

12. Проектируемая эффективность применения минеральных удобрений под озимую пшеницу

№ поля	Урожай без удобр., ц/га	Доза удобр., кг д.в./га	Прибавка урожая	План. урожай	Стоимость прибавки урожая	Доход	Затраты на прим. удобр.	Прибыль от прим. удобр.	Окупаемость удобр., кг/кг	Общая прибыль, руб/га
			ц/га			руб/га				
1	7,3	N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	11,3	18,6	16175	26624	8861	7314	12,6	17763
2	15,7	N ₃₀	7,6	23,3	10879	33352	3632	7247	25,3	29720
3	25,7	N ₃₀	10,2	35,9	14600	51387	3632	10968	34,0	47755

Выбранные дозы нужно распределить по способам внесения. Это делают стандартным методом. На поле №1 фосфор и калий вносят в основное удобрение под основную (осеннюю) обработку почвы (по 30 кг д.в./га). В физическом весе это будет соответствовать 115 кг/га диаммофоски. Поскольку фосфор вносят в виде диаммофоски, то с осени также будет внесено 12 кг/га азота. Остальные 18 кг/га азота следует довести в ранневесеннюю подкормку в виде аммиачной селитры (51 кг в физическом весе).

На полях № 2 и 3 фосфор и калий не применяют, следовательно основного удобрения не будет. Поэтому весь азот вносят в ранневесеннюю подкормку в виде аммиачной селитры в дозе 30 кг д.в./га (86 кг/га в физической массе).

Заключение. Таким образом, метод определения доз удобрений по нормативам окупаемости позволяет сельхозпроизводителю прогнозируемо получать максимальную прибыль с каждого поля с учетом его агрохимических показателей.

Литература

1. С.А. Шафран. Плодородие почв Нечерноземной зоны и его регулирование – М., ВНИИА, 2021. – 200 с.
2. С.А. Шафран. Ассортимент минеральных удобрений и экономическая эффективность их применения. – М., 2020. – 229 с.
3. С.А. Шафран и др. Региональные нормативы окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая зерновых культур. – М.: ВНИИА, 2016.
4. В.Г. Сычев, С.А. Шафран, Т.М. Духанина. Диагностика минерального питания полевых культур и определение потребности в удобрениях. – М.: ВНИИА, 2017. – 220 с.

DETERMINING FERTILIZER DOSES ACCORDING TO PAYBACK STANDARDS

A.A.Khrunov, Russian state agricultural university, Timiryazevskaya ul. 49, 127434, Moscow, Russia

E-mail: alexkhrunov@gmail.com

A.N. Naliukhin, Russian state agricultural university, Timiryazevskaya ul. 49, 127434, Moscow, Russia

E-mail: naliukhin@yandex.ru

N.K.Sidorenkova, Russian state agricultural university, Timiryazevskaya ul. 49, 127434, Moscow, Russia

E-mail: sidnadejda@mail.ru

The article discusses the methodology for determining fertilizer doses according to payback standards. This method is based on the generalization of the results of numerous field experiments, which made it possible to accurately determine the value of the crop without fertilizers and crop additions from various doses of fertilizers, depending on the agrochemical parameters of the soil.

The optimal dose of fertilizers is selected based on its payback by an increase in yield and the cost of this increase compared to the cost of using fertilizers.

The concept of the payback limit of fertilizers is given – an important calculation indicator that allows to exclude non-recoupable doses of fertilizers. The method of choosing the doses and forms of fertilizers, the use of which will allow you to get the maximum profit from each hectare of arable land, is considered.

УДК 631.416.8:633.1

DOI: 10.25680/S19948603.2022.128.11

ВЛИЯНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ В НАЧАЛЬНЫЕ ПЕРИОДЫ РАЗВИТИЯ

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.,

ФГБНУ ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова

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

В обзорной статье приведены экспериментальные данные о положительном действии низких доз лантаноидов на развитие ряда растений: повышение активности антиоксидантных ферментов в листьях растений; устойчивость к тяжёлым металлам; к стрессовым факторам окружающей среды; адаптивности. В то же время эффект не был повсеместным, что объясняется недостаточной изученностью свойств лантаноидов. Проведённый анализ послужил основанием проведения лабораторного опыта в 2022 г. во ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова с целью изучения закономерностей их воздействия на всхожесть, энергию прорастания, биометрические показатели проростков, установления диапазона оптимальных концентраций хелатов редкоземельных элементов (РЗЭ) на проростках пшеницы. В целом проведенный скрининг показал разнонаправленное действие лантаноидов. Самые высокие показатели наблюдались при использовании Y в дозах 1; 0,001 и 10 мкмоль/л. ЭДТА Y оказался наиболее перспективным для дальнейших исследований. Исследования показывают большой потенциал РЗЭ для включения их в рецептуру современных комплексных удобрений.

