

УДК 2788

НАНОУДОБРЕНИЯ – ИСТОЧНИКИ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ***Шумейко С.А.****Младший научный сотрудник**Институт общей физики им. А.М.Прохорова**Москва, Россия***Аннотация**

Один из основных способов увеличить производство сельскохозяйственных культур — использование удобрений. В последние десятилетия активно развиваются нанотехнологии, поэтому всё чаще рассматривается возможность применения в сельском хозяйстве наноудобрения — альтернативу классическим минеральным удобрениям.

В данном обзоре собрана общая информация об эффективности использования наноудобрений в качестве источника основных макроэлементов (азота, фосфора, калия, кальция, магния и серы) для сельскохозяйственных культур за последнее десятилетие.

Ключевые слова: Наноудобрения, наночастицы, макроэлементы, питательные вещества, удобрения, сельское хозяйство.

NANOFERTILIZERS - SOURCES OF MACRONUTRIENTS***Shumeyko S.A.****Junior Researcher**Institute of General Physics named after A.M.Prokhorov A.M.Prokhorov Institute of General Physics**Moscow, Russia*

Abstract

One of the main ways to increase crop production is to use fertilizers. In recent decades, nanotechnology has been actively developed, so the possibility of using nanofertilizers - an alternative to classical mineral fertilizers - in agriculture is increasingly being considered.

In this review, general information on the effectiveness of the use of nanofertilizers as a source of basic macronutrients (nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium and sulfur) for crops over the last decade.

Keywords: Nanofertilizers, nanoparticles, macronutrients, nutrients, fertilizers, agriculture.

Введение

Наноудобрения – это наноматериалы, содержащие необходимые для растений питательные макро- и/или микроэлементы, или используемые в качестве наноносителей для обычных химических удобрений, тем самым помогая удобрениям эффективно доставлять питательные вещества.

Доказано, что наноудобрения сравнительно эффективнее обычных химических удобрений благодаря особым механизмам действия, которые способны повысить эффективность их использования, снизить потери питательных веществ и минимизировать ухудшение состояния окружающей среды.

Наноудобрения, направленные на доставку макроэлементов, химически состоят из одного или нескольких наноразмерных макроэлементов, необходимых культурным растениям для различных метаболических процессов роста и развития, а также для смягчения стрессовых реакций [1].

Традиционно, к растительным макроэлементам относят азот (N), фосфор (P), калий (K), кальций (Ca), магний (Mg) и серу (S) [2].

Научный интерес к возможности применения наночастиц в качестве удобрений для доставки макроэлементов растениям вырос в несколько раз за последние 10 лет. Анализ опубликованных результатов исследований показал, что основная часть работ посвящена наноудобрениям, содержащим азот, являющийся ключевым элементом, необходимым для роста растений. Подробное описание эффективности применения наноудобрений для доставки каждого из главных макроэлементов (N, P, K, Ca, Mg, S) представлены в соответствующих подразделах.

Потребность культурных растений в макроэлементах возрастает по мере увеличения спроса на большее количество продуктов питания для постоянно растущего населения мира. Ожидается, что к 2050 году потребность в макроэлементах увеличится до 263 млн тонн [3]. Чтобы уменьшить количество вносимых удобрений, наносящих вред окружающей среде, были предложены наноудобрения, имеющие повышенную эффективность применения по сравнению с обычными химическими удобрениями. Разработанные наноудобрения, содержащие макроэлементы, постоянно совершенствуются учеными и техническими специалистами по всему миру, а их применение позволяет добиться более высоких показателей роста и продуктивности сельскохозяйственных культур. Таким образом, наноудобрения с макроэлементами призваны не только повысить эффективность сельскохозяйственного производства, но и снизить производственные затраты, и, как следствие, являются экономичной альтернативой существующим традиционным удобрениям. Подробное описание наноудобрений в контексте каждого ключевого макроэлемента для растений (N, P, K, Ca, Mg, S) приведено в соответствующих разделах ниже.

