

УДК 577.175.1: 57.085

**Виктор Викторович Коваленко¹, Светлана Михайловна Ленивко²,
Нонна Степановна Ступень³**

¹ст. преподаватель каф. зоологии, генетики и химии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

²канд. биол. наук, доц., доц. каф. зоологии, генетики и химии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

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

Viktar Kavalenka¹, Svetlana Lenivko², Nonna Stupen³

¹Senior lecturer of the Department of Zoology, Genetics and Chemistry
of Brest State A. S. Pushkin University

²Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Zoology, Genetics and Chemistry
of Brest State A. S. Pushkin University

³Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Zoology, Genetics and Chemistry
of Brest State A. S. Pushkin University

e-mail: kvv0407@rambler.ru

РОСТРЕГУЛИРУЮЩАЯ И ПРОТЕКТОРНАЯ АКТИВНОСТЬ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ KE-373 НА КУЛЬТУРЕ РЖИ ПОСЕВНОЙ (*SECALE CEREALE* L.)

По комплексу показателей роста и развития растений исследована рострегулирующая и протекторная активность кремнийорганического соединения KE-373 на культуре ржи посевной. Установлен статистически достоверный стимулирующий эффект соединения KE-373 в отношении показателей энергии прорастания, всхожести, длины корня и количества корней. Зафиксирован больший стимулирующий эффект на растениях, подвергшихся действию низких температур.

Ключевые слова: кремнийорганические соединения, рожь посевная, энергия прорастания, всхожесть, длина корня, количество корней, длина побега.

Growth-Regulating and Protective Activity of Organosilicon Compound KE-373 on Rye (*Secale Cereale* L.)

According to the complex of plant growth and development indicators, the growth-regulating and protective activity of the organosilicon compound KE-373 on a crop of rye was studied. A statistically significant stimulating effect of the compound KE-373 was established in relation to the indicators of germination energy, germination, root length and number of roots. A greater stimulating effect was recorded on plants exposed to low temperatures.

Key words: organosilicon compounds, rye, germination energy, germination, root length, number of roots, shoot length.

Введение

Кремнийорганические соединения, принадлежащие к гидрооксалатам γ -аминопропилсиланов, впервые получены на кафедре химии БрГУ имени А. С. Пушкина под руководством профессора Н. П. Ерчака. Данные соединения являются веществами, проявляющими стимулирующий эффект в отношении показателей роста и развития растений [1]. Так, гидрооксалаты γ -аминопропилсиланов проявляют рострегулирующую активность в отношении ряда сельскохозяйственных культур: люпина узколистного, гороха посевного, пшеницы мягкой, редиса.

Отметим, что биологическое действие гидрооксалатов γ -аминопропилсиланов не ограничивается только регуляцией роста растений. Эти соединения оказывают влияние

на антиоксидантную защиту растений и могут выступать в качестве регуляторов роста растений, подвергнутых токсическому действию ионов свинца [2], обладают протекторной активностью в отношении содержания нитратов в корнеплодах редиса [3], способствуют индукции процессов каллусообразования и эмбриодогенеза у сортов пшеницы [4]. Предложен подход по оптимизации питательных сред для культивирования эксплантов пшеницы, включающий применение гидрооксалатов γ -аминопропилсиланов [5].

Важность соединений кремния для растений подтверждает тот факт, что растения способны к перераспределению кремния и обладают механизмом, обеспечивающим его концентрирование в органах и тканях, подверженных стрессу. Отмечается, что оптимизация кремниевого питания растений способствует увеличению жизнеспособности растений [6]. Приемами повышения урожайности растений, качества продукции, защиты растений от болезней, полегания, неблагоприятных факторов внешней среды является не только корневое поступление кремния в растения, но и питание через лист, а также предпосевная обработка семян [7].

На предыдущем этапе исследования статистически подтверждено, что индукция морфогенеза в культуре незрелых зародышей *Triticum aestivum* L. детерминируется как генотипом, так и кремнийорганическим компонентом питательной среды.