Ключевые слова: лантаноиды, пшеница яровая, предпосевная обработка семян, всхожесть, энергия прорастания.

К редкоземельным элементам (РЗЭ) в последнее время проявляют повышенный интерес. Долгое время их не считали необходимыми элементами для роста и развития растений, с одной стороны, они не проявляли какую-либо токсичность, с другой. Впервые на редкоземельные элементы обратили внимание в Китае в начале 70-х годов прошлого века. Работы, посвященные действию этих металлов на растения, выявили, что их можно использовать в качестве удобрений. При этом применение удобрений, содержащих РЗЭ, рекомендовалось для обработки семян или некорневой подкормки, так как внесенные в почву лантаноиды становятся мало доступны для растений и не дают эффекта, а увеличение дозы приводит к негативным результатам [1].

Установлено положительное действие низких доз лантаноидов на развитие ряда растений. Полученные экспериментальные данные свидетельствовали об их благоприятном действии на растения: повышались активность антиоксидантных ферментов в листьях растений, устойчивость к тяжёлым металлам, к стрессовым факторам окружающей среды, адаптивность. В то же время эффект не был повсеместным, что объясняется недостаточной изученностью свойств лантаноидов [2]. Были изучены физиологические механизмы влияния РЗЭ на растение, их участие в ростовых движениях различного типа, процессы роста и дифференцировки. Обнаружилось значительное накопление лантаноидов в растениях, фракционирование в разных частях.

Установлено, что РЗЭ влияют на регуляцию работы устьичного аппарата, т.е. выступают в качестве ингибитора механочувствительных каналов растительных клеток. Выявлено влияние ионов лантана и самария на фотосинтезирующие системы растений, структуру и функции цитоплазматических мембран, метаболизм гормонов, активность ферментов, водный обмен [3, 4].

Интерес к этим ультрамикроэлементам вызван еще и тем, что наша страна располагает практически неограниченными возможностями по их применению за счёт месторождений и использования отходов промышленности [5, 6].

В данной статье приводится обзор современной литературы по вопросам влияния РЗЭ на рост и развитие растений, поглощение питательных элементов и их метаболизм, ассимиляции лантаноидов в растениях, показаны экспериментально полученные во ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова результаты скрининга хелатов РЗЭ. В лабораторном опыте установлены диапазоны оптимальных концентраций, закономерности их воздействия на всхожесть, энергию прорастания, биометрические показатели проростков пшеницы.

1. Влияние лантаноидов (РЗЭ) на рост и развитие растений. Лантаноиды (лантаниды) – семейство редкоземельных элементов (металлов), входящих в третью группу, побочную подгруппу шестого периода Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Данное семейство представлено элементами с близкими ионными радиусами, схожим строением внешней электронной оболочки, что обуславливает близкие, преимущественно металлические, химические свойства. Близость химических свойств этих элементов делает задачу их разделения трудно выполнимой [1].

Редкоземельные элементы в почвах и растениях содержатся в концентрациях заметно меньших, чем широко известные микроэлементы, относятся к числу ультрамикроэлементов, входящих в состав растительных и животных организмов величиной менее 10^{-6} . Единичные работы исследователей нашей страны и КНР подтверждают положительное влияние РЗЭ на рост, развитие, продуктивность и качество продукции почти 30 видов сельскохозяйственных культур.

Наиболее масштабные исследования лантаноидов проводились в Китае, и гораздо меньшая часть выполнена в западных странах, преимущественно в Австралии, Германии и США [7]. Вопрос об эффективности применения лантаноидов под сельскохозяйственные культуры остаётся крайне малоизученным. Результаты многих исследований зачастую противоречивы, а степень проявления положительного или отрицательного влияния лантаноидов, по всей видимости, зависит от культуры, доз их внесения и почвенных свойств. Сложное взаимодействие факторов сильно затрудняет интерпретацию результатов исследований.

Были получены данные о положительном влиянии лантана на ускорение прорастания и рост овощных культур, отмечено усиление развития корневой системы, особенно у томата [8]. Исследователи указывают, что под влиянием лантана активнее развивалась корневая система огурца и увеличивалась длина корней [9]. Обработка растений риса 0,01-0,03%-ным раствором смеси лантаноидов стимулировала корнеобразование и повышала сухую массу корней на 36,7%. Высокие концентрации лантаноидов – более 5 мг/л оказывали негативный эффект на образование корней [9]. В гидропонике использование раствора 0,09 мг La^{3+} /л увеличивало рост корней кукурузы на 36 %, концентрация 0,026 мг La^{3+} /л увеличила рост корней фасоли на 21 %.