Целями данного литературного исследования являются :

1. Изучение эффективности применения наноудобрений для доставки макроэлементов (азот, фосфор, калий, кальций, магний, сера) в сельскохозяйственные культуры.
2. Сравнение наноудобрений с традиционными минеральными удобрениями в контексте повышения урожайности и снижения экологической нагрузки.
3. Анализ возможностей снижения количества вносимых удобрений за счет использования наноудобрений при сохранении или повышении эффективности сельскохозяйственного производства.

Задачами данной работы являются:

1. Рассмотреть преимущества и механизмы действия наноудобрений по сравнению с традиционными удобрениями.
2. Изучить применение наноудобрений для доставки основных макроэлементов, таких как азот, фосфор, калий, кальций, магний и сера.
3. Оценить влияние наноудобрений на рост и продуктивность сельскохозяйственных культур.
4. Исследовать роль наноудобрений в снижении потерь питательных веществ и минимизации воздействия на окружающую среду.
5. Обобщить научные данные и результаты исследований по применению наноудобрений для различных культур и почвенных условий.

Наноудобрения-источники азота

Азот является наиболее важным питательным веществом, участвующим во многих процессах жизнедеятельности культурных растений. Однако, широко используемые минеральные азотные удобрения имеют существенный недостаток – больше половины поступающего азота

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

теряется в окружающей среде [4]. Для повышения эффективности его использования были применены различные стратегии, среди которых особое место занимают азотные наноудобрения [5]. Например, медленное высвобождение азота наблюдалось при нанесении мочевины (аммония) на цеолитовую крошку [6]. Аналогичным образом, модифицированные мочевиной наночастицы гидроксиапатита были инкапсулированы под давлением в полости мягкой древесины *Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud. и были протестированы на медленное и устойчивое высвобождение азота в почву. Интересно, что поступление азота с помощью этой стратегии было признано оптимальным до 60 дней по сравнению с обычными азотными удобрениями, которые обеспечивали более интенсивное поступление азота в растения вначале и очень низкое на более поздней стадии до 30 дней [5].

Замена традиционного использования азотных минеральных удобрений на нанозаменители в последнее время демонстрирует эффективность в обеспечении высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Например, применение наночастиц на основе хитозана в качестве замены минеральных азотных удобрений доказало свою эффективность при выращивании мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.). При этом показатели урожайности при использовании этих наноудобрений в концентрации 14 л/га не уступали результатам от внесения минеральных удобрений в дозе 240 кг/га. Таким образом, наноудобрения позволяли, если не полностью заменить минеральные удобрения, то сократить их внесение, что способствует снижению экологической нагрузки на окружающую среду и вносит определённый вклад в развитие устойчивого сельского хозяйства. [7].

В исследованиях, посвященных использованию наночастиц аморфного фосфата кальция, обогащенных мочевиной (U-ACP), для повышения роста и урожайности твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.), было установлено, что показатели урожайности и качества растений, обработанных

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

наноудобрениями (15 кг/га U-АСР + 60 кг/га гидрофосфата диаммония), соответствовали результатам, полученным при применении стандартного протокола с использованием минеральных удобрений (150 кг/га гидрофосфата диаммония). Однако содержание азота в растениях было несколько ниже (на 40%), а количество зерен в колосе увеличилось, хотя их размер был мельче по сравнению с результатами стандартного протокола. Это связано с лучшей доступностью азота в наноудобрении, что положительно влияет на количество образующихся соцветий и завязывающихся зерен [8; 9]. Обработка растений огурца (*Cucumis sativus* L.) U-АСР в концентрации азота, эквивалентной половинной концентрации вносимой в контрольном варианте мочевины, показали лучшие результаты по усвоению азота, при этом не наблюдалось значительных изменений в накоплении биомассы и хлорофилла [10]. В опытах отмечалось повышенное накопление кальция и фосфора в растениях, так как в состав данного наноудобрения также входит Са и Р, и имеются данные о возможности применения его основы (наночастицы гидроксиапатита) в качестве источника фосфора [11]. Виноград, собранный с растений, обработанных U-АСР, обеспечивал аналогичный повышенным дозам мочевины (6 кг/га) уровень усвояемого дрожжами азота, несмотря на снижение дозы вносимого азота. Концентрация аминокислот при этом была выше, чем в контроле и при внесении 3 кг/га мочевины. Наноудобрения обеспечили высокую концентрацию аргинина в сусле, но снижение пролина по сравнению с внесением 6 кг/га мочевины [12].