Соединение КЕ-373 в концентрации 10^{-6} М способствует 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. Положительное влияние концентрации 10^{-6} М на пыльцевой эмбриодогенез показано и у озимого сорта Легенда. Повышение эффективности показателей пыльцевого морфогенеза при снижении концентрации соединения КЕ-373 до 10^{-7} М обнаружено на примере сорта Банти. Таким образом, использование определенных концентраций соединения КЕ-373 способствует повышению эффективности показателей пыльцевого морфогенеза, индукции процессов каллусообразования и регенерации в культуре незрелых зародышей сортов мягкой пшеницы [8].

В проводимых биоиспытаниях важным фактором является увеличение тест-объектов, поскольку физиологические эффекты, вызываемые химическими соединениями, могут определяться не только видовыми, но и сортовыми особенностями растений.

Цель настоящей работы – оценка рострегулирующей и протекторной активности соединения КЕ-373 на культуре ржи посевной (*Secale cereale* L.).

Материал и методы исследования

В первой серии эксперимента изучена рострегулирующая активность соединения КЕ-373 в отношении растений ржи посевной в условиях оптимального температурного режима. Эксперимент проводился в трехкратной повторности по 100 семян в каждой повторности. Семена замачивались в дистиллированной воде (контроль) либо в 10^{-7} М растворе соединения КЕ-373 (опыт) в течение 5 часов. Проращивание семян осуществлялось между слоями фильтровальной бумаги в соответствии с ГОСТ [9] при постоянной температуре в темноте в термостате.

На третьи сутки определялась энергия прорастания. На седьмые сутки определялись всхожесть семян, а также количество корней, длина самого длинного корня и длина побега проростков.

Во второй серии эксперимента семена подвергались действию низких температур. Для этой цели семена после предпосевной обработки выдерживали сутки в холодильнике при температуре 2 °С, после чего их переносили в термостат и проращивали, как и в первой серии эксперимента.

Статистическую обработку результатов проводили в соответствии с общепринятыми методиками биологической статистики согласно П. Ф. Рокицкому [10] с использованием программы Microsoft Excel. Установление достоверности различий от контроля проводили нахождением t-критерия Стьюдента.

Результаты исследования и их обсуждение

Данные, полученные в ходе лабораторного эксперимента по изучению влияния кремнийорганического соединения КЕ-373 на растения ржи посевной в условиях оптимального температурного режима, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной в условиях оптимального температурного режима

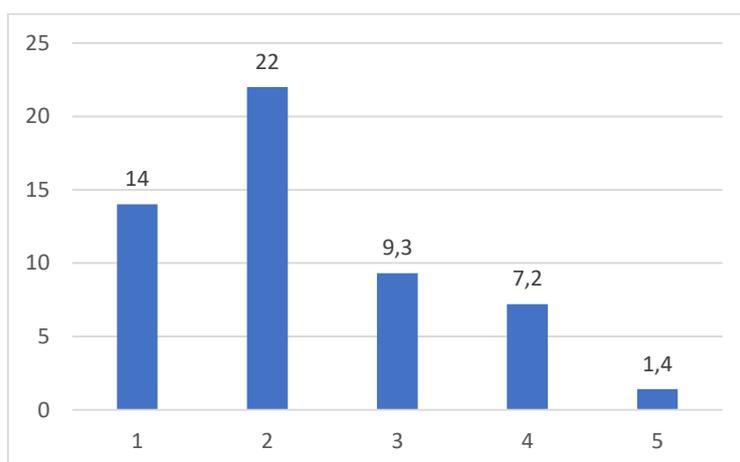
Вариант опыта	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Длина корня, см	Количество корней, шт	Длина побега, см
Контроль	68 ± 2,69	72 ± 2,59	8,47 ± 0,36	5,44 ± 0,11	8,99 ± 0,35
Опыт	82 ± 2,22**	94 ± 1,37**	9,26 ± 0,34	5,83 ± 0,16*	9,12 ± 0,35

Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,05$; ** – при $P \leq 0,001$

На основании приведенных в таблице 1 данных, следует отметить значительное влияние изучаемого соединения на начальные этапы роста ржи посевной, что выражается в увеличении энергии прорастания и всхожести. Нами зафиксировано статистически достоверное увеличение энергии прорастания на 14 %, всхожести – на 22 % по сравнению с контролем.