В обзорной статье [10] отмечается, что РЗЭ в растениях при физиологическом взаимодействии с кальцием влияют на структуру и функции цитоплазматической мембраны, фотосинтез, метаболизм гормонов, активность ферментов и водный обмен. Показано, что РЗЭ в большей степени концентрировались в корнях. Урожай сельскохозяйственных культур, в том числе кукурузы, повышался на 17-24%. При этом авторы подчеркивают, что отзывчивость растений на РЗЭ и причины стимулирования их роста все ещё мало изучены [7].

Лантаниды активно взаимодействуют с белками, связывающими кальций, активизируют биологический цикл азота, в окислительных условиях усиливается нитрификация, в восстановительных – аммонификация [6, 11].

Имеются исследования по влиянию редкоземельных элементов на процессы трансформации азота в почве: микроудобрение, содержащее лантан, оказывает пролонгированное положительное действие на нитрификационную активность почвы [12, 13].

В 39 полевых опытах в 90% случаев наблюдалось увеличение урожайности пшеницы в среднем на 7,5% после внесения лантаноидов в почву из расчёта 2 мг/кг [7].

Лабораторные исследования эффективности лантаноидов микроудобрений проводили в Бурятии [14]. В исследованиях Бурятской ГСХА установлено, что синтез

углерода органического вещества в листьях кукурузы наиболее активен в фазе выметывания метелки в 0,01%-ном растворе лантана. Прибавка урожая надземной массы по сравнению с контролем была выше на 25%, а по сравнению с намачиванием в воде – на 16% [3].

Учёные использовали сульфаты лантанидов и цеолиты, насыщенные лантанидами. В отличие от практики в Китае, Бурятии в лабораторных опытах вносят Ln в почву, если она обеднена подвижными формами. Обнаружено изменение (хотя и незначительное) различных биохимических показателей. Наиболее заметный эффект – это усиление биологической активности почвы, что отражается в минерализации органического вещества. В результате ускоряется разложение целлюлозы и меняется азотный режим почвы за счет активизации нитрификации и нитроаккумуляции [24].

В ряде исследований отмечается, что внесение соли La активизировало микробиологическую активность за очень короткий срок. Установлено, что применение лантансодержащих микроудобрений в виде соли сульфата лантана и лантана в сочетании с цеолитом способствовало усилению микробиологической активности каштановой почвы, увеличивая общую численность как микроорганизмов, так и актиномицетов, грибов и дрожжей [25].

2. Ассимиляция лантаноидов (РЗЭ) и их биодоступность для растений. Процесс поступления лантаноидов в растения достаточно сложен. Известно, что несмотря на однородность и схожесть между собой внутри семейства, ряд химических свойств лантаноидов, таких как растворимость солей, константы устойчивости различных комплексов, достаточно сильно различаются. Это обусловлено постепенным уменьшением атомного радиуса в ряду вследствие лантаноидного сжатия. Различия в химических свойствах в теории должны обуславливать возникновение явления фракционирования растениями – преимущественного поглощения корнями одних лантаноидов по сравнению с другими [2].

Способности растений поглощать лантаноиды корнями из почвы посвящено множество исследований [7, 15, 16]. Основные выводы: внесение азота и калия способствует усилению поглощения лантаноидов, внесение фосфора, наоборот, оказывает антагонистический эффект. Кроме того, на доступность лантаноидов в значительной мере влияют присутствующие в почве хелатирующие молекулы.

Предполагается, что лантаноиды поглощаются корнями в форме ионов. При этом первым барьером на пути движения ионов лантаноидов оказывается клеточная стенка. Существование отрицательно заряженных функциональных групп в составе полимеров клеточной стенки обуславливает наличие у неё выраженных катионообменных свойств по отношению к окружающему раствору. Отрицательный заряд функциональных групп удерживает на себе положительно заряженные ионы лантаноидов, что тормозит их движение и резко снижает концентрацию непосредственно около клеточной стенки [17].

Довольно долго предполагали, что лантаноиды могут поглощаться исключительно корнями, однако в итоге была подтверждена возможность листовой ассимиляции [18]. В работе [19] показана способность гиацинта усваивать церий через устьица и кутикулу. После поглощения церий распределяется в следующем порядке:

листья > стебель > корень. При этом листья аккумулируют до 50% всего церия.