U-АСР по сути является многокомпонентным удобрением, но большинство исследователей рассматривают его в качестве азотного. На основе АСР(аморфного фосфата кальция) также разработаны наноU-NPK, обеспечивающие медленное постепенное высвобождение макроэлементов. Применение наноU-NPK позволяет снизить количество поступающего к

растениям азота на 40% по сравнению с внесением минеральных удобрений, не снижая массы полученного урожая [13].

Была также подтверждена эффективность использования так называемых наногибридов мочевины НАU (гидроксиапатит-мочевина) гидроксиапатит-мочевина с добавлением Mg (MgНАU), гидроксиапатит-мочевина с добавлением Zn (ZnНАU), в дозах, составляющих 25 и 50% от количества азота, вносимого в контрольных условиях (мочевина 150 кг/га). Применение этих доз на пшенице (*Triticum aestivum* L.) способствовало улучшению роста и урожайности, повышению усвоения питательных веществ (N, P, K, Ca, Mg, Fe и др.), а также увеличению содержания белка и фосфолипидов в зерне. Таким образом, использование наногибридов позволяет сократить внесение азотных удобрений до 75%, не снижая показатели роста и качества растений. Мочевина из наногибридных удобрений высвобождается постепенно, обеспечивая длительный эффект. Наилучшие результаты с точки зрения агротехники и агрономии были достигнуты при использовании суспензионных наногибридов по сравнению с гранулированными минеральными удобрениями. [14].

НРК-удобрение в нанокompозитной сети из гидрогеля также обеспечивало замедленное высвобождение элементов питания и являлось перспективным для оптимизации использования удобрений и водосбережения в устойчивом сельском хозяйстве [15].

Нанодобрения-источники фосфора

Являясь важным компонентом многих метаболитов и играя ключевую роль во многих метаболических процессах растений, фосфор поступает к культурным растениям через так называемые химические удобрения, из которых только до 15-30% усваивается культурными растениями [16], а остальное фиксируется в почве и/или накапливается в воде, вымываемой

через сток, что в свою очередь, приводит к эвтрофикации. Кроме того, дефицит фосфора уже рассматривается как одна из глобальных проблем, влияющих на экологические изменения и продовольственную безопасность [17]. Нанотехнологии могут сыграть решающую роль в повышении эффективности использования фосфора культурными растениями и снижении экологических угроз. В последнее десятилетие наночастицы фосфата кальция (СаР), особенно нанокристаллический гидроксипатит (nAp - $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) и аморфный фосфат кальция (АСР - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) вызывают большой интерес из-за высокого отношения поверхности к объему, что позволяет обогащать их мочевиной или нитратами [18]. Наночастицы гидроксипатита (НА, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$), синтезированные с использованием одностадийного мокрого химического метода, сравнивались с обычными минеральными фосфорными удобрениями на предмет их роли в увеличении роста растений и урожайности. В качестве тестовой культуры в тепличных условиях использовали сою (*Glycine max* L.). Наблюдалось значительное увеличение скорости роста (на 33%) и урожайности семян сои (на 20%) по сравнению с обычными химическими фосфорными удобрениями благодаря одновременному внесению кальция и фосфора [19].

Кроме того, наночастицы НА имели более слабое взаимодействие с компонентами почвы по сравнению с обычными химическими фосфорными удобрениями. Они не оказывали фитотоксического действия на скорость прорастания листьев салата (*Lactuca sativa* L.). В другой работе рассматривался синтез наночастиц фосфора биологическим способом с использованием *Aspergillus tubingensis* TFR-5 из трикальцийфосфата ($\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$) [20]. Однако данные наночастицы не испытывали в полевых условиях. Было установлено, что эффективность применения наноудобрений на основе НА зависит от кислотности почвы и поверхностного заряда частиц [21], кроме того, наночастицы НА имеют широкие возможности для

модификации поверхности и создания многокомпонентных и многофункциональных наноудобрений [22].