Увеличение показателя длины корня в опытном варианте эксперимента составляет 9,3 % по сравнению с контрольным вариантом, увеличение количества корней – 7,2 %, увеличение длины побега – 1,4 %.

Таким образом, под действием соединения КЕ-373 происходит увеличение всех изучаемых показателей роста ржи посевной по сравнению с контролем (рисунок 1). Статистически достоверным является стимулирующий эффект соединения КЕ-373 на энергию прорастания, всхожесть семян и количество корней.



1 – энергия прорастания; 2 – всхожесть; 3 – длина корня;
4 – количество корней; 5 – длина побега

Рисунок 1 – Влияние соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной в условиях оптимального температурного режима, % относительно контроля

Данные, полученные в ходе эксперимента по изучению влияния соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной в условиях температурного стресса, вызванного действием низких температур, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной в условиях температурного стресса

Вариант опыта	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Длина корня, см	Количество корней, шт	Длина побега, см
Контроль	36 ± 2,77	46 ± 2,88	7,04 ± 0,32	5,65 ± 0,17	7,84 ± 0,32
Опыт	70 ± 2,65*	86 ± 2,88*	9,02 ± 0,24*	5,90 ± 0,11	8,38 ± 0,22

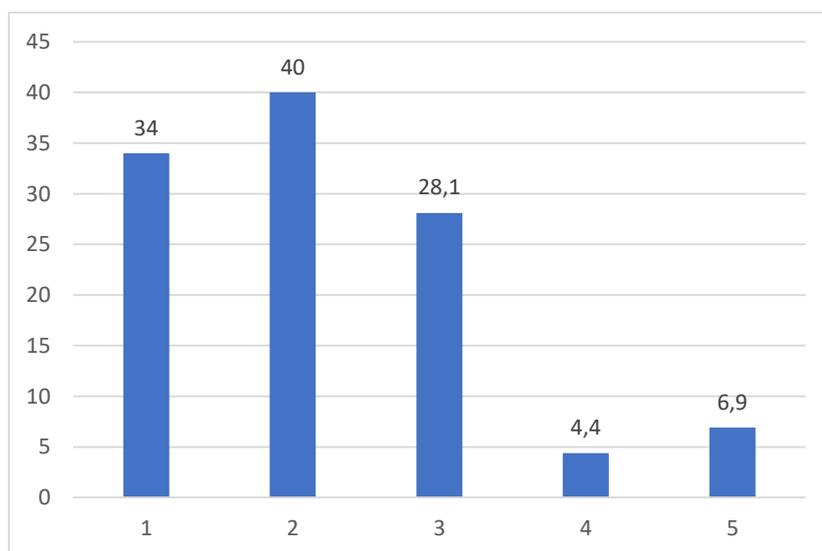
Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,001$.

Анализ данных, приведенных в таблице 2 позволяет утверждать, что под действием соединения КЕ-373 энергия прорастания и всхожесть семян ржи посевной увеличиваются на 34 и 40 % соответственно по сравнению с контролем. Эти отличия опыта и контроля имеют статистически достоверный характер.

Статистически достоверным является также увеличение показателя длины корня в опытном варианте по сравнению с контрольным вариантом, которое составляет 28,1 %.

Отличия в показателях количества корней и длины побега менее значительны. Увеличение количества корней под действием соединения КЕ-373 составляет 4,4 %, увеличение длины побега – 6,9 %.

Таким образом, под действием соединения КЕ-373 наблюдается увеличение всех изучаемых показателей роста растений ржи посевной, подвергшихся температурному стрессу по сравнению с контролем (рисунок 2). Статистически достоверным является стимулирующий эффект соединения КЕ-373 на энергию прорастания, всхожесть семян и длину корня.



1 – энергия прорастания; 2 – всхожесть; 3 – длина корня;
4 – количество корней; 5 – длина побега

Рисунок 2 – Влияние соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной в условиях температурного стресса, % относительно контроля

Следует отметить, что важной функцией соединений кремния является стимуляция развития корневой системы [11]. Улучшение кремниевого питания растений способствует увеличению количества корней, а дефицит кремниевого питания лимитирует развитие корневой системы [6]. Как отмечается в литературе, рост корней на клеточном уровне зависит от числа меристематических клеток и длины меристемы. При этом механизмы контроля длины меристемы остаются мало выясненными [12].

