

УДК 57.2788

**ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЦИНКА, МАРГАНЦА И МЕДИ В РАСТЕНИИВОДСТВЕ: ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ****Шумейко Сергей Александрович,**

Младший научный сотрудник

Институт общей физики им. А.М.Прохорова

Москва, Россия

Shumik92@gmail.com

**Аннотация**

В статье представлен обзор роли микроэлементов цинка (Zn), марганца (Mn) и меди (Cu) в физиологии растений и их влияния на рост, развитие и стрессоустойчивость. Особое внимание уделено применению наночастиц этих элементов (ZnO-NPs, Mn-NPs, Cu-NPs) как эффективных источников питания растений. Рассмотрены механизмы усвоения, влияние на фотосинтез, синтез белка и активность ферментов, а также стресспротекторные свойства. Анализируются результаты исследований по дозировкам и способам внесения наночастиц, их влияние на рост, биомассу, урожайность и микробиоту почвы. Выявлены оптимальные концентрации для различных культур, а также возможные негативные эффекты при передозировке. Обзор подчеркивает потенциал нанотехнологий в сельском хозяйстве для повышения эффективности микроудобрений и устойчивости растений к стрессам.

**Ключевые слова:** Наноудобрения, цинк (Zn), марганец (Mn), медь (Cu), фотосинтез, стрессоустойчивость растений, микроэлементы

**APPLICATION OF ZINC, MANGANESE, AND COPPER NANOPARTICLES IN CROP PRODUCTION: A REVIEW OF RECENT STUDIES****Shumeyko Sergey Aleksandrovich,**

Junior Researcher

Prokhorov General Physics Institute

Moscow, Russia

Shumik92@gmail.com

**ABSTRACT**

This article presents a review of the roles of the micronutrients zinc (Zn), manganese (Mn), and copper (Cu) in plant physiology and their effects on growth, development, and stress tolerance. Special attention is given to the use of nanoparticles of these elements (ZnO-NPs, Mn-NPs, Cu-NPs) as efficient sources of plant nutrition. The mechanisms of uptake, effects on photosynthesis, protein synthesis, enzyme activity, and stress-protective properties are discussed. Research results on dosages and application methods of nanoparticles, their impact on growth,

biomass, yield, and soil microbiota are analyzed. Optimal concentrations for different crops, as well as potential negative effects of overdosing, are highlighted. The review emphasizes the potential of nanotechnology in agriculture to improve the efficiency of micronutrient fertilizers and enhance plant stress resilience.

---

**Keywords:** Nanofertilizers, zinc (Zn), manganese (Mn), copper (Cu), photosynthesis, plant stress tolerance, micronutrients

---

### Введение

Микроэлементы играют ключевую роль в росте и развитии растений, участвуя в многочисленных физиолого-биохимических процессах, включая фотосинтез, синтез белка, метаболизм нуклеиновых кислот и активность ферментов. Среди микроэлементов цинк, марганец и медь особенно важны для поддержания нормального метаболизма и стрессоустойчивости растений. Недостаток этих элементов приводит к нарушению роста, снижению урожайности и ослаблению защитных механизмов растений.

С развитием нанотехнологий в агрономии особое внимание уделяется наночастицам микроэлементов, которые обладают высокой реакционной способностью, улучшенной биодоступностью и способностью более эффективно усваиваться растениями по сравнению с традиционными солями. Наночастицы Zn, Mn и Cu стимулируют рост, фотосинтетическую активность, ферментативную активность и микробиоту почвы, однако их эффективность и безопасность зависят от дозировки, способа внесения и вида культуры.

Данный обзор обобщает современные исследования по применению наночастиц цинка, марганца и меди, рассматривает их физиологическое и биохимическое влияние на растения, а также потенциальные риски и ограничения, что позволяет оценить перспективы использования наноудобрений в сельском хозяйстве.