Наноудобрения-источники калия

Калий является жизненно важным элементом для растений и играет одну из ключевых ролей в обеспечении роста и развития растений, урожайности, а также контролирует ферментативную активность и регулирует работу устьиц. Калий влияет на фотосинтез растений и способность противостоять абиотическому стрессу [23]. Например, биосинтезированные K-NPs (21-30 нм) значительно повысили урожайность, общее содержание белков и фотосинтетических пигментов в пшенице по сравнению с объемным аналогом (K_2SO_4) и контролем (без добавления калия) [24].

В другом исследовании, проведенном Saleem et al., наночастицы феррита калия ($KFeO_2$ -NPs), имеющие размер от 7 до 18 нм, наносились на удобрение диаммонийфосфата (DAP) для оценки высвобождения N, P, K и Fe в суглинистой и глинистой-суглинистой почвах до 60 дней. Результаты показали, что использование DAP с 10%-ным покрытием $KFeO_2$ -NPs обеспечивает контролируемое высвобождение фосфора и минерального азота в течение более длительного периода времени по сравнению с использованием традиционного DAP. Также было увеличено среднее выделение калия и железа за 60 дней при использовании DAP с 10%-ным покрытием $KFeO_2$ -NPs в глинисто-суглинистой почве по сравнению с контролем на $19,7 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ и на $7,3 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ соответственно [25].

Наноудобрения – источники кальция

Кальций участвует во многих метаболических процессах растений, таких как удлинение клеток, укрепление структуры клеточной стенки за счет образования пектата кальция, улучшение функции устьиц, индуцирование

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

белков теплового шока и защита от различных грибковых и бактериальных заболеваний [26]. Кроме того, кальций играет ключевую роль в передаче межклеточных сигналов и для управления системными реакциями всего растения [27].

Liu et al., [28] в качестве удобрений были использованы наночастицы карбоната кальция ($\text{CaCO}_3\text{-NPs}$) с размером 20-80 нм и содержанием Ca 160 мг·л⁻¹. Наночастицы были протестированы для оценки их влияния на урожайность и рост сельскохозяйственных культур путем их добавления в раствор Хогланда. Сравнение происходило с контролем (без добавления кальция) и с растворимым источником Ca в виде $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ([Ca]= 200 мг/л). Результаты показали значительное улучшение качества свежей биомассы арахиса по сравнению с контролем; однако это улучшение было аналогичным в пересчете на сухую массу, по сравнению с внесением $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Поглощение кальция стеблем и корнями растений было увеличено по сравнению с контролем, что делает оправданным тот факт, что Ca-NPs усиливают поглощение кальция и его транспортировку от корня к побегу из-за их высокой площади поверхности для поглощения корневой поверхностью растения в ризосфере. Более того, в том же эксперименте, при совместном применении Ca-NPs и гуминовой кислоты (1 г·л⁻¹) наблюдалось максимальное увеличение сухой массы проростков (на 30% и 14% по сравнению с контролем и обработкой $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ соответственно).

Кроме того, была доказана эффективность применения нанокальция для улучшения качества плодов яблони [29]. В сравнении с обработкой яблонь раствором CaCl_2 , применение нанокальция улучшало хранение плодов, что выражалось в меньшей потере веса по сравнению как с контрольными плодами, так и с плодами после обработки минеральным кальциевым удобрением. Опрыскивание яблонь нанокальцием также приводило к снижению активности ферментов клеточной стенки, таких как

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

PG, PME и β -Gal. Более высокая эффективность нанокальция по сравнению с CaCl_2 может быть объяснена меньшими размерами частиц, что способствует их проникновению в клетки растений, лучшему усвоению и повышенной реакционной способности в отношении клеток растений.

Наноудобрения – источники магния

Магний играет ключевую роль в фотосинтезе, поскольку является важным компонентом хлорофилла, светопоглощающего зеленого пигмента растений, влияет на накопление биомассы, регулирует синтез аминокислот и клеточных белков, поглощение и миграцию фосфора, а также усиливает устойчивость растений к биотическому и абиотическому стрессу за счет стимуляции синтеза защитных веществ и укрепления клеточных стенок [30, 31].

