Supreme Certification Commission
of the Republic of Belarus from January 28, 2022 nr 14
(with the amendments made by the order of Supreme Certification
Commission from September 20, 2022 nr 363)
the journal «Vesnik of Brest University.

Series 5. Biology. Sciences about earth» has been included
to the List of scientific editions of the Republic of Belarus
for publication of the results of scientific research in 2022
in biological, geographical and geological-mineralogical sciences

◇ ◇ ◇

According to the agreement
between Educational Establishment
«Brest State A. S. Pushkin University» and Pvt Ltd «Scientific Electronic
Library» (licence contract № 457-11/2020 from 03.11.2020)
the journal «Vesnik of Brest University.
Series 5. Biology. Sciences about earth »
is placed on the platform eLIBRARY.RU
and included in the Russian Science Citation Index (RSCI)

CONTENTS

BIOLOGY

Sergey Kalinichenko, Yuri Bondar, Justin Brown, Mark Dowdall, Lindis Skipperud, Vyacheslav Zabrotski, Aleksander Nikitin. Accumulation of ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, and ²⁴¹ Am in Forest Plants after Wildfires in the Chernobyl Exclusion Zone	5
Natalia Kovalevich. Species Variety of <i>Drosophila</i> (Diptera: Drosophilidae) in the City of Brest and Individual Districts of the Brest Region	20
Svetlana Lenivko, Viktor Kavalenka, Nonna Stupen. Effect of in Vitro Hydrooxalate- γ -Aminopropylsilane (KE-373) on the Morphogenesis of Various Types of Wheat Explants	29
Evgeniy Mashkov, Irina Kryshchuk. Variability of Morphological Characteristics of the Skull of a <i>Microtus Arvalis</i> on the Territory of Belarus	39
Yana Khamiuk, Alena Artsiamuk, Raisa Litvinovskaya. The Effect of Epikastasterone and its Conjugates with Acids on the Morphometric, Physiological and Biochemical Parameters of <i>Trifolium pratense</i> L.	52

SCIENCES ABOUT EARTH

Irina Krasovskaya, Alexander Galkin, Andrey Torbenko. Geomorphological Features of Specially Protected Natural Areas of Local Importance Rossonsky District of the Vitebsk Region	63
Alexander Pavlovsky, Alexander Galkin, Vladimir Molyarenko, Svetlana Andrushko. Engineering and Geomorphological Assessment of the Exogenous Dynamics of the Relief of Belarus	72
Natallia Pisarchuk. Migration of the Main Forest-Forming Species in the Muravian Interglaciatio on the Territory of Belarus	85
Alexandr Sidorovich. Regional Migration Situation in Belarus in the Context of Functional-Planning Areas	98
Tatsiana Shelest, Andrei Paliukhovich. Current State of the Swamps of the Belarusian Polesie (by the Example of Pripjat Polesie)	108

УДК 633.111.1:581.143.6

**Светлана Михайловна Ленивко¹, Виктор Викторович Коваленко²,
Нонна Степановна Ступень³**

¹канд. биол. наук, доц., доц. каф. зоологии и генетики
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

²ст. преподаватель каф. химии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

³канд. техн. наук, доц., доц. каф. химии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Svetlana Lenivko¹, Viktor Kavalenka², Nonna Stupen³

¹PhD in Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Zoology and Genetics
of the Brest State A. S. Pushkin University

²Senior Lecturer of the Department of Chemistry of the Brest State A. S. Pushkin University

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry
of the Brest State A. S. Pushkin University

e-mail: zoology@brsu.brest.by

ВЛИЯНИЕ IN VITRO ГИДРООКСАЛАТА- γ -АМИНОПРОПИЛСИЛАНА (KE-373) НА МОРФОГЕНЕЗ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЭКСПЛАНТОВ ПШЕНИЦЫ

Проведенная оценка влияния гидрооксалата- γ -аминопропилсилана на морфогенез в культуре *in vitro* листовых эксплантов, пыльников и незрелых зародышей, изолированных у различных сортов мягкой пшеницы, подтверждает его биологическую активность, установленную с помощью метода проростков. Статистически подтверждено, что индукция морфогенеза в культуре незрелых зародышей детерминируется как генотипом, так и кремнийорганическим компонентом питательной среды. Использование определенных концентраций соединения KE-373 способствует повышению эффективности показателей пыльцевого морфогенеза, индукции процессов каллусообразования и регенерации в культуре незрелых зародышей сортов *Triticum aestivum L.*

Ключевые слова: листовые экспланты, пыльники, незрелые зародыши, *Triticum aestivum L.*

Effect of in Vitro Hydrooxalate- γ -Aminopropylsilane (KE-373) on the Morphogenesis of Various Types of Wheat Explants

The assessment of the effect of hydrooxalate- γ -aminopropylsilane on morphogenesis in *in vitro* culture of leaf explants, anthers, and immature embryos isolated from various varieties of common wheat confirms its biological activity, established using the seedling method. It has been statistically confirmed that the induction of morphogenesis in the culture of immature embryos is determined by both the genotype and the organosilicon component of the nutrient medium. The use of certain concentrations of the KE-373 compound helps to increase the efficiency of pollen morphogenesis indicators, induction of callus formation and regeneration processes in the culture of immature embryos of *Triticum aestivum L.* varieties.

