

зультаты длительных полевых опытов географической сети России // Почвоведение. – 2020. – № 12. – С. 1521-1536. DOI: 10.31857/S0032180X20120138.

12. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изменение климата и углеродная нейтральность: современные вызовы перед аграрной наукой // Плодородие. – 2021. – № 5. – С. 3-7. DOI: 10.25680/S19948603.2021.122.01

13. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изучение потоков углерода и азота в длительных полевых опытах Геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами/Плодородие.– 2021. – №6.– С.38 – 41. DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.10

14. Тулина А.С., Налиухин А.Н. Минерализация органического вещества и секвестрация углерода в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве полевого опыта с удобрениями // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Агрохимия в XXI веке». – М.: МГУ, 2018. – С. 167-172.

15. IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.

16. IPCC 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y.,

Shermanau P. and Federici S. (eds). Published: IPCC, Switzerland. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>.

17. Janzen H.H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? // Soil Biology and Biochem. 2006. V. 38. P. 419-424.

18. Körschens M. Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments // Vortrag zum 2. Symp. "Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12 Oktober 2018 im UFZ Leipzig". 2018. 12 p.

19. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food Security // Science. 2004. Vol. 304. P. 1623-1627.

20. Paul E.A., Kravchenko A., Grandy A.S., Morris S. Soil organic matter dynamics: Controls and management for sustainable ecosystem functioning / S.K. Hamilton, J.E. Doll, G.P. Robertson (Eds) // The Ecology of Agricultural Landscapes: Long-Term Research on the Path to Sustainability. New York: Oxford University Press, 2015. P. 104-134.

21. Paustian K., Six J., Elliott E.T., Hunt H.W. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils // Biogeochemistry. 2000. V. 48. P. 147-163.

22. Shcherbak I., Millar N., Robertson G.P. Global metaanalysis of nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen // PNAS. 2014. V. 111. P. 9199–9204.

23. Smith P., Smith J.U., Powlson D.S. (Ed.). Global change and terrestrial ecosystems. Soil Organic Matter Network (SOMNET): 1996 model and experimental metadata. Report no. 7, GCTE task 3.3.1. Wallingford, 1996.

CARBON SEQUESTERING EVALUATION OF VARIOUS FERTILIZER SYSTEMS AND DETERMINATION OF N₂O EMISSIONS IN LONG-TERM FIELD EXPERIENCE

V.G. Sychev¹, A.N. Naliukhin^{2*}, A.V. Eregin³, N.R. Sharapova⁴, D.V. Demidov⁴

¹Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry, Pryanishnikov ul. 31a, 127434 Moscow, Russia

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Pryanishnikova ul. 6, 127550 Moscow, Russia

³State center of agrochemical service "Vologodskiy", Studencheskaya ul. 11, 160555 Molochnoe, Vologda, Russia

⁴PhosAgro Group, SE JSC Apatii, Leninsky prospect, 55/1, building I, 119333 Moscow, Russia

*E-mail: naliukhin@yandex.ru

In a stationary field experiment on soddy-podzolic light loamy soil in the crop rotation link: vetch-oat mixture – winter wheat – barley – clover – oats, the effect of fertilizer systems (organic, mineral, organo-mineral) and liming on carbon sequestration and nitrous oxide emission was studied. When all balance items are taken into account, the deposition of carbon dioxide in the mineral system against the background of liming increases by 2.3 t CO₂/ha/year, reaching 2.9 t. up to 5.3-6.6 t CO₂/ha/year. The introduction of full doses on a limed background practically doubles the deposition of carbon dioxide both due to its accumulation in the organic matter of the soil (30% of the total sequestration) and in the composition of the marketable part of the crop. Additional emission of N₂O due to liming was 0.001 (control) – 0.039 (when applying N30P24K45) kg/ha/year. In this case, the emission factor was 0.07-0.08, and when cattle manure and mineral fertilizers were applied, it was 0.08-0.09. The combined use of organic and mineral fertilizers in half doses somewhat reduced the emission losses of nitrous oxide during liming, which ranged from 0.08 to 0.09 and were comparable to the mineral fertilizer system. It should be noted that the productivity of the field crop rotation with the organo-mineral fertilizer system was 10% higher – 45-50 cw/ha.

Key words: sequestration, emissions, carbon dioxide, nitrous oxide, soil, fertilizer systems, long field experience.

УДК 631.816.12:631.417.8

DOI: 10.25680/S19948603.2022.129.20

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОВЫШЕНИИ ТОЛЕРАНТНОСТИ КУКУРУЗЫ К НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМУ СТРЕССУ

О.А. Шаповал, д.с.-х.н., М.Т. Мухина, к.б.н., Р.А. Боровик, к.б.н., И.П. Можарова, к.с.-х.н.,
ВНИИ агрохимии

127434, Москва, ул. Прянишникова, 31А, Россия, elgen@mail.ru

В условиях вегетационного опыта в фитотроне проведено изучение влияния листовой обработки кукурузы хелатами редкоземельных элементов на рост, содержание питательных элементов и физиолого-биохимических параметров в условиях краткосрочного низкотемпературного стресса. Растения кукурузы выращивались в условиях контролируемого программируемого температурного режима. Дважды проводилась обработка растворами ЭДТА La, Y, Er в двух концентрациях. После воздействия на растения пониженными температурами были изучены их биометрические параметры, физиолого-биохимические показатели-маркеры стресса, элементный состав надземной биомассы, интенсивность протекания фотосинтеза. Установлено, что обработки растений растворами хелатов РЗЭ имеют разнонаправленное влияние на растения, повышая их устойчивость к пониженным температурам. Характер и степень влияния зависят от применяемого редкоземельного элемента и его концентрации в рабочем растворе.