Количество лантаноидов, которое растения способны поглотить, зависит от их биодоступности в почве. Доступность лантаноидов сильно зависит от почвенных свойств, таких как pH, ёмкость катионного обмена, содержания и характера органического вещества, а также присутствия низкомолекулярных органических кислот в ризосфере. Наиболее доступны водорастворимые и обменные формы лантаноидов. Фракция лантаноидов, связанная с карбонатами, рассматривается как относительно доступная. Подкисление среды приводит к растворению карбонатов и переходу их в почвенный раствор [7].

3. Влияние лантаноидов на поглощение питательных элементов и их метаболизм в растениях. Степень влияния лантаноидов на азотное питание, по-видимому, в значительной степени зависит от способа использования. Усиление поглощения азота после применения лантана наблюдается у хлопка в почвенной культуре [20]. Также отмечена интенсификация потребления азота у пшеницы на фоне применения смеси нитратов лантаноидов как в почвенной культуре [21], так и в полевых опытах [22]. Обработка семян нитратами лантаноидов позволила увеличить содержание азота в кукурузе на 37,4% [23]. Отмечается также положительное влияние лантаноидов на трансформацию растениями минерального азота в органический [24].

Испытания на огурце, сое, маше, табаке и других культурах показали, что применение лантаноидов усиливает поглощение фосфора [26]. Отмечено усиление поглощения фосфора рисом на 12% [27], пшеницей на 10,9-12,3% [28]. После опрыскивания всходов томата раствором 5 мг/л хлорида церия содержание фосфора в них возрастало на 10,34% [29]. При этом наблюдалось позитивное влияние лантаноидов на рост корней, что приписывалось улучшению фосфорного питания [26].

Во многих исследованиях отмечается положительное влияние лантаноидов на калийное питание. В опытах на рисе показано повышение интенсивности адсорбции калия на 8,5% после применения смеси лантаноидов [27]. В опытах на пшенице с почвенным внесением лантана происходит усиление адсорбции на 10-14% [30]. Опрыскивание рапса раствором, содержащим неодим, привело к перераспределению калия непосредственно внутри растения и накоплению его в тех частях, которые подверглись обработке [31]. Способность хлорида церия повышать содержание калия отмечена для томата [29].

Помимо влияния на усвоение элементов питания лантаноиды изменяют их метаболизм. Для томата и арахиса показано увеличение активности нитратредуктазы после опрыскивания раствором, содержащим смесь лантаноидов [32]. Обработка семян пшеницы смесью лантаноидов позволила повысить активность нитратредуктазы на 37-75%, что привело к увеличению урожая на 15,52% [33]. Также есть исследования, в которых отмечается положительное влияние лантаноидов на жизнедеятельность клубеньков у бобовых и усиление ими фиксации азота [25].

Применение лантаноидов влияет на аминокислотный состав. Обработка огурца хлоридом лантана в дозе 5 мкмоль/л повысила содержание глутамина на 66%, аланина на 68% [7].

4. Влияние лантаноидов на всхожесть, энергию прорастания, биометрические показатели проростков. Отзывчивость различных сельскохозяйственных культур на применение редкоземельных элементов, стимулирование ими роста и плодоношения создает предпосылки для детального изучения их влияния на растения.

Известны результаты некоторых лабораторных экспериментов. В работе [34] изучено влияние лантаноидов на проростки сахарной свёклы в водной культуре. Показано, что применение лантаноидов в концентрации от 0,01 до 0,1% позволяет стимулировать удлинение корней в 48% случаев и рост надземных органов в 32% случаев. При этом в 55% случаев отмечался прирост биомассы. Увеличение концентрации рабочего раствора дало отрицательный эффект.

Анализ литературных источников показал, что важный фактор повышения использования лантаноидов в сельскохозяйственном производстве России – это совершенствование препаративных форм удобрений, содержащих РЗЭ, с целью повышения усвояемости лантаноидов растениями. В вегетационных опытах в сосудах установлено, что добавление ЭДТА значительно усиливает десорбцию лантаноидов с поверхности почвенных частиц [35], увеличивая количество лантаноидов в растворе. При этом с увеличением количества добавленного ЭДТА возрастает количество лантаноидов не только в корнях, но и в надземной биомассе. Это свидетельствует о том, что лантаноиды способны поглощаться растениями не только в форме ионов, но и в форме органических комплексов [35]. В дальнейшем было показано, что другие комплексоны, например низкомолекулярные органические кислоты или фульвокислоты, способны повышать доступность лантаноидов за счёт активации процессов десорбции [36].

Выполненный анализ послужил основанием для проведения лабораторного опыта в 2022 г. во ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова с целью изучения закономерностей воздействия лантаноидов на всхожесть, энергию прорастания, биометрические показатели проростков, установления диапазона оптимальных концентраций хелатов РЗЭ.