В проведенном нами исследовании показано, что в благоприятных условиях соединение КЕ-373 оказывает достоверное влияние на формирование количества корней, а в условиях температурного стресса существенно увеличивает длину корня у ржи посевной. Возможно, это свидетельствует о синергетическом эффекте действия соединения КЕ-373 и низких температур.

В таблице 3 приведены результаты двух серий проведенного эксперимента, позволяющие сопоставить их между собой.

Таблица 3 – Влияние соединения КЕ-373 на показатели роста ржи посевной, % относительно контроля

Вариант опыта	Энергия прорастания	Всхожесть	Длина корня	Количество корней	Длина побега
Оптимальная температура	14	22	9,3	7,2	1,4
Температурный стресс	34	40	28,1	4,4	6,9

Анализ приведенных в таблице 3 данных, позволяет сделать вывод, что в отношении четырех из пяти исследованных показателей роста («энергия прорастания», «всхожесть», «длина корня», «длина побега») большой стимулирующий эффект соединения КЕ-373 демонстрирует на растениях, подвергшихся действию низких температур. При этом изменчивость качественных показателей роста («энергия прорастания» и «всхожесть») оказалась более существенной.

Результаты настоящего исследования согласуются с ранее полученными данными о биологической активности соединения КЕ-373. Так, на растениях люпина узколистного было показано, что под действием 10^{-4} М раствора КЕ-373 наблюдается статистически достоверное увеличение энергии прорастания, всхожести семян и длины корня проростков. В данном варианте увеличение показателя энергии прорастания составляет 6 %, увеличение всхожести – 5 %, увеличение длины корня – 25 % по сравнению с контролем. На растениях гороха посевного показано, соединение КЕ-373 оказывает статистически достоверное стимулирующее действие в отношении показателей длины корня и длины побега проростков гороха. Под влиянием 10^{-5} М и 10^{-6} М растворов КЕ-373 увеличение длины корня составляет 28 % и 16 %, увеличение длины побега – 63 и 73 % соответственно по сравнению с контролем. На растениях пшеницы мягкой показано, что под действием 10^{-5} М и 10^{-6} М растворов КЕ-373 наблюдается статистически достоверное увеличение энергии прорастания, всхожести семян, длины корня и длины побега проростков пшеницы. В варианте опыта с 10^{-5} М раствором КЕ-373 увеличение показателя энергии прорастания составляет 14 %, увеличение всхожести – 23 %, увеличение длины корня – 13,7 %, увеличение длины побега – 52,4 % по сравнению с контролем. В варианте опыта с 10^{-6} М раствором КЕ-373 увеличение показателя энергии прорастания составляет 32 %, увеличение всхожести – 27 %, увеличение длины корня – 15,1 %, увеличение длины побега – 43,3 % по сравнению с контролем. На растениях редиса показано, что под действием 10^{-5} М и 10^{-6} М растворов КЕ-373 наблюдается статистически

достоверное увеличение энергии прорастания, всхожести семян и длины корня проростков редиса. В варианте опыта с 10^{-5} М раствором КЕ-373 увеличение показателя энергии прорастания составляет 13 %, увеличение всхожести – 18 %, увеличение длины корешков – 44,5 % по сравнению с контролем. В варианте опыта с 10^{-6} М раствором КЕ-373 увеличение показателя энергии прорастания составляет 14 %, увеличение всхожести – 17 %, увеличение длины корня – 37,5 % по сравнению с контролем [13].

Полученные нами результаты согласуются с литературными данными, согласно которым поступление кремния в растения повышает устойчивость растений к биогенным и абиогенным стрессам. Как отмечает В. В. Матыченков, оптимальное кремниевое питание растений способствует повышению всхожести, устойчивости растений к солевой токсичности, недостатку воды, низким температурам, действию тяжелых металлов. Отмечается, что действие стрессоров биогенной и абиогенной природы приводит к значительному увеличению содержания кремния в тканях растений. Кроме того, существует корреляция между интенсивностью стресса и содержанием общего кремния в растении [6].