Ключевые слова: кукуруза, некорневая подкормка, лантаноиды, хелатная форма, низкотемпературный стресс.

В настоящее время самая большая проблема, которая вызывает обеспокоенность всего научного сообщества, – это экологический стресс, который наносит урон урожайности большинству сельскохозяйственных культур и снижает качество продукции. Поэтому любые механизмы, снижающие экологическую нагрузку, повышающие устойчивость растений и их адаптивный потенциал, исследуют очень тщательно. Особое место в разработке оригинальных формул новых удобрений занимает стремление ввести такие составные части, которые обеспечили бы полифункциональность нового продукта, и, как приятный бонус, его оригинальность.

Весенние заморозки в России, влекущие за собой повреждение всходов различных сельскохозяйственных культур, стали повсеместным явлением. Для повышения устойчивости посевов к низким температурам существуют разнообразные агротехнические и агрохимические приёмы. Тем не менее, не прекращается поиск новых способов защиты растений от стресса, более эффективных в экономическом и биологическом плане, а также отвечающих современным стандартам безопасности как для человека, так и для окружающей среды. Одним из перспективных направлений может оказаться применение в качестве антистрессовых агентов редкоземельных элементов.

К редкоземельным элементам (РЗЭ) относятся 15 редкоземельных металлов, расположенных в периодической системе Менделеева с 57 по 71 номер, образующих семейство лантаноидов. Эти элементы обладают одинаковым строением внешней электронной оболочки и близкими ионными радиусами, что обеспечивает сходство химических свойств и геохимического поведения [1, 2].

Установлена эффективность редкоземельных элементов в повышении урожайности различных культур [3, 4]. Некоторые исследования указывают на их способность участвовать в физиологическом ответе растений на стресс [5, 6]. Но всё же их метаболизм в растениях мало изучен.

Влияние лантаноидов на устойчивость растений к стрессу. Способность лантаноидов смягчать действие стрессовых условий среды отмечена в ряде исследований. Отмечено, что применение La в условиях дефицита влаги позволяло значительно усилить рост ячменя, повысить эффективность водопотребления, устьичную проводимость и снизить водный потенциал листьев. Наибольшее увеличение эффективности – на 21% наблюдается при внесении La в почву в дозе 10 кг/га. Доза 5 кг/га способствовала усилению кущения ячменя на 33% в условиях дефицита влаги [5, 6].

Повышение эффективности водопотребления учёные связывают с увеличением количества пролина в клетках. В работе [7] отмечалось повышение пролина у сахарного тростника после обработки лантаноидами, и как следствие увеличение доли связанной воды в клетке, препятствуя её дегидратации. Эффективность некорневой подкормки лантаноидами растёт в условиях дефицита почвенной влаги [8], когда подвижность почвенных лантанидов и их доступность растениям снижаются.

Применение лантаноидов ослабляет низкотемпературный стресс. Так у пшеницы, перенёсшей понижение

температуры до -8°C , отмечено повышение концентрации электролитов и пролина в клетках листьев [9]. Это свидетельствует об адаптации растений к понижению температуры.

Лантаноиды способны смягчать токсичное воздействие некоторых металлов [10, 11]. В ответ на токсичное действие ионов алюминия в корнях активизируется синтез малата. Хелатирование алюминия малатом является первичной реакцией в цепи обезвреживания этого металла. Различные лантаноиды, среди которых наиболее эффективны в этом отношении Er и Yb, стимулируют синтез малата и способны снижать токсичное действие алюминия на кислых почвах [12–14].

Ряд исследователей отмечают, что лантаноиды влияют на активность антиоксидантных ферментов. Также РЗЭ могут непосредственно взаимодействовать с активными формами кислорода, например церий в трёхвалентном состоянии может окисляться свободными радикалами кислорода до перекиси, а четырёхвалентный церий способен восстанавливать свободный радикал кислорода до молекулярной формы [2, 15, 16].

В исследованиях [17] показана способность лантаноидов повышать активность антиоксидантных ферментов, таких как каталаза, супероксиддисмутаза и пероксидаза, и снижать тем самым концентрацию активных форм кислорода у риса.

Существует предположение, что ионы лантана регулируют активность ферментов, осуществляющих перехват активных форм кислорода в процессе роста растений.