### Наноудобрения – источники цинка (Zn)

#### Роль цинка в растении

Цинк (Zn) является одним из ключевых микроэлементов, участвующих во множестве физиолого-биохимических процессов. Он играет важную роль в фотосинтезе, синтезе белков и нуклеиновых кислот, участвует в регуляции активности ферментов и метаболических путей. Цинк активирует процессы восстановления в фотосистеме II, является кофактором ферментов, таких как РНК-полимераза, фосфатазы и фитазы [1].

Цинк способствует преобразованию неорганических фосфатов в органические соединения, улучшает усвоение фосфора, участвует в формировании семян и генеративных органов, поддерживает структурную целостность мембран и повышает устойчивость растений к стрессовым факторам, включая засуху, высокие температуры, солевой стресс и токсичные металлы [2]. Кроме того, цинк влияет на экспрессию генов, регулирующих рост и развитие корней, развитие цветков и плодов, а также активность антиоксидантной системы растения, снижая повреждение клеток свободными радикалами.

#### Применение наночастиц ZnO

В последние годы широкое распространение получило использование наночастиц оксида цинка (ZnO-NPs), обладающих высокой реакционной способностью, большой удельной поверхностью и способностью более эффективно усваиваться растениями по сравнению с традиционными солями цинка. Наночастицы могут проникать через корни и

листья, подвергаясь трансформации в тканях, включая хлоропласты и митохондрии, где они участвуют в метаболических процессах.

Умеренные дозы ZnO-NPs стимулируют рост растений, фотосинтетическую активность, усвоение макро- и микроэлементов, а также ферментативную активность микроорганизмов ризосферы. При этом наблюдается повышение активности антиоксидантных ферментов, таких как каталаза, супероксиддисмутаза и пероксидаза, что способствует снижению окислительного стресса [3]. Чрезмерные дозы ZnO-NPs могут вызвать стрессовые реакции, включая нарушение фотосинтетического аппарата, накопление малонового диальдегида и угнетение роста [3, 4].

#### Влияние на почву и микроорганизмы

Обработка почв ZnO-NPs увеличивает содержание доступного цинка, что способствует более эффективному усвоению микроэлемента растениями. Однако отмечается угнетение активности почвенных микроорганизмов и снижение содержания углерода в микробной биомассе, что подчеркивает необходимость строгого контроля дозировки [4]. Оптимальные концентрации ZnO-NPs повышают содержание хлорофилла, урожайность и качество продукции. Так, внесение сферических наночастиц размером 35–40 нм в дозах до 5 мг/кг почвы или 100 мг/л при внекорневом применении улучшало фотосинтетическую активность, поддерживало микробную биомассу и способствовало лучшему усвоению питательных веществ, особенно на почвах с дефицитом цинка [5].

#### Дефицит и влияние на рост

Дефицит цинка проявляется межжилковым хлорозом молодых листьев, снижением содержания хлорофилла, ослаблением роста, потерей тургора и снижением иммунитета растений [1]. Недостаток цинка замедляет деление клеток и рост корневой системы, снижает продуктивность и количество генеративных органов. Цинк участвует в метаболизме фосфатов, являясь кофактором P-солубилизирующих ферментов (фосфатаза и фитаза), а применение ZnO-NPs может удваивать их активность, что повышает усвоение фосфора [6].

#### Примеры исследований и эффективность ZnO-NPs

Опрыскивание биосинтезированными ZnO-NPs (10 мг/л) у бобов маш повышало поглощение фосфора на 11 %, увеличивало содержание белка и хлорофилла, улучшало рост растений и снижало негативное воздействие токсичных элементов, например Cr<sup>6+</sup> [7].

ZnO-NPs использовались как самостоятельное удобрение и для покрытия гранул макроудобрений. В полевых исследованиях по выращиванию пшеницы гранулы мочевины, покрытые 0,5% ZnO-NPs, увеличивали рост и урожайность по сравнению с гранулами, покрытыми эквивалентным количеством цинковой соли (0,25–4%) [8, 9].