5. Результаты лабораторного скрининга хелатов ЭДТА редкоземельных металлов. Изучение влияния биологически активных веществ на рост и развитие растений начинается с определения оптимальных концентраций при обработке семян. Повышение энергии прорастания и всхожести семян – ключевая задача при исследовании новыми препаратами. От её успешного решения зависит эффективность применения в процессе вегетации растений различных агротехнических приёмов.

Методика. Опыты, направленные на установление оптимальной концентрации растворов исследуемых препаратов для предпосевной обработки семян, а также изучение воздействия их на всхожесть семян и интенсивность прорастания проводили в лаборатории испытаний элементов агротехнологий, агрохимикатов и регуляторов роста растений ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова в 2022 г. на яровой пшенице сорта Три-зо.

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,

разработанных совместно с МГУ. Для обработки семян использовали растворы, приготовленные путём последовательного разведения маточных растворов хелатов лантаноидов, имеющих содержание действующего вещества 0,36 моль/л каждый.

Семена проращивали в чашках Петри на фильтровальной бумаге в термостате при $t=25^{\circ}\text{C}$. В каждую чашку раскладывали по 50 семян, обработанных дистиллированной водой (контрольный вариант) и растворами испытуемых препаратов (опытные варианты). Повторность опыта – 4-кратная. Экспозиция обработки семян – 1 ч.

Проводили два учета прорастания семян: при первом учете (на 3-е сутки) определяли энергию прорастания, при втором (на 7-е сутки) – всхожесть семян. К числу всхожих семян относили те, которые дают росток и нормальное развитие корешка. При этом главный корешок по длине должен быть не меньше семени, а росток – не меньше половины семени.

Кроме того, определяли интенсивность прорастания семян по длине корешков и ростков, массе проростков. Установленные на основании лабораторного скрининга на уровне проростков (лабораторный опыт) оптимальные концентрации растворов исследуемых РЗЭ послужили основанием для постановки микрополевых опытов.

Схема опыта:

1. Контроль – обработка водой. 2. La хелат ЭДТА 0,01*; 3. La хелат ЭДТА 0,1*; 4. La хелат ЭДТА 1*; 5. La хелат ЭДТА 10*; 6. Y хелат ЭДТА 0,01*; 7. Y хелат ЭДТА 0,1*; 8. Y хелат ЭДТА 1*; 9. Y хелат ЭДТА 10*; 10. Er хелат ЭДТА 0,01*; 11. Er хелат ЭДТА 0,1*; 12. Er хелат ЭДТА 1*; 13. Er хелат ЭДТА 10*; 14. Ho хелат ЭДТА 0,01*; 15. Ho хелат ЭДТА 0,1*; 16. Ho хелат ЭДТА 1*; 17. Ho хелат ЭДТА 10*.

* мкмоль/л.

Результаты исследований и их обсуждение. На первых этапах онтогенеза растений, начиная с прорастания семян и роста проростков, происходят наиболее заметные, существенные и принципиальные изменения в полисахаридном составе растений. Наиболее перспективным приемом активизации биологических процессов, происходящих в семени, является их обработка растворами биологически активных веществ [11-16].

Происходит активация биохимических процессов, увеличивается энергия прорастания семян, улучшается их всхожесть, и как следствие повышается урожайность [12-14].

Это особенно важно в условиях засухи, низких температур, переувлажнения, на тяжелых по гранулометрическому составу почвах из-за недостатка влаги в почве и низкой температуры. В период набухания семян необходимо воздействовать на их начальную фазу развития: для повышения адаптации растений, снижения затягивания появления всходов и их неравномерности.

В таблице представлены результаты определения энергии прорастания и лабораторной всхожести семян пшеницы. Опытные семена имели высокие показатели всхожести: энергия прорастания и лабораторная всхожесть на контроле составила 98,3%, поэтому обработка семян пшеницы яровой хелатами La и Y не показала достоверного влияния на их всхожесть и была на уровне 95-100%.