Ряд исследований указывает на то, что эффекты у растений, вызванные применением лантаноидов, могут быть связаны с изменением как количества ферментов, так и их активности. Например, фолиарное применение лантаноидов на сахарной свёкле повышало содержание глюкозы и фруктозы в листьях. Дальнейшие исследования показали, что обработка растворами лантаноидов в концентрации от 0,1 до 500 мкг/л снижает активность ряда ферментов, участвующих в трансформации сахаров на 34,2–84,2% [3, 18].

Другими исследованиями установлена способность лантаноидов повышать активность нитратредуктазы в листьях сои после обработки ими семян [3]. В работах с иными растениями показано усиление биосинтеза абсцизовой кислоты в растениях огурца под влиянием обработки La [3]. Ионы La, как было определено в опытах с проростками, повышали активность ферментов: пероксидазы, каталазы, увеличивали содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов [3].

В нашем исследовании изучали влияние листовой обработки растений кукурузы в фазе 1–2 листьев растворами хелатов РЗЭ на устойчивость к низкотемпературному стрессу. Кукуруза – теплолюбивое растение, чувствительное к пониженным температурам. В качестве объекта исследования выступали хелаты (ЭДТА) La, Y, Er и Ho.

Методика. Вегетационный опыт в фитотроне по изучению влияния хелатов редкоземельных элементов на устойчивость кукурузы к низкотемпературному стрессу проводили на базе лаборатории испытаний элементов агротехнологий, агрохимикатов и пестицидов ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова. В

качестве исследуемой культуры выступала кукуруза сорта Хони Бэнтам (раннеспелый гибрид – 72-75 дней от всходов до начала технической спелости).

В ходе первичных скрининговых исследований были отобраны наиболее биологически эффективные элементы для дальнейших исследований: гольмий (Ho), эрбий (Er), лантан (La) и иттрий (Y) в форме хелатов ЭДТА. Для обработки растений использовали растворы, приготовленные путём последовательного разведения маточных растворов хелатов лантаноидов, имеющих содержание действующего вещества 0,36 моль/л каждый.

Перед закладкой опыта пластиковые сосуды Митчерлиха (с перфорированным дном) объёмом 0,75 литров набивали субстратом. Субстрат представлял собой смесь нейтрализованного не заправленного верхового торфа, кварцевого песка и агроперлита с соотношением компонентов 1:1:1. После замешивания субстрата была определена его влажность экспресс - методом Кабаевой, которая составила 45,3%. В субстрат в растворённой форме было внесено минеральное удобрение ФЕРТИКА УНИВЕРСАЛ-2 (NPK 12:8:14+МИКРО, «Урал-Хим») в количестве 1,5 г физической массы на 1 кг субстрата. Сосуды набивали субстратом при влажности 41,4%, масса субстрата на один сосуд составляла 600 г (~350 г в пересчёте на абсолютно сухую массу). На протяжении опыта влажность субстрата поддерживалась на уровне 70-80% ПВ путём ежедневного полива сосудов по массе дистиллированной водой.

После набивки сосудов семена кукурузы по 12 штук равномерно высаживали по трафарету. Глубина посева составляла 3-4 см. Повторность 4-кратная. После появления всходов растения прореживали в каждом сосуде, оставляя по 5 наиболее крупных и здоровых всходов.

Растения кукурузы выращивали при строго контролируемом температурном режиме. С момента посева в течение 10 дней температура в фитотроне постепенно повышалась с +12°C днём и +10°C ночью до +25°C днём и до +23°C ночью и далее поддерживалась на этом уровне в течение 14 дней. Затем на растения оказывался низкотемпературный стресс – температура в фитотроне понижалась до +10°C днём и +6°C ночью. Цикл день/ночь составлял 9/15 ч, освещённость в дневное время – 7500 лк.

Схема опыта включала 9 вариантов. 1. Контроль. 2. Двукратное опрыскивание растений раствором ЭДТА La концентрацией 0,001 мг La/л. 3. Двукратное опрыскивание растений раствором ЭДТА La концентрацией 5 мг La/л. 4. Двукратное опрыскивание растений раствором ЭДТА Y концентрацией 1 мг Y/л. 5. Двукратное опрыскивание растений раствором ЭДТА Y концентрацией 5 мг Y/л. 6. Двукратное опрыскивание растений раствором ЭДТА Er концентрацией 0,1 мг Er/л. 7. Двукратное опрыскивание растений раствором ЭДТА Er концентрацией 5 мг Er/л. 8. Двукратное опрыскивание растений раствором ЭДТА Ho концентрацией 1 мг Ho/л. 9. Двукратное опрыскивание растений раствором ЭДТА Ho концентрацией 5 мг Ho/л.

Опрыскивание проводили до полного смачивания через 5 дней после появления всходов и за три дня до низкотемпературного стресса. В течение опыта ежедневно проводили ротацию сосудов, а еженедельно – полную рандомизацию.