Оптимальная концентрация ZnO-NPs зависела от вида культуры. Так, для бобов маш 20 мг/л ZnO-NPs увеличивали длину корней на 42 %, биомассу плодов — на 41 %, длину побегов — на 98 %, а биомассу побегов — на 76 % [10]. Более высокие дозы снижали темпы роста.

На огурце внесение ZnO-NPs (400 и 800 мг/кг) увеличивало сухую массу корней на 10–60 %, при этом масса сухих плодов повышалась незначительно (0,6–6 %). Наблюдалось повышение содержания крахмала, Mg и Zn, но снижение Cu и Mo [11, 12].

Положительные эффекты на рост и прорастание семян отмечались для редиса, рапса, арахиса, сои, африканского проса, томатов и огурцов [13–17]. Различные способы внесения (корневой или внекорневой) по-разному влияли на рост: 250 мг/кг почвы увеличивали высоту растений, а 250 мг/л при опрыскивании — длину корней. Более высокие дозы (1000

мг/кг) повышали содержание хлорофилла и урожайность, но при внекорневой обработке эффект был менее выражен [17].

Фолиарные обработки ZnO-NPs повышали биомассу, площадь листьев, синтез хлорофилла и белка, активность ферментов в ризосфере на *Cyamopsis tetragonoloba* и гроздевой фасоли [21]. На сорго оптимальной концентрацией опрыскивания была 500 мг/л, что повышало высоту растений, площадь листьев, сухую массу и выход зерна по сравнению с ZnSO<sub>4</sub>; концентрации ≥1000 мг/л вызывали токсический эффект [22].

Фитотоксичность Zn-NPs зависит от вида растений и способности усваивать наночастицы. Для большинства культур эффективной является доза 0,05 мг/л в почвенном растворе. Высокие концентрации (400–2000 мг/л) могут быть токсичными, как показано для райграса [25]. Для амаранта оптимальной была 10 мг/л, при которой стимулировался рост и накопление биомассы, а эффективность Zn превышала эффективность ZnSO<sub>4</sub> в 4 раза [26].

Зеленый синтез ZnO-NPs с использованием листьев эвкалипта и ZnSO<sub>4</sub> (200–400 мг/л) на кукурузе повышал всхожесть, силу прорастания, длину побегов и корней, а внекорневая подкормка улучшала диаметр стебля, площадь листьев и ускоряла транспорт Zn в зерно [27]. Аналогично, ZnO-NPs, синтезированные с использованием листьев *Terminalia bellirica* (22 нм, 200 мг/л), повышали рост и урожайность горчицы, снижая заболеваемость альтернариозом на 70 % [28].

Таблица 1. Применение наночастиц цинка в качестве источников микроэлементов и их влияние на рост, фотосинтез и урожайность сельскохозяйственных культур

Состав	Получение	Размер	Оптимальная концентрация	Объект	Условия	Эффект
ZnO-NPs	Биосинтез из почвенного гриба <i>Aspergillus fumigatus</i> TFR-8.	20-24	10 мг*л <sup>-1</sup>	Маш ( <i>Vigna radiata</i> )	Растения выращивали в горшках в условиях теплицы. Наночастицы наносили опрыскиванием через две недели после начала выращивания. Образцы отбирали через две недели после обработки.	↑ длина стебля (+32%), ↑ длина корня (в 3 раза), ↑ объем корней (+61%), ↑ количество клубеньков (+13%), ↑ активность ферментов: кислотных фосфатаз (в 2 раза), щелочных фосфатаз (+53%), фитазы (+83%), дегидрогеназы (в 2 раза), ↑ поглощение фосфора (в 5,5 раза), ↑ содержание цинка в листьях