Delfani et al. были проведены исследования влияния комбинированного внекорневого внесения наночастиц магния и железа (Mg-NPs и Fe-NPs, 0,5 г·л⁻¹) на эффективность фотосинтеза черноглазого горошка (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) в полевых условиях [32]. Совместное применение наночастиц магния и железа значительно повысило эффективность фотосинтеза, что в свою очередь улучшило параметры роста (высота, сухая и свежая биомасса растений). Интересно, что применение только наноудобрений привело к количественному снижению урожайности растений (на 8%). Однако авторы наблюдали увеличение поглощения магния в различных тканях растений по сравнению с контролем и обычным магниевым удобрением, что позволяет предположить, что поглощение магния увеличивается при применении Mg-NPs [32]. Установлено, что химический синтез наноматериалов и их применение часто повышают экологическую нагрузку и зеленый синтез дает возможность получать более эффективные наноудобрения и нанопестициды [33].

В другой недавней работе Dubua et al. сообщалось о высокой эффективности обработки растений зеленой фасоли *Phaseolus vulgaris* L. cv. 'Stike' наноудобрением магния. Обработка растений фасоли наноудобрением была наиболее эффективной при использовании концентрации 50 мг/л. Наблюдалось значимое увеличение биомассы, по сравнению с обработкой наноудобрением в других концентрациях, а также при использовании $MgSO_4$. Внесения наномагния в концентрации 50 мг/л также способствовало эффективному увеличению в растениях биоактивных соединений и антиоксидантной способности, по сравнению с внесением $MgSO_4$ [34].

Наноудобрения - источники серы

Сера является составным элементов таких важных соединений как протеины, витамины, аминокислоты (цистин и метионин, глутатион), участвует в процессах образования хлорофилла [35]. В растениях сера может находиться в виде тиоловой группы белков или небелковых молекул, а также в виде серосодержащих малых биомолекул (железосернистые кластеры, молибденовый кофактор и модифицированные серой нуклеотиды) [36]. Сера участвует в обмене азота и железа [37]. Активные формы серы (сероводород, персульфиды и полисульфиды), синтезируемые во всех живых организмах, в основном из цистеина, играют важную роль в окислительно-восстановительной регуляции и реакции стресса [38].

К основным симптомам дефицита серы у растения относят хлороз молодых листьев. Избыток серы приводит также к хлорозу, но он локализуется с краев листьев, которые подворачиваются вовнутрь, а затем некротизируются. Доказано влияние серы на урожайность и качество зерновых культур [39].

Использование порошкообразных и растворенных серосодержащих наноудобрений (20-40 нм) способствует раннему созреванию и повышению

продуктивности пшеницы, а также повышению устойчивости к патогенам [40].

Наночастицы серы, модифицированные стеариновой кислотой, вносимые в почву при выращивании томата (*Solanum lycopersicum* L.), увеличивали массу корней побегов, при этом массовая сера и ионный сульфат не оказывали стимулирующего эффекта. Модифицированные и немодифицированные наночастицы серы значительно улучшали фотосинтез листьев, способствуя линейному потоку электронов, квантовому выходу фотосистемы II и увеличению относительного содержания хлорофилла. Кроме того, модифицированные наночастицы серы увеличивает содержание триптофана, томатицина и скополетина в листьях растений по сравнению с другими обработками [41].

Заключение

Таким образом, использование наноудобрений в сельском хозяйстве может быть весьма перспективным по сравнению с применением «классических» минеральных удобрений.

Ключевые преимущества наноудобрений заключаются в их более выраженном воздействии на рост и урожайность сельскохозяйственных культур, а также в высокой эффективности при использовании меньших доз по сравнению с минеральными удобрениями. Стоит отметить, что минеральные удобрения могут быть экологически небезопасными, нанося вред окружающей среде и способствуя эвтрофикации, накоплению избытка удобрений в почве и грунтовых водах.

Эффект от применения наночастиц и наноматериалов зависит от способа внесения, размера, формы, метода получения и концентрации наночастиц. Несмотря на большое количество сообщений о высокой

эффективности наноудобрений, отмечается недостаток литературных данных по этой теме.