Для оценки влияния хелатов редкоземельных элементов на устойчивость кукурузы к низкотемпературному стрессу был определён ряд показателей: непо-

средственно перед второй обработкой и на пятый день воздействия низкотемпературным стрессом были определены высота растений и параметры протекания фотосинтеза методом РАМ-флуориметрии: $Y(II)$ – эффективный выход флуоресценции, соответствующий доле световой энергии, расходуемой на протекание фотохимических процессов в фотосистеме II, $Y(NPQ)$ – нефотохимическое регулируемое тушение флуоресценции – доля нефотохимических потерь световой энергии, связанная с работой защитного механизма отвода избыточной солнечной энергии в хлоропластах, $Y(NO)$ – нефотохимическое нерегулируемое тушение флуоресценции – доля нефотохимических потерь световой энергии, связанная с иными небioхимическими механизмами [19]. Измерение и расчёт параметров проводили флуориметром Junior-PAM с приложением WinControl-3.29 при естественном внешнем освещении в режиме «Act.-Yield». Флуоресценцию измеряли в срединной части адаксиальной стороны третьего листа.

В период воздействия низкотемпературного стресса в листьях были определены: активность каталазы перманганатометрическим методом по скорости разложения перекиси водорода [20], осмотическое давление клеточного сока с помощью светового микроскопа путём подбора раствора хлорида натрия изотонической концентрации, при которой начинается плазмолиз клеток [21].

В конце эксперимента определяли индекс стабильности клеточных мембран (ИСКМ). Для его определения две навески листьев по 1 г погружали в 20 мл дистиллированной воды. Одна навеска настаивалась сутки при температуре 25°C, вторая – на кипящей водяной бане в течение 10 мин. После этого в каждой навеске кондуктометром измеряли сопротивление настоя. Расчёт вели по формуле: $ИСКМ[\%] = C_{25^{\circ}C} / C_{100^{\circ}C}$ [22].

По завершении опыта определяли сырую и сухую массу растений. Растительные образцы были зафиксированы при температуре 95°C, высушены и размолоты. После сухого озоления в них определяли содержание фосфора, калия и микроэлементов в одной навеске методом ICP-AES на спектрометре iCap 6300 Duo.

Полученные данные обработаны методом дисперсионного анализа при уровне значимости 0,05 в программном пакете MS Excel 2019.

Результаты и их обсуждение. Листовая обработка растений кукурузы хелатами редкоземельных элементов в условиях низкотемпературного стресса слабо повлияла на высоту растений и на надземную биомассу (табл. 1). Незначительное увеличение высоты и массы растений, на уровне тенденции, отмечают в варианте с применением ЭДТА Ho в концентрации 1 мг Ho/л. При этом статистически значимое приращение высоты (прирост) между двумя измерениями отмечается в вариантах с применением ЭДТА La в концентрации 0,001 мг La/л, ЭДТА Er в обеих концентрациях и ЭДТА Ho 1 мг Ho/л.

Для оценки устойчивости растений к низкотемпературному стрессу использовали комплекс показателей: параметры протекания фотосинтеза, измеренные методом РАМ-флуориметрии, показывают эффективность работы фотосинтетического аппарата и отражают его стабильность и устойчивость; активность каталазы – показатель, отражающий интенсивность работы антиоксидативных процессов внутри клеток; осмотическое давление клеточного сока, связанное с накоплением растворённых веществ в цитоплазме клеток в ответ на

понижение температуры; индекс стабильности клеточных мембран, связанный с устойчивостью биомембран в условиях холода.

1. Динамика высоты растений кукурузы и надземная биомасса, среднее \pm ст. отклонение

Вариант	Высота, см		Прирост, см	Надземная биомасса, г	
	1-е измерение	2-е измерение		сырая	воздушно-сухая
Контроль	33,2 \pm 0,9	38,2 \pm 0,7	5,0 \pm 0,2	8,27 \pm 0,40	0,75 \pm 0,04
La-0,001	31,6 \pm 3,0	40,3 \pm 4,1	8,7 \pm 1,3	9,19 \pm 1,31	0,81 \pm 0,23
La-5	33,2 \pm 2,0	38,8 \pm 2,3	5,6 \pm 0,4	7,61 \pm 0,72	0,65 \pm 0,10
Y-1	34,9 \pm 4,1	39,9 \pm 3,9	5,0 \pm 0,2	8,53 \pm 0,61	0,77 \pm 0,09
Y-5	33,3 \pm 1,7	38,5 \pm 2,0	5,1 \pm 1,0	7,12 \pm 0,67	0,67 \pm 0,06
Er-0,1	32,9 \pm 7,7	40,0 \pm 8,2	7,1 \pm 0,6	8,30 \pm 2,78	0,74 \pm 0,37
Er-5	33,9 \pm 4,4	41,6 \pm 3,0	7,7 \pm 1,5	7,77 \pm 1,20	0,68 \pm 0,26
Ho-1	36,3 \pm 3,6	43,3 \pm 2,8	7,0 \pm 1,1	8,85 \pm 0,95	0,83 \pm 0,13
Ho-5	29,3 \pm 2,2	35,7 \pm 1,5	6,5 \pm 0,8	7,26 \pm 1,29	0,74 \pm 0,13
HCP ₀₀₅	6,4	6,4	1,5	2,17	0,31