						(+63%), ↑ содержание цинка в семенах (в 2 раза), ↑ численность почвенной микробиоты: бактерий (в 6 раз), грибов (в 3 раза), включая актиномицеты (до +16%), ↑ биохимические показатели: общее содержание растворимого белка (в 2 раза), содержание хлорофилла (в 4,4 раза) – по сравнению с объёмной формой ZnO.
ZnO-NPs	Химический метод	20	20 мг*л <sup>-1</sup>	Маш ( <i>Vigna radiata</i> )	Инкубация в растительной агаровой среде в течение 60 часов	↑ длина корня (+42%), ↑ сухая масса побегов (+41%), ↑ длина побегов (+98%), ↑ сухая масса корней (+76%).
			1 мг*л <sup>-1</sup>	Нут обыкновенный ( <i>Cicer arietinum</i> )		↑ длина корней (+53%) ↑ сухая масса корней (+37%) ↑ длина побегов (+6%) ↑ сухая масса побегов (+27%)
ZnO-NPs	Метод осаждения (Meliorum Technologies, Нью-Йорк, США)	9-11	400 мг*кг <sup>-1</sup>	Огурец обыкновенный ( <i>Cucumis sativus</i> )	Выращивание растений в горшках в суглинисто-песчаной почве в течение 53 дней.	↑ содержание крахмала (+57%) ↑ Mg (+18%), Zn (+70%) в плодах ↑ сухая масса корней (+10%)

					Внесение наночастиц в почву.	↓ Мо (-40%), Cu (-25%)
			800 мг*кг-1			↑ содержание глютелина (в 2 раза) ↑ Mg (+7%), Zn (в 2,5 раза) ↑ сухая масса корней (+60%) ↑ сухая масса плодов (+6%) ↓ Мо (-53%), Cu (-19%)
ZnO-NPs	Компания Nanostructure and Amorphous Materials Inc. (Хьюстон, Техас, США)	12-24	1 г*л-1	Капсикум китайский (Capsicum chinense)	Выращивание в условиях теплицы. Обработки по листу проводили путем опрыскивания по вегетативной массе дважды на каждом из следующих этапов: вегетативный рост (45-89 дней), цветение (90-140 дней), развитие плодов (141-170 дней) и созревание (с 171-205 дней) для внесения общего количества цинка в количестве 0,8 и 1,6 мг на растение.	↑ высота растений ↑ диаметр стебля (2%, 7% и 19%) ↑ содержание хлорофилла (+19%, 23% и 16%) ↑ количество плодов (+9%) ↑ масса плодов (+3,6%) ↑ урожайность (+12%) ↑ свежая масса (+2,2%) ↑ сухая масса (+4,3%) по сравнению с обработкой ZnSO <sub>4</sub>
			2 г*л-1			↑ содержание капсаицина (+19%) ↑ содержание дигидрокапсаицина (+11%) ↑ сохранение термических единиц по Сковиллу (+16%) ↑ содержание общих фенолов (+14%)

						<p>↑ содержание общих флавоноидов в плодах: растворимых (+50%) и связанных (+27%)</p> <p>↑ антиоксидантная активность</p> <p>↓ высота растений (-10,5% и -11,6% при обработках FG и M)</p> <p>↓ содержание хлорофилла</p> <p>↓ количество плодов (-7,3%)</p> <p>↓ масса плодов (-3,8%)</p> <p>↓ урожайность (-11%)</p> <p>↓ свежая масса (-3%)</p> <p>↓ сухая масса (-10%)</p>
ZnO-NPs	Химический метод	20	2 г*л-1	<p>Рапс (<i>Brassica napus</i>)</p> <p>Редис (<i>Raphanus raphanistrum</i> subsp. <i>sativus</i>)</p> <p>Райграс многолетний (<i>Lolium perenne</i>)</p> <p>Салат полевой (<i>Lactuca sativa</i>)</p> <p>Кукуруза (<i>Zea mays</i>)</p> <p>Огурец обыкновенный (<i>Cucumis sativus</i>)</p>	<p>Проращивание в чашках Петри течение 5 дней в темноте.</p>	<p>↑ длина корней редиса (+56%)</p> <p>↑ длина корней рапса (+38%)</p> <p>↓ всхожесть семян кукурузы (-30%)</p>
Zn-NPs		35	2 г*л-1			<p>↓ всхожесть семян <i>perenne</i> (-41%)</p>