Key words: leaf explants, anthers, immature embryos, *Triticum aestivum L.*

Введение

Широко распространенным способом оценки биологической активности веществ, обладающих стимулирующей активностью, является метод проростков в различных модификациях [1]. Основным достоинством данного метода является экспрессивность: время проведения эксперимента составляет от 3 до 9 дней. Для тестирования по методу проростков семена культуры обрабатывают раствором исследуемого вещества, а затем помещают в термостат для прорастания. По окончании проведенного эксперимента проводят учет выбранного тест-параметра. На основании сравнения величин тест-параметра в контрольном варианте (без обработки) и в варианте с обработкой делают вывод о положительном или негативном действии исследуемого вещества. Дискуссионным моментом при использовании метода проростков является выбор тест-

параметра, поскольку неоднозначным может быть проявление ответных морфофизиологических реакций при прорастании семян на воздействие одной и той же концентрации испытуемого вещества. Наиболее чувствительным количественным параметром является показатель «длина корней проростков». При этом длина корней проростков представляется значимым показателем для определения биологической активности веществ, обладающих ауксиноподобным эффектом: стимулирующих в низких концентрациях развитие корневой системы ювенильных растений и ингибирующих – в высоких. Практически во всех проанализированных работах по фитотестированию различных веществ длина корней служит тест-параметром [2; 3], во многих случаях – в сочетании с высотой колеоптилей проростков [4; 5] или с показателями всхожести [6; 7].

Качественными параметрами оценки биологической активности веществ являются показатели энергии прорастания и всхожести семян. Зачастую эти показатели оказываются менее чувствительными параметрами при фитотестировании веществ [8]. Однако исключение их из тестирования было бы нецелесообразным, поскольку они являются важными характеристиками посевных качеств семян и используются в сельскохозяйственном производстве. Кроме того, в экспериментах по выявлению особенностей регуляторного действия стероидных гликозидов на начальный рост культурных злаков показано, что энергия прорастания и всхожесть семян при обработке этими соединениями изменялись не всегда одинаково, хотя, казалось бы, эти процессы сходны [9].

Регистрация тест-отклика по энергии прорастания и всхожести семян позволила вскрыть причину неоднозначной ответной реакции этих показателей на обработку стероидными гликозидами, связав ее с их эндогенным содержанием и метаболизмом при прорастании [9]. Актуальность проблемы сертификации новых регуляторов роста растений побудила исследователей к комбинации показателей и расчету обобщенного интегрального индекса фитоактивности, отражающего энергию прорастания, длину корня и высоту проростков семян, который позволил достаточно надежно оценить стимулирующий эффект гуминовых препаратов [10]. В проводимых нами исследованиях решалась задача комплексной оценки новых синтезированных соединений с потенциальной биологической активностью как с использованием традиционных методов тестирования качественных и количественных показателей прорастания семян в лабораторных условиях, так и с включением методов культивирования изолированных эксплантов в условиях *in vitro*.

Материал и методы исследования

Изученный нами гидрооксалат- γ -аминопропилсилан (в дальнейшем – KE-373) синтезирован под руководством профессора Н.П. Ярчака, которому авторы выражают искреннюю благодарность за многолетнее плодотворное сотрудничество. Соединение KE-373 представляет значительный интерес благодаря наличию в его молекуле гетероциклических систем тиофена [11] и N-метил-N'-пиперазина [12], оно обладает специфическими электронными эффектами, способными придать ему полезные свойства.