Интерес представляет динамика параметров протекания фотосинтеза. Непосредственно перед понижением температуры до стрессового уровня (1-е измерение) параметр $Y(II)$ снижался на фоне обработки ЭДТА Но (рис.). При этом в дозе 5 мг Но/л снижение было статистически значимым – на 28% ниже контроля. После пяти дней воздействия на растения холодом (2-е измерение) значение эффективного выхода флуоресценции выросло во всех вариантах опыта, что говорит о росте доли солнечной энергии, идущей на синтез углеводов. Это повышение связано, по-видимому, с активацией антистрессовых механизмов в ответ на понижение температуры. При этом наибольшее приращение эффективного выхода флуоресценции наблюдалось на фоне обработки ЭДТА Но в обеих концентрациях: на 0,243 при 1 мг Но/л и на 0,276 при 5 мг Но/л. В последнем случае приращение статистически значимо в сравнении с контролем. Аналогичное, но меньшее приращение параметра $Y(II)$ отмечено на фоне обработки ЭДТА La в концентрации 0,001 мг La/л на 0,196 и на фоне обработок ЭДТА Y и Er в обеих концентрациях на 0,198-0,210.

Параметр $Y(NPQ)$ связан прежде всего с работой защитных механизмов, отводящих избыточную световую энергию из хлоропластов. Перед понижением температуры на фоне фолиарного применения ЭДТА Но 5 мг Но/л отмечено существенное увеличение этого параметра (см. рис.). На фоне других обработок, за исключением обработки ЭДТА La, отмечается некоторое снижение значения параметра $Y(NPQ)$ по отношению к контролю при первом измерении. При втором измерении, во время воздействия низкотемпературного стресса, не обнаруживаются закономерности в распределении значений параметра $Y(NPQ)$. Воздействие холода привело к понижению нефотохимического регулируемого тушения флуоресценции во всех вариантах. Это является закономерным следствием снижения скорости биохимических реакций и активности центров отвода избыточной солнечной энергии. Однако, на фоне обработок растений ЭДТА Er понижение параметра $Y(NPQ)$ было менее выраженным, а в некоторых случаях даже отсутствовало. В варианте с обработкой растений раствором концентрацией 5 мг Er/л понижение параметра $Y(NPQ)$ в среднем равнялось нулю. Вероятно, Er снижает воздействие холода на защитные механизмы хлоропластов и оказывает некоторое положительное влияние на фотосинтетический аппарат. Обработка растений раствором ЭДТА Но в

концентрации 5 мг Но/л наоборот привела к значимому понижению нефотохимического регулируемого тушения флуоресценции на 0,085.

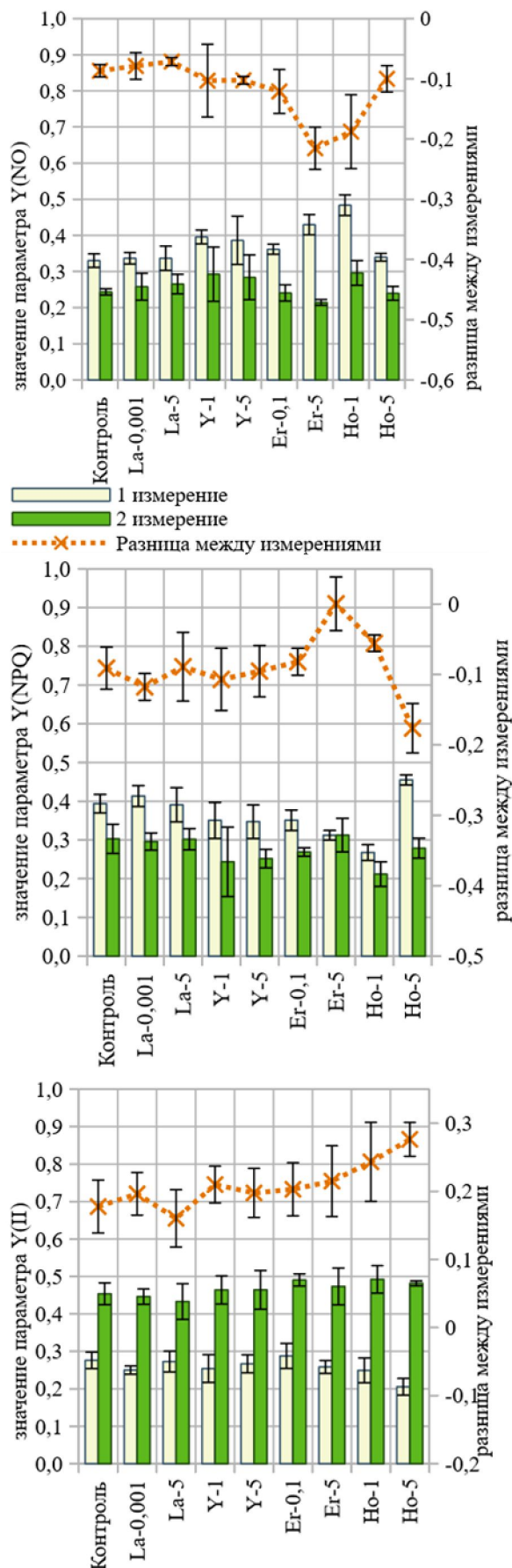


Рис. Динамика параметров протекания фотосинтеза в листьях кукурузы.