Выводы

Наноудобрения на основе азота эффективнее традиционных минеральных удобрений, так как они обеспечивают медленное и стабильное высвобождение азота, что улучшает его усвоение растениями и снижает потери в окружающую среду.

Применение азотных наноудобрений, таких как наночастицы гидроксипатита и наногибриды мочевины, позволяет сократить количество вносимого азота без снижения урожайности, что способствует устойчивому сельскому хозяйству.

Наноудобрения на основе фосфора помогают решать проблему дефицита фосфора, улучшая усвоение растениями и снижая фиксацию фосфора в почве и водоемах.

Калийные наноудобрения, такие как $KFeO_2$ -NPs, способствуют лучшему контролируемому высвобождению питательных веществ, что увеличивает урожайность и улучшает качество растений.

Наночастицы кальция и магния улучшают усвоение этих элементов, повышают устойчивость растений к стрессам и улучшают качество плодов, что делает их эффективными компонентами наноудобрений.

Наноудобрения на основе серы повышают продуктивность растений и устойчивость к патогенам, улучшая фотосинтез и стимулируя биосинтез важных соединений.

Библиографический список:

1. Mahiwal S., Pandey G. K. Potassium: a vital nutrient mediating stress tolerance in plants // *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*. – 2022. – Т. 31, № 4. – С. 705-719.
2. Hawkesford M. J., Cakmak I., Coskun D., De Kok L. J., Lambers H., Schjoerring J. K., White P. J. Functions of macronutrients // *Marschner's Mineral Nutrition of Plants*, 2023. – С. 201-281.
3. Alexandratos N., Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision // – 2012.
4. Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Anglade J., Garnier J. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland // *Environmental Research Letters*. – 2014. – Т. 9, № 10.
5. Kottegoda N., Munaweera I., Madusanka N., Karunaratne V. A green slow-release fertilizer composition based on urea-modified hydroxyapatite nanoparticles encapsulated wood // *Current science*. – 2011. – С. 73-78.
6. Millán G., Agosto F., Vázquez M., Botto L., Lombardi L., Juan L. Use of clinoptilolite as a carrier for nitrogen fertilizers in soils of the Pampean regions of Argentina // *Cien Inv Agr*. – 2008. – Т. 35, № 3. – С. 293-302.
7. Saad A. M., Alabdali A. Y. M., Ebaid M., Salama E., El-Saadony M. T., Selim S., Safhi F. A., Alshamrani S. M., Abdalla H., Mahdi A. H. A., El-Saadony F. M. A. Impact of Green Chitosan Nanoparticles Fabricated from Shrimp Processing Waste as a Source of Nano Nitrogen Fertilizers on the Yield Quantity and Quality of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars // *Molecules*. – 2022. – Т. 27, № 17.
8. Ramírez-Rodríguez G. B., Miguel-Rojas C., Montanha G. S., Carmona F. J., Dal Sasso G., Sillero J. C., Skov Pedersen J., Masciocchi N., Guagliardi A., Pérez-de-Luque A., Delgado-López J. M. Reducing Nitrogen Dosage in *Triticum durum* Plants with Urea-Doped Nanofertilizers // *Nanomaterials*. – 2020. – Т. 10, № 6.
9. Ferrante A., Savin R., Slafer G. A. Floret development and grain setting differences between modern durum wheats under contrasting nitrogen availability // *Journal of Experimental Botany*. – 2013. – Т. 64, № 1. – С. 169-184.
10. Carmona F. J., Dal Sasso G., Ramírez-Rodríguez G. B., Pii Y., Delgado-López J. M., Guagliardi A., Masciocchi N. Urea-functionalized amorphous calcium phosphate nanofertilizers: optimizing the synthetic strategy towards environmental sustainability and manufacturing costs // *Scientific Reports*. – 2021. – Т. 11, № 1.
11. Marchiol L., Filippi A., Adamiano A., Degli Esposti L., Iafisco M., Mattiello A., Petrusa E., Braidot E. Influence of Hydroxyapatite Nanoparticles on

Germination and Plant Metabolism of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.): Preliminary Evidence // *Agronomy*. – 2019. – Т. 9, № 4.