На примере шести сортов и двух дигиплоидных линий мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) ранее нами было показано, что концентрации 10^{-5} и 10^{-6} М KE-373 проявляют биологическую активность по показателям «энергия прорастания семян» и «всхожесть», увеличивая их значения соответственно от 1 до 15 % и от 1 до 11 % по сравнению с контролем в зависимости от варианта опыта. Соединение KE-373 в наибольшей испытанной концентрации (10^{-4} М) устойчиво снижало значения по данным показателям по сравнению с контролем. Концентрации 10^{-5} и 10^{-6} М соединения KE-373 способствовали росту первичных органов у испытанных сортов пшеницы в большинстве вариантов опыта [13]. Следует отметить, что концентрация 10^{-5} М KE-373 наибольшее влияние оказала на сорт Мунк, у которого отмечено превышение средне-

го значения длины корней на 26 %, а эпикотилей – на 21 % по сравнению с контролем. Наибольший стимулирующий эффект концентрации 10^{-6} М выявлен в отношении роста зародышевых корешков у сортов Легенда, Мунк и Дарья (на 10, 12 и 13 % соответственно), а в отношении эпикотилей – у сорта Мунк на 12 %. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о стимулирующем действии соединения КЕ-373 на процессы прорастания семян пшеницы, что определило перспективность дальнейшего тестирования КЕ-373 по выявлению способности влиять на морфогенетические процессы в культуре листовых эксплантов, пыльников и незрелых зародышей.

Материалом для исследований послужили районированные в Республике Беларусь сорта мягкой пшеницы с озимым типом развития – Легенда (Беларусь), Центос (Германия), Богатка (Польша), а также сорта Дарья (Беларусь), Мунк (Германия), Банти (Польша) и дигаплоидная линия Dh 65-32 с яровым типом развития.

За основу для введения в культуру *in vitro* листовых эксплантов пшеницы был взят метод, описанный Л. С. Сидор и П. А. Орловым [14]. Культивирование *in vitro* пыльников пшеницы проведено по общепринятому методу, предложенному В. Ю. Горбуновой и Н. Н. Кругловой [15]. Метод культуры *in vitro* незрелых зародышей проведен по отобраным оптимальным стадиям на основе анализа данных литературы [16]. Культивирование листовых эксплантов и незрелых зародышей проводили на питательной среде MS (Murashige and Skoog, 1962), пыльников – С-17 (Wang and Chen, 1986), которые были дополнены различными концентрациями соединения КЕ-373.

Статистическую обработку полученных результатов проводили согласно общепринятым методам биологической статистики с использованием программы Excel. Достоверность значимости различий между данными варианта опыта и контроля определяли по t-критерию Стьюдента. Дисперсионный анализ применяли для комплексной оценки полученных средних значений по вариантам опыта, установления значимости и доли влияния факторов на их изменчивость.

Результаты исследования и их обсуждение

В первой серии экспериментов в качестве эксплантов использованы базальные участки листовых пластинок 3–5-дневных проростков семян мягкой пшеницы сортов Центос и Легенда с высокой способностью к индукции и пролиферации каллуса. Оценку отзывчивости листовых эксплантов двух сортов озимой мягкой пшеницы на введение в состав питательной среды MS соединения КЕ-373 в определенных концентрациях проводили на 30-й день. Культивирование листовых эксплантов двух сортов Центос и Легенда озимой мягкой пшеницы на дополненных питательных средах MS показало, что зависимость частоты каллусообразования от концентрации соединения КЕ-373 (таблица 1) носила нелинейный характер.

Таблица 1. – Влияние соединения КЕ-373 на частоту каллусообразования в культуре листовых эксплантов двух сортов мягкой пшеницы, %

Генотип	Концентрации, М					
	10^{-4}		10^{-5}		10^{-6}	
	частота	+/- к контролю	частота	+/- к контролю	частота	+/- к контролю
Центос	73,3 ± 5,71	-5	82,9 ± 4,5	+4,5	71,7 ± 5,82	-6,7
Легенда	63,3 ± 6,22	-21,7*	85,7 ± 4,2	+0,7	72,9 ± 5,31	-12,1*

Примечание – * – достоверно по отношению к контролю при $P \leq 0,05$.

Превышение данных контроля наблюдалось только в одном варианте опыта – при культивировании листовых эксплантов двух сортов на питательной среде с добавлением силильного соединения КЕ-373 в концентрации 10^{-5} М. Частота формирования каллусов в этом варианте опыта у сорта Центос на 4,5 % выше по сравнению с контролем. Значительное снижение оцениваемого показателя наблюдалось при культивировании листовых эксплантов сорта Легенда на питательной среде MS, содержащей соединение КЕ-373 в концентрациях 10^{-4} и 10^{-6} М. Несмотря на отмеченные различия в реакции листовых эксплантов сортов Центос и Легенда на испытанные мольные концентрации соединения КЕ-373, проведенный двухфакторный дисперсионный анализ не показал существенного влияния ни генотипа, ни концентрации на частоту каллусообразования. Таким образом, слабое положительное действие соединения КЕ-373 в концентрации 10^{-5} М можно рассматривать лишь как тенденцию к стимуляции образования каллусов в культуре листовых эксплантов.