Нефотохимическое нерегулируемое тушение флуоресценции связано с другими параметрами через соотношение $Y(NO) = 1 - Y(II) - Y(NPQ)$. Поэтому его динамика при более-менее равномерном значении параметра $Y(II)$ в пределах опыта зеркально отражает динамику параметра $Y(NPQ)$ (см. рис.). Поскольку $Y(NO)$ связан с физическим рассеиванием световой энергии, вклад физиологических процессов в его изменение косвенный.

Низкотемпературный стресс приводит к повреждению клеточных структур и высвобождению свободных радикалов [23], а это способствует росту активности антиоксидантных ферментов. В исследовании показано, что листовая обработка кукурузы ЭДТА Y в обеих концентрациях привела к увеличению активности каталазы на 98,6-102-6% по отношению к контролю, а обработка ЭДТА Но в обеих концентрациях - на 191,6-214,7%.

Стабильность клеточных мембран в листьях кукурузы в пределах опыта колебалась на уровне 72,9-90,9%. Выраженной зависимости этого показателя от обработок хелатами редкоземельных элементов в различных концентрациях не обнаружено.

В ответ на понижение температуры в клетках растений начинает возрастать концентрация растворённых веществ в цитоплазме [23], главным образом легкорасщелимых низкомолекулярных углеводов, что приводит

к повышению осмотического давления клеточного сока, которое изменялось на фоне обработок. Так, после двукратного опрыскивания растений ЭДТА La и Y в обеих концентрациях отмечено повышение осмотического давления с 901 кПа на контроле до 931-984 кПа. Обработки с использованием других хелатов лантаноидов не привели к значимым изменениям (табл. 2).

2. Физиологические показатели ответа растений кукурузы на низкотемпературный стресс, среднее ± ст. отклонение

	Активность каталазы, мг O ₂ /(мг·мин)	Осмотическое давление клеточного сока, кПа	Индекс стабильности клеточных мембран, %
Контроль	8,9±0,6	901±13	82,3±6,2
La-0,001	10,0±2,4	931±0	83,3±8,2
La-5	8,3±1,3	939±13	75,9±7,6
Y-1	18,1±1,5	962±13	85,7±6,0
Y-5	17,8±2,6	984±26	82,1±5,9
Er-0,1	10,2±2,5	901±13	90,9±0,5
Er-5	11,6±2,9	924±13	84,1±1,3
Ho-1	28,2±4,6	924±13	81,0±8,3
Ho-5	26,1±6,0	886±0	83,8±7,5
HCP ₀₀₅	5,3	23	10,7

Обработка растений кукурузы хелатами редкоземельных элементов в условиях низкотемпературного стресса практически не повлияла на содержание макро- и мезоэлементов в вегетативной массе (табл. 3).

3. Элементный состав надземной биомассы кукурузы, среднее ± ст. отклонение

Вариант	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
	%				мг/кг			
Контроль	1,26 ±0,26	5,64 ±0,36	0,79 ±0,05	0,75 ±0,07	86,5 ±6,2	20,5 ±4,1	25,9 ±4,1	3,1 ±0,3
La-0,001	1,59 ±0,20	5,89 ±0,53	0,79 ±0,12	0,74 ±0,04	88,5 ±15,6	15,5 ±2,9	29,7 ±2,9	2,8 ±0,7
La-5	1,60 ±0,12	5,61 ±0,28	0,72 ±0,01	0,71 ±0,03	72,7 ±1,7	13,0 ±2,2	30,1 ±3,8	1,8 ±0,2
Y-1	1,50 ±0,23	5,51 ±0,70	0,80 ±0,16	0,76 ±0,02	78,6 ±10,3	13,1 ±3,1	30,8 ±3,5	2,5 ±0,7
Y-5	1,40 ±0,26	5,84 ±0,24	0,78 ±0,08	0,74 ±0,05	70,5 ±8,8	14,3 ±3,3	28,0 ±2,1	1,6 ±0,1
Er-0,1	1,39 ±0,12	5,31 ±0,64	0,81 ±0,03	0,74 ±0,13	78,9 ±7,6	13,5 ±1,5	33,3 ±5,0	2,0 ±0,5
Er-5	1,25 ±0,03	5,55 ±0,33	0,73 ±0,02	0,70 ±0,04	86,2 ±12,8	18,5 ±1,1	29,8 ±5,7	1,7 ±0,3
Ho-1	1,11 ±0,22	5,07 ±0,62	0,63 ±0,05	0,68 ±0,11	84,5 ±14,3	19,1 ±2,2	27,1 ±1,8	1,7 ±0,5
Ho-5	1,49 ±0,29	5,42 ±0,65	0,66 ±0,08	0,56 ±0,04	82,8 ±20,1	14,9 ±2,5	29,6 ±7,0	2,4 ±0,8
HCP ₀₀₅	0,35	0,86	0,14	0,12	20,2	4,6	7,2	0,8

Следует отметить, что повышение содержания калия в растительной клетке является следствием её адаптации к понижению температуры. Однако во всех вариантах обработки концентрация этого элемента в надземной биомассе оставалась на уровне контроля. Содержание фосфора колебалось в среднем от 1,11 до 1,60 %, а содержание калия – от 5,07 до 5,84%. Некоторые изменения отмечены в содержании кальция и магния – после листового применения раствора ЭДТА Но в концентрации 1 мг Но/л наблюдалось понижение содержания кальция, а после применения ЭДТА Но в концентрации 5 мг Но/л – понижение содержания магния, соответственно, на 20 и 25% по отношению к контролю. В обоих случаях снижение было статистически значимым на уровне 0,05. Содержание железа в надземной биомассе было выравненным по вариантам опыта.