Заклучение

Оценка рострегулирующей и протекторной активности кремнийорганического соединения КЕ-373 по комплексу показателей роста ржи посевной позволяет говорить о том, что соединение КЕ-373 проявляет стимулирующий эффект в отношении всех изучаемых показателей. Более значительным является влияние соединения КЕ-373 на показатели энергии прорастания, всхожести семян, длины корня и количества корней проростков ржи посевной.

Зафиксировано, что соединение КЕ-373 проявляет протекторную активность к действию низких температур. Растения, подвергшиеся температурному стрессу, демонстрируют большую отзывчивость к действию КЕ-373. Отличия показателей роста ржи посевной в данной серии эксперимента более значительны, чем в серии эксперимента с растениями, не подвергшимися температурному стрессу.

Полученные результаты согласуются с литературными данными о биологическом значении соединений кремния в формировании устойчивости растений к различным стресс-факторам биогенной и абиогенной природы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сравнительная активность гидрооксалатов γ -аминопропилсиланов / Н. П. Ерчак [и др.] // Весн. Брєсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2010. – № 1. – С. 28–40.
2. Влияние гидрооксалатов γ -аминопропилсиланов на активность антиоксидантных ферментов злаковых культур в условиях токсического действия ионов свинца / Е. Г. Артемук [и др.] // Прыроднае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця : зб. навук. пр. – Брєст : Альтернатива, 2012. – Вып. 5. – С. 6–9.
3. Коваленко, В. В. Биологическая активность кремнийорганических соединений / В. В. Коваленко, О. О. Ломакова, Н. П. Ерчак // Менделеевские чтения – 2011 : сб. материалов межвуз. науч.-метод. конф., Брест, 25 фев. 2011 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. Н. С. Ступень. – Брест : БрГУ, 2011. – С. 55–58.
4. Оптимизация состава питательной среды для индукции каллусообразования в культуре незрелых зародышей мягкой пшеницы / С. М. Ленивко [и др.] // Клеточная биология и биотехнология растений : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13–15 февр. 2013 г. / ред. совет: В. В. Демидчик [и др.]. – Минск : БГУ, 2013. – С. 192.
5. Новый подход по оптимизации питательных сред для культивирования эксплантов пшеницы (*Triticum aestivum* L.) / С. М. Ленивко [и др.] // Весн. Брєсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2011. – № 2. – С. 48–52.

6. Матыченок, В. В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва – растение : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.00.12, 03.00.27 / В. В. Матыченок. – Пушино, 2008. – 32 с.
7. Самсонова, Н. Е. Кремний в растительных и животных организмах / Н. Е. Самсонова // *Агрохимия*. – 2019. – № 1. – С. 86–96.
8. Ленивко, С. М. Влияние *in vitro* гидрооксалата- γ -аминопропилсилана (KE-373) на морфогенез различных типов эксплантов пшеницы / С. М. Ленивко, В. В. Коваленко, Н. С. Ступень // *Вестн. Брѣсц. ун-та. Сер. 5, Біялогія. Наукі аб зямлі*. – 2022. – № 2. – С. 29–38.
9. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести : ГОСТ 12038–84. – Введ. 01.07.86. – М. : Стандартинформ, 2011. – 29 с.
10. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск : Ураджай, 1973. – 320 с.
11. Adatia, M. H. // The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution / M. H. Adatia, R. T. Besford // *Annals Bot.* – 1986. – Vol. 58. – P. 343–351.
12. Сравнительный анализ роста корней разных видов растений на клеточном уровне / Н. В. Жуковская [и др.] // *Физиология растений*. – 2020. – Т. 67, № 4. – С. 369–377.
13. Коваленко, В. В. Биологическая активность кремнийорганического соединения KE-373 / В. В. Коваленко // *Менделеевские чтения – 2022 : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф. по химии и хим. образованию с междунар. участием, Брест, 25 февр. 2022 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; редкол.: Э. А. Тур, Е. Г. Артемук (отв. ред.), Н. С. Ступень*. – Брест : БрГУ, 2022. – С. 62–65.