Во второй серии экспериментов в качестве эксплантов использованы пыльники трех сортов мягкой пшеницы. Поскольку при андрогенезе *in vitro* возможны два пути морфогенеза: у яровых сортов пшеницы инициальные клетки пыльников развиваются по пути эмбриогенеза, а у озимых – по пути гемморизогенеза [Орлов], то морфогенетические процессы в культуре пыльников различных генотипов пшеницы оценивали по частоте отзывчивых пыльников, по общей частоте новообразований, по частоте образования эмбриоидов (зародышеподобных структур), по частоте формирования морфогенных каллусов, которые при переносе на среду, иницирующую органогенез, образуют почки и корни. Все показатели рассчитывали на 100 инокулированных пыльников. Результаты влияния малых мольных концентраций соединения КЕ-373 на параметры пыльцевого морфогенеза *in vitro* представлены в таблицах 2–4.

Таблица 2. – Влияние соединения КЕ-373 на пыльцевой морфогенез сорта Центос, %

Параметры пыльцевого морфогенеза	Контроль	Концентрация, М			
		10^{-5}	+/- к контролю	10^{-6}	+/- к контролю
Частота отзывчивых пыльников	1,05 ± 0,33	1,27	+0,22	1,08	+0,03
Частота новообразований	1,06 ± 0,46	2,97*	+1,91	4,30*	+3,24
Частота эмбриоидов	0,32 ± 0,18	0,85	+0,53	1,72	+1,40
Частота морфогенных каллусов	0,74 ± 0,28	2,12	+1,38	2,58	+1,84

Примечание – * – достоверно по отношению к контролю при $P \leq 0,05$.

Таблица 3. – Влияние соединения КЕ-373 на пыльцевой морфогенез сорта Легенда, %

Параметры пыльцевого морфогенеза	Контроль	Концентрация, М			
		10^{-5}	+/- к контролю	10^{-6}	+/- к контролю
Частота отзывчивых пыльников	1,78 ± 0,47	0,22	-1,56	0,43	-1,35
Частота новообразований	1,78 ± 0,47	1,57	-0,21	2,59	+0,81
Частота эмбриоидов	0	0,67	+0,67	1,15	+1,15
Частота морфогенных каллусов	1,78 ± 0,47	0,90	-0,88	1,44	-0,34

Таблица 4. – Влияние соединения КЕ-373 на пыльцевой морфогенез сорта Банти, %

Параметры пыльцевого морфогенеза	Контроль	Концентрация, М					
		10^{-5}	+/- к контролю	10^{-6}	+/- к контролю	10^{-7}	+/- к контролю
Частота отзывчивых пыльников	15,70 ± 3,31	12,57	-3,13	18,71	+3,01	23,02	+7,32
Частота новообразований	22,31 ± 5,32	16,0	-6,31	36,13*	+13,82	38,85**	+16,54

Окончание таблицы 4

Частота эмбриоидов	18,18 ± 3,51	13,71	-4,47	32,26 [*]	+14,08	34,53 ^{**}	+16,35
Частота морфогенных каллусов	4,13 ± 1,81	2,29	-1,84	3,87	-0,26	4,32	+0,19

Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,05$; ** – достоверно при $P \leq 0,01$.

Добавление в питательную среду соединения КЕ-373 способствовало статистически достоверному увеличению числа новообразований у озимого сорта Центос во всех вариантах опыта. При этом наибольшее превышение данных контроля (на 3,24 %) наблюдалось при использовании концентрации 10^{-6} М. Формирование новообразований у сорта Центос происходило преимущественно за счет образования морфогенных каллусов. Влияние соединения КЕ-373 на выход отзывчивых пыльников сорта Центос оказалось незначительным.

Использование соединения КЕ-373 стимулировало пыльцевой эмбриогенез, хотя и незначительно, у сорта Легенда с озимым типом развития. При этом отмечено небольшое снижение по частоте отзывчивых пыльников и морфогенных каллусов.

Реакция ярового сорта Банти на добавление в питательную среду соединения КЕ-373 была различной. Снижение концентрации КЕ-373 приводило к увеличению отзывчивости пыльников и формированию новообразований. Превышение данных контроля в наименьшей из исследованных концентраций соединения КЕ-373 составило 7,32 % по первому показателю и 16,54 % по второму показателю. Стимулирующий эффект по исследуемым показателям установлен у данного генотипа и в отношении концентрации 10^{-6} М. Превышение данных контроля составило 3,01 и 13,82 % соответственно. Таким образом, полученные результаты позволили установить положительное достоверное влияние концентраций 10^{-6} и 10^{-7} М соединения КЕ-373 на пыльцевой эмбриогенез у сорта Банти.