Влияние лантаноидов на биометрические показатели ростков пшеницы

Вариант	Концентрация		Энергия прорастания	Лабораторная всхожесть	Длина, см		Масса, г	
	мкмоль/л	мг д.в./л	%		корней	ростков	корней	ростков
К	0	0	98,3	98,3	12,8±1,9	7,8±1,4	0,88±0,19	0,72±0,05
La	0,01	0,001	100,0	100,0	14,1±2,0	8,4±1,1	1,02±0,13	0,73±0,05
La	0,1	0,014	100,0	100,0	13,9±3,2	9,0±1,3	1,09±0,08	0,73±0,04
La	1	0,136	95,0	93,3	12,0±2,7	8,0±1,9	1,15±0,06	0,71±0,02
La	10	1,359	98,3	98,3	13,5±3,1	8,9±1,3	1,02±0,09	0,67±0,01
Y	0,01	0,001	98,3	98,3	13,6±1,6	9,3±2,1	1,11±0,11	0,75±0,04
Y	0,1	0,009	95,0	95,0	14,0±2,2	8,5±1,0	1,07±0,20	0,69±0,11
Y	1	0,089	100,0	100,0	13,8±3,6	9,4±1,6	1,03±0,16	0,83±0,07
Y	10	0,889	98,3	98,3	15,0±2,8	9,4±1,5	1,10±0,17	0,78±0,03
Er	0,01	0,002	88,3	91,7	11,5±5,2	7,1±3,0	1,07±0,08	0,85±0,06
Er	0,1	0,017	88,3	93,3	14,9±2,8	7,4±1,9	0,93±0,09	0,71±0,04
Er	1	0,167	93,3	98,3	14,9±2,7	8,1±2,1	1,32±0,20	0,79±0,03
Er	10	1,673	98,2	98,2	15,3±1,8	6,8±1,7	1,05±0,06	0,74±0,04
Ho	0,01	0,002	85,0	91,7	15,6±3,1	7,0±2,3	1,25±0,05	0,75±0,03
Ho	0,1	0,016	61,7	73,3	14,8±3,3	7,3±1,9	1,41±0,18	0,74±0,08
Ho	1	0,165	91,7	93,3	15,4±2,2	7,7±2,0	1,09±0,04	0,79±0,05
Ho	10	1,649	80,0	86,7	16,2±3,4	8,0±1,8	1,17±0,11	0,77±0,02

ЭДТА Er в концентрациях 0,01-1 мкмоль/л незначительно понизил жизнеспособность семян: энергия прорастания и лабораторная всхожесть снизились до 88,3-93,3%. Обработка семян растворами ЭДТА Ho привела к выраженному ухудшению всхожести семян при использовании всех концентраций. Наиболее существенное снижение отмечено в варианте с применением рабочего раствора ЭДТА Ho – 0,016 мг Ho/л (1 мкмоль/л), где энергия прорастания составила 67,7%, а лабораторная всхожесть – 73,3%.

Важными показателями силы роста и биологической эффективности новых препаратов являются высота роста и длина корня. Однако иногда на них неоднозначное влияние оказывают увлажненность среды и близость между растениями. Сырая масса растений в этом случае оказывается более объективным показателем.

Обработка семян растворами хелатов всех элементов в целом оказала положительное влияние на развитие корневой системы проростков пшеницы. Длина корней в большинстве вариантов в среднем превышала значения на контроле на 1-3 см, за исключением вариантов с применением раствора ЭДТА La в концентрации 1 мкмоль/л и ЭДТА Er 0,002 в концентрации 0,01 мкмоль/л. Наибольшие значения линейного прироста корней отмечены в вариантах с применением максимальной дозы ЭДТА Y и всех концентраций ЭДТА Er и Ho.

Масса корневой системы пшеницы также показала выраженный прирост на фоне обработок семян хелатами редкоземельных элементов. При средней массе корневой системы на контроле 0,88 г применение ЭДТА La и Y дало приращение массы в среднем до 1,02-1,15 г. Максимальный прирост корневой системы отмечен в вариантах с применением ЭДТА Er в концентрации 1 мкмоль/л и ЭДТА Ho – 0,1 мкмоль/л. Значения масс составили, соответственно, 1,32 и 1,41 г.

Влияние хелатов редкоземельных элементов на рост вегетативных надземных органов проростков пшеницы имеет несколько иной характер. Обработка семян растворами ЭДТА La и Y привела к увеличению длины ростков в среднем на 0,3-1,7 см по отношению к контролю, где средняя длина составляла 7,8 см. При этом

применение ЭДТА Y дало несколько более выраженный эффект, чем ЭДТА La.

Обработка семян ЭДТА Er и Ho во всех концентрациях привела к снижению линейных размеров ростков на 0,1-0,9 см. Более низкие концентрации рабочих растворов показали более выраженный негативный эффект.

Влияние хелатов лантаноидов на массу ростков пшеницы менее выражено, чем на длину. В целом все виды хелатов не привели к существенным изменениям массы надземных вегетативных органов, кроме ЭДТА Y, где на фоне концентраций 0,089-0,889 мг Y/л (1-10 мкмоль/л) отмечено увеличение массы ростков до 0,78-0,82 г и низкой дозировки ЭДТА Er 0,002 мг/л (0,01 мкмоль/л), где масса увеличилась до 0,85 г. Значение на контроле составило 0,72 г. Необходимо отметить, что применение хелата La в высокой дозировке привело к некоторому снижению массы проростков до 0,67 г.