На фоне проведённых обработок менялся микроэлементный состав надземной биомассы, в наибольшей степени это относится к марганцу и меди. В условиях низкотемпературного стресса содержание марганца достоверно снизилось на 24,7-36,7% к контролю при уровне значимости 0,05 после двукратной обработки растений растворами ЭДТА La и Y в обеих концентрациях, ЭДТА Er с концентрацией 0,1 мг Er/л и ЭДТА Но 5 мг Но/л. Содержание меди также обнаруживает статистически достоверное снижение к контролю на 34,2-

49,2% в вариантах с обработкой растворами ЭДТА La и Y концентрацией 5 мг д.в./л, раствором ЭДТА Er в обеих испытуемых концентрациях и ЭДТА Но 1 мг Но/л. Изменение содержания цинка по отношению к контролю наоборот обнаруживает положительную динамику, но статистически значимое увеличение этого показателя на 28,8% к контролю отмечено только в варианте с применением раствора ЭДТА Er концентрацией 0,1 мг Er/л.

В научной литературе практически отсутствуют сведения о биохимических аспектах взаимодействия между редкоземельными и биогенными элементами внутри растительного организма. Однако, можно предположить, что изучаемые РЗЭ оказывают влияние на транспорт и ассимиляцию марганца, цинка и меди. В частности, известно [4], что редкоземельные элементы в основном сорбируются в клеточной стенке. Это может оказывать влияние на её проницаемость для других ионов, и такой механизм взаимодействия скорее всего не единственный.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о наличии связи между обработкой растений кукурузы хелатами редкоземельных элементов (La, Y, Er и Ho) и изменениями ряда показателей низкотемпературного стресса, что косвенно указывает на возможность применения этих обработок для регулирования толерантности растений к холоду.

Применение хелатов редкоземельных элементов в целом не повлияло на количество надземной биомассы, однако в условиях низкотемпературного стресса позволило увеличить прирост высоты на фоне обработок ЭДТА Ег в обеих дозах и ЭДТА La и Но в низкой дозе. Выводы о влиянии РЗЭ на биометрические показатели растений кукурузы были проведены в ранние фазы развития кукурузы.

Прослеживается действие применения хелатов лантаноидов на работу фотосинтетического аппарата. Некоторое повышение эффективного выхода флуоресценции отмечается практически во всех вариантах, а в вариантах с применением ЭДТА Но оно оказывается наибольшим. Также отмечена способность ЭДТА Ег в обеих дозировках стимулировать работу систем отвода избыточной световой энергии в хлоропластах на фоне пониженной температуры. Более прямую связь РЗЭ с работой антистрессовых механизмов показывают повышение активности каталазы на фоне обработки ЭДТА Y и Но и увеличение осмотического давления клеточного сока после применения ЭДТА La и Y. Помимо прямого действия на адаптивные механизмы обнаружилось влияние хелатов редкоземельных элементов на элементный состав растений и преимущественно на содержание микроэлементов в надземной биомассе. Во всех вариантах отмечены снижение содержания марганца, меди и повышение содержания цинка по отношению к контролю.

Полученные результаты в целом свидетельствуют о способности редкоземельных элементов оказывать положительное влияние на устойчивость молодых растений кукурузы к краткосрочному низкотемпературному стрессу, позволяют с достаточной степенью уверенности говорить о наличии такого влияния и о его разнонаправленном характере.

Понимание метаболизма редкоземельных элементов в биохимических процессах в растительном организме в современной науке находится на начальной стадии. Это затрудняет построение гипотез относительно характера взаимодействия антистрессовых механизмов в растениях.

Литература

1. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры / А.П. Виноградов // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555-571.
2. Kotelnikova A. Lanthanides in the Soil: Routes of Entry, Content, Effect on Plants, and Genotoxicity (a Review) / A. Kotelnikova, O. Rogova, V. Stolbova // Eurasian Soil Science. – 2021. – Vol. 54. – Lanthanides in the Soil. – P. 117-134.
3. Водяницкий Ю.Н. Лантаниды почвы и их влияние на растения / Ю.Н. Водяницкий // Агрохимия. – 2012. – № 4. – С. 84-96.