REFERENCES

1. Sravnitel'naja aktivnost' gidrooksalatov γ -aminopropilsilanov / N. P. Yerchak [i dr.] // *Viesn. Brest. un-ta. Ser. 5, Khimija. Bijalohija. Navuki ab ziamli*. – 2010. – № 1. – S. 28–40.
2. Vlijanije gidrooksalatov γ -aminopropilsilanov na aktivnost' antioksidantnykh fermentov zlakovykh kul'tur v uslovijakh toksichieskogo dejstvija ionov svinca / Ye. G. Artiemuk [i dr.] // *Pryrodnaje asiaroddzie Paliessia: asablivasci i pierspiektyvy razvicia : zb. navuk. pr.* – Brest : Al'ternativa, 2012. – Vyp. 5. – S. 6–9.
3. Kovalienko, V. V. Biologichieskaja aktivnost' kriemnijorganichieskikh sojedinenij / V. V. Kovalienko, O. O. Lomakova, N. P. Yerchak // *Miendieliejevskije chtienija – 2011 : sb. materialov miezhvuz. nauch.-mietod. konf., Brest, 25 fievr. 2011 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. ried. N. S. Stupien'.* – Brest : BrGU, 2011. – S. 55–58.
4. Optimizacija sostava pitatel'noj sriedy dlja indukcii kallusoobrazovanija v kul'turie niezrielykh zarodyshej miagkoj pshenicy / S. M. Lienivko [i dr.] // *Klietchnaja biologija i biotiekhnologija rastienij : tez. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 13–15 fievr. 2013 g. / ried. soviet: V. V. Diemidchik [i dr.]*. – Minsk : BGU, 2013. – S. 192.
5. Novyj podkhod po optimizacii pitatel'nykh sried dlja kul'tivirovanija eksplantov pshenicy (*Triticum aestivum* L.) / S. M. Lienivko [i dr.] // *Viesn. Brest. un-ta. Ser. 5. Khimija. Bijalohija. Navuki ab ziamli*. – 2011. – № 2. – S. 48–52.
6. Matychienkov, V. V. Rol' podvizhnykh sojedinenij kriemnija v rastienijakh i sistemie pochva – rastienije : avtorief. dis. ... d-ra biol. nauk : 03.00.12, 03.00.27 / V. V. Matychienkov. – Pushchino, 2008. – 32 s.
7. Samsonova, N. Ye. Kriemnij v rastitel'nykh i zhivotnykh organizmakh / N. Ye. Samsonova // *Agrokhimija*. – 2019. – № 1. – S. 86–96.
8. Lienivko, S. M. Vlijanije *in vitro* gidrooksalata- γ -aminopropilsilana (KE-373) na morfogenez razlichnykh tipov eksplantov pshenicy / S. M. Lienivko, V. V. Kovalienko,

N. S. Stupien' // Viesn. Besc. un-ta. Sier. 5, Bijalohija. Navuki ab ziamli. – 2022. – № 2. – S. 29–38.

9. Siemiena siel'skokhoziajstviennykh kul'tur. Mietody opriedielienija vskhozhesti : GOST 12038–84. – Vvied. 01.07.86. – M. : Standartinform, 2011. – 29 s.

10. Rokickij, P. F. Biologichieskaja statistika / P. F. Rokickij. – Minsk : Uradzhaj, 1973. – 320 s.

11. Adatia, M. H. // The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution / M. H. Adatia, R. T. Besford // Annals Bot. – 1986. – Vol. 58. – P. 343–351.

12. Sravnitel'nyj analiz rosta korniej raznykh vidov rastienij na klietochnom urovnie / N. V. Zhukovskaja [i dr.] // Fiziologija rastienij. – 2020. – T. 67, № 4. – S. 369–377.

13. Kovalienko, V. V. Biologichieskaja aktivnost' kriemnijorganichieskogo sojedinenija KE-373 / V. V. Kovalienko // Miendieliejevskije chtienija – 2022 : sb. materialov Riesz. nauch.-prakt. konf. po khimii i khim. obrazovaniju s miezhdunar. uchastijem, Briesť, 25 fievr. 2022 g. / Briesť. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; riedkol.: Ye. A. Tur, Ye. G. Artiemuk (otv. ried.), N. S. Stupien'. – Briesť : BrGU, 2022. – S. 62–65.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 05.10.2023