Выводы. Оценивая в целом проведенный скрининг, необходимо отметить разнонаправленное действие лантаноидов. Если принимать достоверное повышение представленных в таблице показателей за +, то максимальное количество 5+ получит вариант с использованием Y в дозе 1 мкмоль/л. В вариантах этого же элемента в дозах 0,001 и 10 мкмоль/л получили четыре достоверных результата. Поэтому в наших исследованиях ЭДТА Y оказался наиболее перспективным для дальнейших исследований.

Варианты, в которых наблюдали по три положительных отклика – La в дозе 1 мкмоль/л и Er – 10 мкмоль/л. Остальные варианты показали 1-2 положительных или отрицательных результата.

Оценка литературных источников и собственные данные показывают, что РЗЭ оказывают неоднозначное влияние на рост и развитие растений. Необходим тщательный анализ при подборе вариантов, начиная со скрининга и дальнейших пошаговых исследований. Проведенные исследования выявили большой потенциал РЗЭ для включения их в рецептуру современных комплексных удобрений.

Литература

1. Водяницкий Ю.Н. Лантаниды почвы и их влияние на растения / Ю.Н. Водяницкий // Агрохимия. – 2012. – № 4. – С. 84-96.

2. Гринвуд Н. Химия элементов / Н. Гринвуд, А. Эрншо. Т. 2. – М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2021. – 684 с.
3. Коновалов С.Н. Влияние органо-силиконового смачивателя Сильвет Голд на эффективность некорневой обработки лантаном растений смородины черной / Коновалов, Д.Д. Дебелова, В.В. Бобкова // Агрохимия. – 2019. – № 9. – С. 84-90.
4. Коновалов С.Н. Влияние редкоземельных элементов на адаптивность растений яблони / С.Н. Коновалов // Плодоводство и ягодоводство России. – 2011. – Т. 28. – № 1.
5. Наумов А.В. Обзор мирового рынка редкоземельных металлов / А.В. Наумов // Цветная металлургия. – 2008. – № 2.
6. Савельева И.Л. Редкоземельная промышленность России: Современное состояние, ресурсные условия развития / И.Л. Савельева // География и природные Ресурсы. – 2011. – № 1.
7. Redling K. Rare Earth Elements in Agriculture with Emphasis on Animal Husbandry / K. Redling Google-Books-ID: NgzonAAACAAJ. – München: DVG-Service, 2006. – 326 p.
8. Rare earth elements in biological systems / P.H. Brown [et al.] // Gschneidner Jr. K. A., Eyring, L. Roy (Eds.), Handbook on the physics and chemistry of rare earths. – Amsterdam, Oxford: Elsevier North-Holland, 1990. – Vols. 13, 92, 423-453.
9. Rare Earth Element Research and Applications in Chinese Agriculture and Forest / B.K. Xiong [et al.]. – Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
10. 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.
11. Пигарева Н.Н. Влияние лантаносодержащих микроудобрений на нитрификационную способность почв криолизоны Забайкалья / Н.Н. Пигарева, Н.М. Кожевникова // Агрохимия. – 2009. №2 – С. 11-17.
12. 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.Р. Филиппова. – 2008. – № 2 (11).
13. Чемитдоржиева И.Б. Влияние лантана на биологическую активность и экологическую устойчивость аммонифицирующих и нитрифицирующих микроорганизмов в вегетационных опытах / И.Б. Чемитдоржиева, И.Б. Цыдыпов, Н.Е. Абашеева // Агрохимия. – 2009. – № 3. – С. 60-65.
14. Liu M. La3+ uptake and its effect on the cytoskeleton in root protoplasts of Zea mays L. / M. Liu, K.H. Hasenstein // Planta. – 2005. – Vol. 220. – № 2. – P. 658-666.
15. Research of the entry of rare earth elements Eu3+ and La3+ into plant cell / Y.S. Gao [и др.] // Biological Trace Element Research. – 2003. – Т. 91. – С. 253-265.
16. Cosgrove, D.J. Assembly and enlargement of the primary cell wall in plants / D.J. Cosgrove. // Annual Review of Cell and Developmental Biology. – 1997. – Vol. 13. – № 171-201.
17. The effect of cerium (III) on the chlorophyll formation in spinach / H. Fashui [et al.] // Biological Trace Element Research. – 2002. – Vol. 89. – № 3. – P. 263-276.
18. Rare earth elements in plasma membranes of cells of soybean roots / B. Huang [et al.] // Journal of Chinese rare earth society. – 2001. – Vol. 22. – № 3. – P. 56-58.