4. Redling K. Rare Earth Elements in Agriculture with Emphasis on Animal Husbandry / K. Redling Google-Books-ID: NgzonAAACAAJ. – München: DVG-Service, 2006. – 326 p.
5. Impact of Rare Earth Elements on plant physiology and productivity / J. Maheswaran [et al.] // Rural Industries Research and Development Corporation. – 2001. – Vol. 1. – № 145. – P. 1-40.
6. The Application of Rare Earth Elements in Enhancement of Crop Production in Australia Part 1. / B. Meehan [et al.] // Proceedings of the 4th International Conference on Rare Earth Development and Application, 16. – 18. June 2001. – Beijing, 2001. – P. 244-250.
7. Yu Y.H. Distribution and cumulative of REEs in sugarcane plant and effect of REEs on adversity tolerance in sugarcane / Y.H. Yu, Q.Y. Liu // Journal of South China Agricultural University. – 1992. – Vol. 13. – № 2. – P. 47-54.
8. Сыренжапова А.С. Влияние лантана на рост кукурузы, синтез органического вещества и пигментов в ее листьях / А.С. Сыренжапова, А.А. Маладаев, Н.Е. Абашеева // Вестник Бурятской Государственной сельскохозяйственной академии им. В.П. Филиппова. – 2008. – № 2.
9. Rare Earths in Agriculture / B. Guo [et al.]. – Beijing.: Agricultural Scientific Technological Press, 1988. – 23-208 p.
10. Ecophysiological effect of La on Glycine max seedling under Cd stress / Q. Zhou [et al.] // China Environmental Science. – 1998. – Vol. 18. – P. 442-445.
11. Effect of lanthanum on Glycine max seedling under Pb stress / Q. Zhou [et al.] // Chinese journal of applied and environmental biology. – 1999. – Vol. 5. – P. 22-25.
12. Several lanthanides activate malate efflux from roots of aluminium-tolerant wheat / T. Kataoka [et al.] // Plant Cell and Environment. – 2002. – Vol. 25. – № 3. – P. 453-460.
13. Foy C.D. The physiology of metal toxicity in plants / C.D. Foy, R.L. Chaney, M.C. White // Annual Review of Plant Physiology. – 1978. – Vol. 29. – P. 511-566.
14. Kochian L.V. Cellular mechanisms of aluminium toxicity and resistance in plants / L.V. Kochian // Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. – 1995. – T. 46. – C. 237-260.
15. Pang X. Application of Rare Earth Elements in the agriculture of China and its environmental behavior in soil / X. Pang, D. Li, A. Peng // Environmental Science and Pollution Research International. – 2002. – Vol. 9. – № 2. – P. 143-148.
16. Wang J.S. Mechanism of cerium ion clearing superoxide radical / J.S. Wang, C.R. Guo, Y.X. Cheng // Journal of Chinese Rare Earth Society. – 1997a. – Vol. 15. – № 2. – P. 151-154.
17. Hong, F.H. Effect of lanthanum on aged seed germination of rice. / F.H. Hong, Z.G. Wei, G.W. Zhao // Biological Trace Element Research. – 2000a. – Vol. 75. – P. 205-213.
18. Evaluation of the potential hazard of lanthanides to freshwater microcrustaceans / I. Blinova [et al.] // Science of The Total Environment. – 2018. – Vol. 642. – P. 1100-1107.
19. Schreiber U. Pulse-Amplitude-Modulation (PAM) Fluorometry and Saturation Pulse Method: An Overview / U. Schreiber // Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis / eds. G.C. Papageorgiou, Govindjee. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2004. – Vol. 19. – P. 279-319.
20. Воскресенская О.Л. Большой практикум по биозологии. Ч. 1: учеб. пособие / О.Л. Воскресенская. – Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2006. – 107 с.
21. Третьяков Н.Н. Практикум по физиологии растений / Н.Н. Третьяков, Т.В. Карнаухова, Л.А. Паничкин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1990. – 271 с.
22. Differences in Physiological Traits Among Salt-Stressed Barley Genotypes / Y. Huang [et al.] // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2006. – Vol. 37. – № 3-4. – P. 557-570.
23. Якушкина Н.И. Физиология растений / Н.И. Якушкина, Е.Ю. Бахтенко. – М.: Валдос, 2005. – 463 с.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF RARE EARTH ELEMENTS IN INCREASING THE TOLERANCE OF CORN TO LOW-TEMPERATURE STRESS

O.A. Shapoval, M.T. Mukhina, R.A. Borovik, I.P. Mozharova

Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, Pryanishnikova str., 31A, 127434, Moscow, Russia, elgen@mail.ru

In the conditions of the vegetative experiment in phytotron, the influence of the leaf treatment of corn with chelates of rare earth elements on growth, nutrient content and physiological and biochemical parameters under conditions of short-term low-temperature stress was studied. Corn plants were grown under controlled programmable temperature conditions. Treatment with solutions of EDTA La, Y, Er, in two concentrations was carried out twice. After the plants were exposed to low temperatures, their biometric parameters, physiological and biochemical indicators-stress markers, the elemental composition of aboveground biomass, and the intensity of photosynthesis were studied. It has been established that plant treatments with REE chelate solutions have a multidirectional effect on plants, increasing their resistance to low temperatures. The nature and degree of influence depend on the rare earth element used and its concentration in the working solution.

Keywords: corn, foliar top dressing, lanthanides in chelated form, low-temperature stress.