В третьей серии экспериментов в качестве эксплантов использованы незрелые зародыши шести сортов и одной дигампоидной линии мягкой пшеницы. Анализ данных по исследованию стимулирующей активности соединения КЕ-373 на частоту каллусообразования (%) в культуре *in vitro* незрелых зародышей различных генотипов мягкой пшеницы по сравнению с контролем (таблица 5) показал, что в ряду концентраций от 10^{-5} до 10^{-7} М происходит снижение ответных реакций у яровых форм пшеницы.

Таблица 5. – Влияние соединения КЕ-373 на частоту каллусообразования в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы, %

Генотип	Концентрации, М					
	10^{-5}		10^{-6}		10^{-7}	
	частота	+/- к контролю	частота	+/- к контролю	частота	+/- к контролю
Богатка	92,0 ± 2,27	+8,7 [*]	98,8 ± 1,24	+15,5 [*]	89,0 ± 3,53	+5,7
Центос	99,0 ± 1,20	+1,1	100,0 ± 0	+2,1	95,0 ± 3,06	-2,9
Легенда	91,0 ± 3,19	+7,0	92,5 ± 2,54	+8,5 [*]	80,0 ± 4,47	-4,0
Дарья	98,0 ± 1,35	+8,0 [*]	95,0 ± 2,44	+5,0	92,5 ± 4,16	+2,5
Банти	96,7 ± 1,56	+9,4 [*]	91,3 ± 3,15	+4,0	88,8 ± 3,53	+1,5
Мунк	91,7 ± 3,57	+6,7	82,2 ± 5,70	+2,8	86,7 ± 5,07	-1,7
Dh 65-32	100,0 ± 0	0	100,0 ± 0	0	90,0 ± 6,71	-10,0

Примечание – * – достоверно по отношению к контролю при $P \leq 0,05$.

Реакция генотипов озимых сортов пшеницы несколько отличалась от реакции яровых сортов и дигиплоидной линии. Так, при добавлении в питательную среду соединения КЕ-373 в концентрации 10^{-6} у всех озимых сортов наблюдалось наибольшее образование каллусов по сравнению с контролем.

Достоверное увеличение частоты каллусообразования в среднем на 9 % наблюдалось у сортов Богатка, Дарья и Банти под влиянием КЕ-373 в концентрации 10^{-5} М. Концентрация 10^{-6} М соединения КЕ-373 способствовала значительному повышению этого показателя на 16 и 9 % у сортов Богатка и Легенда. Реакция сортов мягкой пшеницы на добавление в питательную среду соединения КЕ-373 в концентрации 10^{-7} М оказалась различной.

Как показали полученные результаты, применение соединения КЕ-373 в концентрациях 10^{-5} и 10^{-6} М способствует индукции каллусообразования в культуре незрелых зародышей, при этом для озимых сортов наиболее благоприятной является концентрация 10^{-6} М, а для яровых – 10^{-5} М.

Для статистического выяснения закономерностей изменчивости частоты каллусообразования в культуре незрелых зародышей шести сортов мягкой пшеницы в системе «концентрация – сорт» проведен двухфакторный дисперсионный анализ, результаты которого представлены в таблице 6. Не были включены в дисперсионный анализ данные, полученные по дигиплоидной линии Dh 65-32, поскольку на фоне ее высокой генетически обусловленной способности к каллусогенезу действие соединения КЕ-373 не могло быть выявлено в полной мере.

Таблица 6. – Двухфакторный дисперсионный анализ изменчивости частоты каллусообразования в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы в зависимости от генотипа сорта и концентрации соединения КЕ-373

Источник вариации	SS	df	MS	F	F ₀₅	Доля влияния фактора, %
Сорт	273,73	5	54,75	4,24	3,33	52,25
Концентрация	120,85	2	60,42	4,67	4,10	23,07
Случайные отклонения	129,27	10	12,93			24,68
Общее	523,84	17				

Результаты проведенного двухфакторного дисперсионного анализа подтвердили наличие достоверных различий при $P \leq 0,05$ по частоте каллусообразования в культуре незрелых зародышей между включенными в эксперимент сортами мягкой пшеницы с яровым и озимым типом развития. Достоверным оказалось и влияние различных концентраций соединения КЕ-373 при $P \leq 0,05$. Оценка относительной роли сорта и концентрации соединения КЕ-373 в изменчивости частоты каллусообразования в культуре незрелых зародышей показала, что в большей степени она зависит от генотипа сорта. Доля влияния генотипа в варьировании данного показателя составила 52 %.