19. Zhu W.M. Effects of REEs on nutrient absorption of rice / W.M. Zhu // Rare Metals. – 1986. – Vol. 5. – P. 6-10.
20. Zhu W.M. Zhu and Hu, 1988 / W.M. Zhu, Z.Y. Hu // Proceedings of International Symposium on W-Ti-RE-Sb, 15. – 18. May 1988. – Baotou, China, 1988.
21. Zhu Y.Y. Effects of REEs with enriched La on wheat Nn uptake / Y.Y. Zhu // nuclear agronomical bulletin. – 1992. – Vol. 13. – № 4. – P. 176-178.
22. Cui W.H. Effect of seed dressing using different rate of REEs on physiological index and yield of corn / W.H. Cui, Y.R. Zhao // Chinese Rare Earths. – 1994. – Vol. 15. – № 1. – P. 34-37.
23. 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.
24. Studies effect of application of REEs on the increment of yield in agriculture II. Effect of REEs on physiological metabolism in crops / Z.M. Wu [et al.] // Journal of the Chinese Rare Earth Society. – 1984. – Vol. 2. – № 2. – P. 75-79.
25. The effect of Rare Earth Elements on Nodulation and Nitrogen Fixation of Soybean Plan / Z. Wu [et al.] // Guangxian Xu and Xiao Jimenei, editors, Int Conf on Rare Earth Development and Applications. – Beijing: Science Press, 1985. – Vol. 2. – P. 1515.
26. Ning J.B. Effects of rare earth elements application on day lily / J.B. Ning, S.L. Xiao // Chinese Rare Earths. – 1989. – Vol. 10. – № 5. – P. 52-54.
27. Jie H.G. Effects of REEs on increasing yield and physiology of wheat / H.G. Jie, Z.H. Yu // Journal of Heilongjiang Agricultural Science. – 1985. – Vol. 1. – P. 25-29.
28. Tang X.K. Effects of rare earth elements on plant root growth and activity / X.K. Tang, Z. Tong // Chinese Rare Metal. – 1988. – Vol. 5. – P. 22-24.
29. 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.
30. Wei Y.Z. Mechanism of application of Nd to increase yield of rapeseed / Y.Z. Wei, X.B. Zhou, O.M. Mohamed // Journal of Plant Nutrition and Fertilizers. – 1999. – Vol. 5. – № 2. – P. 186-188.
31. Rare Earths in Agriculture / B. Guo [et al.]. – Beijing: Agricultural Scientific Technological Press, 1988. – 23-208 p.
32. Yang J.P. Effects of REE on increasing adversity tolerance in wheat / J.P. Yang, S.Y. Zhang // Journal of Chinese rare earth society. – 1986. – Vol. 4. – № 4. – P. 67-71.
33. Feng J.Z. Effects of REEs on growth and yield of sugar beet / J.Z. Feng // Journal of Xinjiang Agriculture Science. – 1987. – Vol. 1. – P. 12-17.
34. The effect of EDTA on Rare Earth Elements Bioavailability in Soil Ecosystem / L. Yang [et al.] // Chemosphere. – 1999. – Vol. 38. – № 12. – P. 2825-2833.
35. Effects of fulvic acid on bioavailability of rare earth elements and GOT enzyme activity in wheat (Triticum aestivum) / G. Zhimang [et al.] // Chemosphere. – 2001. – Vol. 44. – № 545-551.

THE INFLUENCE OF RARE EARTH ELEMENTS ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF WHEAT PLANTS IN THE INITIAL PERIODS OF DEVELOPMENT

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

The review article presents experimental data on the positive effect of low doses of lanthanides on the development of a number of plants: increased activity of antioxidant enzymes in plant leaves; resistance to heavy metals; to environmental stress factors; adaptability. At the same time, the effect was not widespread, which is explained by insufficient knowledge of the properties. The analysis served as the basis for a laboratory experiment in 2022 at the D.N. Pryanishnikov VNIIA, in order to study the patterns of their effect on germination, germination energy, biometric indicators of seedlings, and to establish the range of optimal concentrations of REE chelates on wheat seedlings. In general, the screening showed a multidirectional effect of lanthanides. The highest rates were observed when using Y at a dosage of 1 mmol/L ; 0.001 and 10 mmol/L. EDTA Y turned out to be the most promising for further studies. Studies show the great potential of REE to include them in the formulation of modern complex fertilizers.

Keywords: lanthanides, spring wheat, pre-sowing seed treatment, germination, germination energy.