12. Pérez- Álvarez E. P., Ramírez- Rodríguez G. B., Carmona F. J., Martínez- Vidaurre J. M., Masciocchi N., Guagliardi A., Garde- Cerdán T., Delgado- López J. M. Towards a more sustainable viticulture: foliar application of N- doped calcium phosphate nanoparticles on Tempranillo grapes // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 2020. – Т. 101, № 4. – С. 1307-1313.

13. Ramírez-Rodríguez G. B., Dal Sasso G., Carmona F. J., Miguel-Rojas C., Pérez-de-Luque A., Masciocchi N., Guagliardi A., Delgado-López J. M. Engineering Biomimetic Calcium Phosphate Nanoparticles: A Green Synthesis of Slow-Release Multinutrient (NPK) Nanofertilizers // *ACS Applied Bio Materials*. – 2020. – Т. 3, № 3. – С. 1344-1353.

14. Sharma B., Afonso L. O. B., Singh M. P., Soni U., Cahill D. M. Zinc- and magnesium-doped hydroxyapatite-urea nanohybrids enhance wheat growth and nitrogen uptake // *Scientific Reports*. – 2022. – Т. 12, № 1.

15. Olad A., Zebhi H., Salari D., Mirmohseni A., Reyhani Tabar A. Slow-release NPK fertilizer encapsulated by carboxymethyl cellulose-based nanocomposite with the function of water retention in soil // *Materials Science and Engineering: C*. – 2018. – Т. 90. – С. 333-340.

16. Roy R. N., Finck A., Blair G., Tandon H. Plant nutrition for food security // *A guide for integrated nutrient management*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin. – 2006. – Т. 16, № 368. – С. 201-214.

17. Cordell D., Drangert J.-O., White S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought // *Global Environmental Change*. – 2009. – Т. 19, № 2. – С. 292-305.

18. Carmona F. J., Guagliardi A., Masciocchi N. Nanosized Calcium Phosphates as Novel Macronutrient Nano-Fertilizers // *Nanomaterials*. – 2022. – Т. 12, № 15.

19. Liu R., Lal R. Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*) // *Scientific Reports*. – 2014. – Т. 4, № 1.

20. Tarafdar J., Raliya R., Rathore I. Microbial synthesis of phosphorous nanoparticle from tri-calcium phosphate using *Aspergillus tubingensis* TFR-5 // *Journal of Bionanoscience*. – 2012. – Т. 6, № 2. – С. 84-89.

21. Xiong L., Wang P., Hunter M. N., Kopittke P. M. Bioavailability and movement of hydroxyapatite nanoparticles (HA-NPs) applied as a phosphorus fertiliser in soils // *Environmental Science: Nano*. – 2018. – Т. 5, № 12. – С. 2888-2898.

22. Kottegoda N., Sandaruwan C., Priyadarshana G., Siriwardhana A., Rathnayake U. A., Berugoda Arachchige D. M., Kumarasinghe A. R., Dahanayake D., Karunaratne V., Amaratunga G. A. J. Urea-Hydroxyapatite Nanohybrids for Slow Release of Nitrogen // *ACS Nano*. – 2017. – Т. 11, № 2. – С. 1214-1221.