Поскольку результативность использования методов культивирования различных типов эксплантов зависит от успешной регенерации растений в условиях *in vitro*, в четвертой серии экспериментов исследовалась возможность влияния соединения КЕ-373 на регенерационный процесс у каллусов, полученных в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы, поскольку только этот тип эксплантов оказался наиболее эффективным и позволил получить необходимое для статистического анализа число каллусов на предыдущем этапе исследования. Частоту регенерации определяли по количеству каллусов с появившимися побегами от общего числа каллусов, высаженных на среду для регенерации (не менее 50 штук в варианте опыта). Результаты влияния со-

единения KE-373 на частоту регенерации в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы представлены в таблице 7.

Таблица 7. – Влияние соединения KE-373 на частоту регенерации в культуре незрелых зародышей яровых сортов мягкой пшеницы, %

Сорт	Контроль	Концентрация, М					
		10^{-5}		10^{-6}		10^{-7}	
		частота	+/- к контролю	частота	+/- к контролю	частота	+/- к контролю
Богатка	26,8 ± 5,92	24,1 ± 5,12	-2,7	36,3 ± 4,91	+9,5	45,6 ± 6,79	+18,8*
Центос	12,7 ± 3,74	12,0 ± 3,68	-0,7	16,3 ± 3,36	+3,6	26,9 ± 4,91	+14,2*
Легенда	6,7 ± 3,72	19,1 ± 4,02	+12,4*	20,7 ± 4,36	+14,0*	25,0 ± 3,36	+18,3*
Дарья	25,5 ± 5,87	24,0 ± 5,06	-1,5	29,1 ± 4,76	+3,6	26,8 ± 6,41	+1,3
Банги	32,5 ± 6,50	26,1 ± 5,32	-6,4	37,6 ± 6,60	+5,1	33,3 ± 3,72	+0,8
Мунк	33,5 ± 6,25	28,6 ± 5,40	-4,9	59,6 ± 6,80	+26,1*	54,2 ± 6,80	+20,7*

Примечание – * – достоверно по отношению к контролю при $P \leq 0,05$.

Количество полученных растений-регенерантов из каллусов, культивированных на среде MS, дополненной соединением KE-373 в концентрации 10^{-5} М, было меньше, чем в контрольном варианте у всех исследованных сортов, кроме сорта Легенда. У этого сорта наблюдалось достоверное превышение количества полученных растений-регенерантов во всех исследованных вариантах. Следует отметить, что сорт Легенда характеризовался низкой регенерационной способностью: частота регенерации в контроле составила всего 6,7 %.

Снижение концентрации соединения KE-373 способствовало повышению частоты регенерации у озимых сортов Богатка и Центос, а также ярового сорта Мунк. Яровые сорта Дарья и Банги оказались в меньшей степени чувствительными к присутствию соединения KE-373 в концентрациях 10^{-6} и 10^{-7} М. Индукция процессов регенерации в этих вариантах опыта мало отличалась от данных, полученных в контроле.

Двухфакторный дисперсионный анализ изменчивости частоты регенерации в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы в зависимости от генотипа сорта и концентрации соединения KE-373 (таблица 8) выявил достоверное влияние двух факторов. При этом доля влияния генотипа сорта составила 63 %, а концентрация – 22 %.

Таблица 8. – Двухфакторный дисперсионный анализ изменчивости частоты регенерации в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы в зависимости от генотипа сорта и концентрации соединения KE-373

Источник вариации	SS	df	MS	F	F ₀₅	Доля влияния, %
Сорт	1 664,72	5	332,94	8,07	3,33	62,52
Концентрация	585,21	2	292,60	7,09	4,10	21,98
Случайные отклонения	412,64	10	41,26			15,50
Общее	2 662,57	17				

Заключение

Проведенное обобщение полученных результатов по оценке влияния соединения KE-373 на морфогенез в культуре *in vitro* листовых эксплантов, пыльников и незрелых зародышей, изолированных у различных сортов мягкой пшеницы, подтверждает его биологическую активность, установленную с помощью метода проростков [13]. Так, соединение KE-373 в концентрации 10^{-6} М способствовало достоверному повышению