ZnO-NPs	Химический метод	25	1 г*л-1	Арахис подземный ( <i>Arachis hypogaea</i> )	Полевые исследования	<p>↑ всхожесть (+16%)</p> <p>↑ длина побегов (в 3 раза)</p> <p>↑ длина корней (в 2,4 раза)</p> <p>↑ жизнеспособность сеянцев (в 2,5 раза) на стадии прорастания по сравнению с ZnSO<sub>4</sub></p> <p>↑ рост растений (+88%)</p> <p>↑ содержание хлорофилла (+42%) на стадии цветения</p> <p>↑ количество стручков на растении (+12%)</p> <p>↑ урожайность (+29%)</p> <p>↓ время цветения (-2 дня)</p>
ZnO-NPs	Химический метод	20	0.5 г*л-1	Соя культурная ( <i>Glycine max Merr.</i> )	Выращивание в лабораторных условиях. 1 день стрессовых условия (засуха)	<p>↑ процент прорастания (+89,5%)</p> <p>↑ скорость прорастания (+6,9%) семян в условиях засухи</p>
	Золь-гель метод	38	200 мг*кг-1		120 дней выращивания в открытом грунте	<p>↑ сухая масса (+15%)</p> <p>↑ длина корней (+23%)</p> <p>↑ объем корней (+15%)</p> <p>↑ площадь корней (+19%) по сравнению с обработкой ZnCl<sub>2</sub></p>

ZnO-NPs	Химический метод	20-50	2 г*л-1	Пшеница мягкая (Triticum aestivum)	7 дней выращивани я в стаканчиках с песком в теплице	↑ содержание хлорофилла а (+12%) ↑ содержание хлорофилла b (+12,5%) ↑ содержание белка (+23%)
ZnO-NPs	Биосинтез из почвенного гриба Rhizoctonia bataticola TFR-6	15-25	First 2 weeks - 10 мг*л-1, then 4 weeks - 16 l·ha-1	Просо перловидное (пшено) (Pennisetum glaucum)	6 недель выращивани я, полевой эксперимент , аридная зона, внекорневые обработки	↑ длина побегов (+15%) ↑ длина корней (+4%) ↑ объем корней (+24%) ↑ содержание хлорофилла (+24%) ↑ общее количество растворимого белка в листьях (+38,7%) на критической стадии роста (6 недель)
ZnO-NPs	Золь-гель метод	27-29	100 мг*л-1 (на 1 кг почвы)	Томат (помидор) (Solanum lycopersicum)	66 дней выращивани я, условия теплицы, внесение наночастиц на 14-й день, измерения на 28-й день (внесение в почву и аэрозольное опрыскивание)	↑ содержание ликопина в плодах (в 3 раза) при внекорневой обработке ↑ сухая масса (+41%) при обработке почвы
			250 мг*л-1 (на 1 кг почвы)			↑ высота растений (+25%) при обработке почвы ↑ длина корней (+50%) при внекорневой обработке
			1000 мг*л-1 (на 1 кг почвы)			↑ содержание хлорофилла (в 3 раза) при обработке почвы ↑ урожайность (+81,9% при внекорневой обработке и