23. Johnson R., Vishwakarma K., Hossen M. S., Kumar V., Shackira A. M., Puthur J. T., Abdi G., Sarraf M., Hasanuzzaman M. Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2022. – Т. 172. – С. 56-69.
24. Sheoran P., Goel S., Boora R., Kumari S., Yashveer S., Grewal S. Biogenic synthesis of potassium nanoparticles and their evaluation as a growth promoter in wheat // *Plant Gene*. – 2021. – Т. 27.
25. Saleem I., Maqsood M. A., Rehman M. Z. u., Aziz T., Bhatti I. A., Ali S. Potassium ferrite nanoparticles on DAP to formulate slow release fertilizer with auxiliary nutrients // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2021. – Т. 215.
26. White P. J. Calcium in Plants // *Annals of Botany*. – 2003. – Т. 92, № 4. – С. 487-511.
27. Luan S., Wang C. Calcium Signaling Mechanisms Across Kingdoms // *Annual Review of Cell and Developmental Biology*. – 2021. – Т. 37, № 1. – С. 311-340.
28. Liu X.-m., Zhang F.-d., Zhang S.-q., He X.-s., Wang R.-f., Feng Z.-b., Wang Y.-j. Responses of peanut to nano-calcium carbonate // *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*. – 2005. – Т. 11, № 3. – С. 385-389.
29. Ranjbar S., Rahemi M., Ramezani A. Comparison of nano-calcium and calcium chloride spray on postharvest quality and cell wall enzymes activity in apple cv. Red Delicious // *Scientia Horticulturae*. – 2018. – Т. 240. – С. 57-64.
30. Ahmed N., Zhang B., Bozdar B., Chachar S., Rai M., Li J., Li Y., Hayat F., Chachar Z., Tu P. The power of magnesium: unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops // *Frontiers in Plant Science*. – 2023. – Т. 14.
31. Hamedeh H., Antoni S., Cocciaglia L., Ciccolini V. Molecular and Physiological Effects of Magnesium–Polyphenolic Compound as Biostimulant in Drought Stress Mitigation in Tomato // *Plants*. – 2022. – Т. 11, № 5.
32. Delfani M., Baradarn Firouzabadi M., Farrokhi N., Makarian H. Some Physiological Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium Nanofertilizers // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 2014. – Т. 45, № 4. – С. 530-540.
33. Nguyen N. T. T., Nguyen L. M., Nguyen T. T. T., Tran U. P. N., Nguyen D. T. C., Tran T. V. A critical review on the bio-mediated green synthesis and multiple applications of magnesium oxide nanoparticles // *Chemosphere*. – 2023. – Т. 312.
34. Amaya-Olivas N. I., SÁNchez E., HernÁNdez-Ochoa L., Ojeda-Barrios D. L., Ávila-Quezada G. D., Flores-CÓrdova M. A., ChÁvez-Flores D., Ayala-Soto J. G., Salcido-MartÍnez A., RamÍrez-Estrada C. A. Biofortification with magnesium nanofertilizer on bioactive compounds and antioxidant capacity in green beans // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. – 2023. – Т. 51, № 1.

35. Li Q., Gao Y., Yang A. Sulfur Homeostasis in Plants // International Journal of Molecular Sciences. – 2020. – Т. 21, № 23.
36. Nakai Y., Maruyama-Nakashita A. Biosynthesis of Sulfur-Containing Small Biomolecules in Plants // International Journal of Molecular Sciences. – 2020. – Т. 21, № 10.
37. Wawrzyńska A., Sirko A. The Role of Selective Protein Degradation in the Regulation of Iron and Sulfur Homeostasis in Plants // International Journal of Molecular Sciences. – 2020. – Т. 21, № 8.
38. Alvi A. F., Iqbal N., Albaqami M., Khan N. A. The emerging key role of reactive sulfur species in abiotic stress tolerance in plants // Physiologia Plantarum. – 2023. – Т. 175, № 3.
39. Singh B. Sulfur and crop quality-agronomical strategies for crop improvement // COST Action 829 Meetings –, 2003. – С. 15-18.
40. Kurmanbayeva M., Sekerova T., Tileubayeva Z., Kaiyrbekov T., Kusmangazinov A., Shapalov S., Madenova A., Burkitbayev M., Bachilova N. Influence of new sulfur-containing fertilizers on performance of wheat yield // Saudi Journal of Biological Sciences. – 2021. – Т. 28, № 8. – С. 4644-4655.
41. Wang Y., Deng C., Zhao L., Dimkpa C. O., Elmer W. H., Wang B., Sharma S., Wang Z., Dhankher O. P., Xing B., White J. C. Time-Dependent and Coating Modulation of Tomato Response upon Sulfur Nanoparticle Internalization and Assimilation: An Orthogonal Mechanistic Investigation // ACS Nano. – 2024. – Т. 18, № 18. – С. 11813-11827.

Оригинальность 78%