числа новообразований в культуре пыльников у сорта Центос с озимым типом развития преимущественно за счет формирования морфогенных каллусов, а у сорта Банти с яровым типом развития – за счет увеличения числа эмбриоидов. Незначительное положительное влияние концентрации 10^{-6} М на пыльцевой эмбриогенез показано и у озимого сорта Легенда. Обнаружено повышение эффективности показателей пыльцевого морфогенеза при снижении концентрации соединения КЕ-373 до 10^{-7} М на примере сорта Банти, что указывает на перспективность продолжения исследований в этом направлении.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа данных изменчивости частоты каллусообразования и регенерации в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы в зависимости от сорта и концентрации соединения КЕ-373 в составе питательной среды MS показали, что доля влияния фактора «сорт» составляет 52 и 63 % соответственно. Достоверно установлено, что индукция процессов каллусообразования и регенерации в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы детерминируется и концентрацией кремнийорганического компонента среды. Доли влияния фактора «концентрация» в изменчивости частоты каллусообразования и регенерации составила 23 и 22 %. Таким образом, полученные данные согласуются с мнением о том, что генотипическая специфичность исходного материала является наиболее выраженным фактором, определяющим эффективность индукции процессов каллусообразования и регенерации в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы. В то же время статистически подтвержденные результаты влияния концентраций соединения КЕ-373 на формирование первичного каллуса и развитие растений-регенерантов в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы свидетельствуют о возможности его использования для повышения индукции процессов каллусообразования и регенерации в культуре незрелых зародышей сортов *Triticum aestivum* L.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минеев, В. Г. Биотест для определения экологических последствий применения химических средств защиты растений / В. Г. Минеев, Е. Х. Ремпе, Л. П. Воронина // Докл. РАСХН. – 1992. – № 3. – С. 5–9.
2. Baran, A. Testing toxicity of oily grounds using phytotoxkit tests / A. Baran, C. Jasiewicz, J. Antonkiewicz // The First Joint PSE-SETAC Conference on Ecotoxicology. Book of Abstracts. – Poland, 2009. – P. 17.
3. Michaud, A. Copper phytotoxicity affects root elongation and iron nutrition in durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) / A. Michaud, C. Chappelaz, P. Hinsinger // Plant and Soil. – 2008. – Vol. 310, nr 1–2. – P. 151–165.
4. Gorsuch, J. Comparative toxicities of six heavy metals using root elongation and shoot growth in three plant species / J. Gorsuch, R. Merrilee, E. Anderson // Environ. Toxicol. Risk Asses. – 1995. – Vol. 3. – P. 377–391.
5. Boluda, R. Soil plate bioassay: An effective method to determine ecotoxicological risks / R. Boluda, L. Roca-Perez, L. Marimyn // Chemosphere. – 2011. – Vol. 84, nr 1. – P. 1–8.
6. Validation of germination rate and root elongation as indicator to assess phytotoxicity with *Cucumis sativus* / X. Wang [et al.] // Chemosphere. – 2001. – Vol. 44, nr 8. – P. 1711–1721.
7. Persoone, G. Recent new microbiotests for cost-effective toxicity monitoring: the Rapidtoxkit and the Phytotoxkit / G. Persoone // Book of Abstr. of 12th Inter. Symp. On Toxicity Assessment. – 2005. – P. 112.

8. Экотоксикологическая оценка повышенного содержания фосфора в почвогрунте по тест-реакциям растений на разных стадиях развития / В. А. Терехова [и др.] // Проблемы агрохимии и экологии. – 2009. – № 3. – С. 21–26.
9. Шуканов, В. П. Гормональная активность стероидных гликозидов растений / В. П. Шуканов, А. П. Вольнец, С. Н. Полянская. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 244 с.
10. Воронина, Л. П. Оценка биологической активности промышленных гуминовых препаратов / Л. П. Воронина, О. С. Якименко, В. А. Терехова // Агрохимия. – 2012. – № 6. – С. 50–57.
11. Ерчак, Н. Хлорметилтри(тиофен-2-ил)силан: анализ строения молекулы / Н. Ерчак, М. Зеленка, С. Беляков // Химия гетероцикл. соединений. – 2012. – № 2. – С. 401–403.
12. Гидрооксалат метилбис(фенилметил)-γ-пиперидинопропилсилана / Н. П. Ерчак [и др.] // Журн. общей химии. – 2008. – Т. 78, вып. 9. – С. 1580–1581.
13. Новый подход по оптимизации питательных сред для культивирования эксплантов пшеницы (*Triticum aestivum* L.) / С. М. Ленивко [и др.] // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2011. – № 2. – С. 48–52.
14. Сидор, Л. С. Процессы морфогенеза в культуре листовых эксплантов некоторых видов пшеницы (*Triticum*) / Л. С. Сидор, П. А. Орлов // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2002. – № 4. – С. 29–32.
15. Горбунова, В. Ю. Методические аспекты культивирования изолированных пыльников пшеницы / В. Ю. Горбунова, Н. Н. Круглова. – Уфа : БНЦ УрО АН СССР, 1988. – 20 с.
16. Ленивко, С. М. Технология введения в культуру и методы культивирования клеток, тканей, органов растений на примере пшеницы : метод. рекомендации / С. М. Ленивко. – Брест : БрГУ, 2013. – 46 с.