						+305,4% при обработке почвы) ↑ содержание ликопина в плодах (в 2,5 раза) при обработке почвы ↓ содержание ликопина в плодах (в 3 раза при внекорневой обработке) ↓ Сухая масса (-11% при обработке почвы) ↑ Свежая масса (+11%) ↑ Сухая масса (+11%)
ZnO-NPs	Химический метод	20	10 мг*л-1	Лук репчатый ( <i>Allium cepa</i> )	10 дней, выращивание в чашках Петри	↑ Свежая масса (+11%), ↑ Сухая масса (+11%)
ZnO-NPs	Биологический синтез с использованием внеклеточных секретий Аспергилла дымящегося ( <i>Aspergillus fumigatus</i> )	1-7	10 мг*л-1	Гуар ( <i>Cyamopsis tetragonoloba</i> )	6 недель выращивания, внекорневая обработка на 14-й день	↑ Свежая масса (+27%) ↑ длина побегов (+32%) ↑ длина корней (+66%) ↑ площадь корней (+74%) ↑ содержание хлорофилла (+276%) ↑ общий растворимый белок в листьях (+27%) ↑ численность микроорганизмов ризосферы (+11-14%) ↑ активность кислотной фосфатазы (+74%) ↑ активность щелочной

						фосфатазы (+49%) ↑ активность фитазы (+72%) в ризосфере кластерного боба
ZnO-NPs	Химический метод	30	500 мг*л-1	Сорго двуцветное, сорт М-35-1 ( <i>Sorghum bicolor</i> var. М-35-1)	Горшечный эксперимент в контролируемых условиях	↑ индекс листовой поверхности (+7%) ↑ Сухая масса (+16%) ↑ урожайность зерна (+9,5%) ↑ содержание Zn в зерне (+5,6%) по сравнению с обычным ZnSO <sub>4</sub>
ZnO-NPs	Химический метод	10	1.6 г*л-1	Люцерна посевная ( <i>Medicago sativa</i> )	Проращивание в чашках Петри	↓ процент прорастания (-40%) ↓ длина корней (в 2 раза)
			200 мг*л-1	Огурец обыкновенный ( <i>Cucumis sativus</i> )		↑ длина корней (в 2,7 раза) ↓ Свежая масса (-13%)
			1600 мг*л-1			↑ процент прорастания (+10%)
			800 г*л-1	Томат (помидор) ( <i>Solanum lycopersicum</i> )		↓ длина корней (-43%) ↑ Свежая масса (+35%)
			1600 мг*л-1			↓ процент прорастания (-20%) ↓ длина корней (-42%)
ZnO-NPs	Зелёный синтез с использованием экстракта	15-30	10-250 мг*л-1	Амарант хвостатый ( <i>Amaranth</i> )	Проращивание в чашках Петри	Не оказало значимого влияния на прорастание

	листьев моринги масличной (Moringa oleifera)		500 мг*л-1	us caudatus)		↓ процент прорастания (-5-10%)
			10 мг*л-1		Выращивание в горшках в условиях теплицы, опрыскивание наночастицами проводилось на фазе 4 листа, полив раствором Хоагланда. Отбор проб проводился через 30 дней после обработки	↑ высота растений (+35%) ↑ Свежая масса (+67%) ↑ агрономическая эффективность (в 3,7 раза) ↑ физиологическая эффективность (в 3,9 раза) Содержание Zn в растениях не изменилось по сравнению с обычным ZnSO <sub>4</sub>
ZnO-NPs	Зелёный синтез с использованием пырейника копьевидного (Elymus lanceolatus)	100	200 мг*л-1	Кукуруза, сорт PG2458 (Zea mays var. PG2458)	Обработка семян перед посевом	↑ процент прорастания (+13%) ↑ индекс силы семян (+50%) ↑ длина побегов (+27%) ↑ длина корней (+71%) ↑ Свежая масса (+12%) по сравнению с обычным ZnSO <sub>4</sub>
					Внекорневые обработки в условиях теплицы за 40 дней до созревания	↑ площадь листовой поверхности (+10%) ↑ диаметр стебля (+3%) ↑ количество листьев (+15%) ↑ содержание хлорофилла a (+20%) ↑ содержание хлорофилла b (+53%) ↑ содержание каротиноидов (+14%)