REFERENCES

1. Miniejev, V. G. Biotest dlia opriedielienija ekologichieskikh posledstvij primienienija khimichieskikh sriedstv zashchity rastienij / V. G. Miniejev, E. Kh. Rempe, L. P. Voronina // Dokl. RASKhN. – 1992. – № 3. – S. 5–9.
2. Baran, A. Testing toxicity of oily grounds using phytotoxkit tests / A. Baran, C. Jasiewicz, J. Antonkiewicz // The First Joing PSE-SETAC Conference on Ecotoxicology. Book of Abstracts. – Poland, 2009. – P. 17.
3. Michaud, A. Copper phytotoxicity affects root elongation and iron nutrition in durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) / A. Michaud, C. Chappelaz, P. Hinsinger // Plant and Soil. – 2008. – Vol. 310, nr 1–2. – P. 151–165.
4. Gorsuch, J. Comparative toxicities of six heavy metals using root elongation and shoot growth in three plant species / J. Gorsuch, R. Merrilee, E. Anderson // Environ. Toxicol. Risk Asses. – 1995. – Vol. 3. – P. 377–391.
5. Boluda, R. Soil plate bioassay: An effective method to determine ecotoxicological risks / R. Boluda, L. Roca-Perez, L. Marimyn // Chemosphere. – 2011. – Vol. 84, nr 1. – P. 1–8.
6. Validstion of germination rate and root elongation as indicator to assess phytotoxicity with *Cucumis sativus* / X. Wang [et al.] // Chemosphere. – 2001. – Vol. 44, nr 8. – P. 1711–1721.
7. Persoone, G. Recent new microbiotests for cost-effective toxicity monitoring: the Rapidtoxkit and the Phytotoxkit / G. Persoone // Book of Abstr. of 12th Inter. Symp. On Toxicity Assessment. – 2005. – P. 112.

8. Ekotoksikologichieskaja ocenka povyshennogo sodierzhaniya fosfora v pochvogruntie po test-reakcijam rastienij na raznykh stadijakh razvitija / V. A. Tieriekhova [i dr.] // Problemy agrokhimii i ekologii. – 2009. – № 3. – С. 21–26.
9. Shukanov, V. P. Gormonal'naja aktivnost' stieroidnykh glikozidov rastienij / V. P. Shukanov, A. P. Volyniec, S. N. Polianskaja. – Minsk : Bielarus. navuka, 2012. – 244 s.
10. Voronina, L. P. Ocenka biologichieskoj aktivnosti promyshliennykh guminovykh preparatov / L. P. Voronina, O. S. Yakimienko, V. A. Tieriekhova // Agrokhimija. – 2012. – № 6. – S. 50–57.
11. Yerchak, N. Khlormietiltri(tiofien-2-il)silan: analiz strojenija moliekuly / N. Yerchak, M. Zielionka, S. Beliakov // Khimija gieterocykl. sojedinenij. – 2012. – № 2. – С. 401–403.
12. Hidroksalat mietilbis(fienilmietil)- γ -pipieridinopropilsilana / N. P. Yerchak [i dr.] // Zhurn. obshchiej khimii. – 2008. – Т. 78, vyp. 9. – S. 1580–1581.
13. Novyj podkhod po optimizacii pitatiel'nykh sried dlia kul'tivirovanija eksplantov pshenicy (*Triticum aestivum* L.) / S. M. Lienivko [i dr.] // Viesn. Bresc. un-ta. Ser. 5, Khimija. Bijalohija. Navuki ab ziamli. – 2011. – № 2. – S. 48–52.
14. Sidor, L. S. Processy morfogeneza v kul'turie listovykh eksplantov niekatorykh vidov pshenicy (*Triticum*) / L. S. Sidor, P. A. Orlov // Vies. Nac. akad. nauk Bielarusi. Ser. bijal. navuk. – 2002. – № 4. – S. 29–32.
15. Gorbunova, V. Yu. Mietodichieskije aspiekty kul'tivirovanija izolirovannykh pyl'nikov pshenicy / V. Yu. Gorbunova, N. N. Kruglova. – Ufa : BNC UrO AN SSSR, 1988. – 20 s.
16. Lienivko, S. M. Tiekhnologija vviedienija v kul'turu i mietody kul'tivirovanija klietok, tkaniej, organov rastienij na primierie pshenicy : mietod. riekomiendacii / S. M. Lienivko. – Brest : BrGU, 2013. – 46 s.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 22.09.2022