						↑ содержание белка (+23%) ↑ активность SOD (+20%) ↑ активность CAT (+50%) ↑ содержание Zn в зерне (+33%) ↑ общий содержание Zn (+33%) по сравнению с обычным ZnSO <sub>4</sub>
Urea coated by ZnO-NPs	Химический метод	50-90	0.5%	Пшеница мягкая ( <i>Triticum aestivum</i> )	Выращивание в почве в поле	↑ высота растений ↑ длина корней ↑ объем корней ↑ урожайность зерна ↑ Сухая масса
ZnO-NPs	Зелёный синтез с использованием экстракта листьев терминалии белирики ( <i>Terminalia bellirica</i> )	22	200 мг*л-1	Горчица сарептская ( <i>Brassica juncea</i> )	Выращивание в почве в поле	↑ длина корней и побегов ↑ количество семян ↑ масса семян ↑ содержание масла ↓ поражение болезнями (-70%)
ZnO-NPs	Химический метод	20	10, 20, 50, 100, 200, 1000 мг*л-1	Райграс многолетний ( <i>Lolium perenne</i> )	12 дней выращивания в гидропонике	↓ Свежая масса морфологические аномалии: кончики корней сморщены, клетки эпидермиса и коркового слоя корня сильно вакуолизированы или разрушены

Наноудобрения – источники марганца (Mn)

Роль марганца в растении

Марганец (Mn) является жизненно важным микроэлементом, необходимым для расщепления воды в фотосистеме II, участия в фотосинтетических белках и ферментах. Он регулирует фотохимию, активирует ферменты антиоксидантной системы и участвует в формировании хлоропластов [32, 33].

#### Дефицит и токсичность

Повышенные концентрации Mn вызывают окислительный стресс, а дефицит приводит к снижению фотосинтетической активности, замедлению роста и снижению урожайности.

#### Применение Mn-NPs

В гидропонных экспериментах на бобах маш (*Vigna radiata* L.) Mn-NPs применяли в дозах 0,05–1,0 мг/л и сравнивали с  $MnSO_4$ . Mn-NPs в 0,05 мг/л улучшали рост и урожайность без признаков токсичности, тогда как  $MnSO_4$  в дозе 1 мг/л вызывал некроз листьев и повреждение корней. Обработка Mn-NPs усиливала выделение кислорода и фотосинтетическое фосфорилирование в хлоропластах за счет активного расщепления воды [34, 35].

#### Стресспротекторное действие

MnO-NPs подавляли патогенную грибную микрофлору на растениях *Solanum* [36]. Fe-Mn наноконпозиты, лигированные графеновыми квантовыми точками, повышали активность антиоксидантных ферментов (CAT, POD, глутатионредуктаза, NADPH-оксидаза), что способствовало росту и увеличению биомассы пшеницы [37].

Таблица 2. Применение наночастиц меди в качестве источников микроэлементов и их влияние на рост, фотосинтез и урожайность сельскохозяйственных культур

Состав	Получение	Размер	Оптимальная концентрация	Объект	Условия	Эффект
Cu-NPs	Химический метод	50	200, 400, 600, 800, и 1000 мг*л-1	Маш ( <i>Vigna radiata</i> R. Wilczek) Пшеница мягкая, подвид пшеницы мягкой ( <i>Triticum aestivum</i> subsp. <i>aestivum</i> )	Выращивание на агаризованной питательной среде растений	Наночастицы (NPs) были токсичны и биодоступны для обоих видов, при этом мунг был более чувствителен к микроэлементу, чем преника (токсичные концентрации и составляли соответственно 335 и 570 мг л-1)

Cu-NPs:			100, 500 мг*л-1	Тыква обыкновенная (Cucurbita pepo)	14 дней выращивания в гидропонике без гуминовой кислоты и с её добавлением (50 мг л-1)	Растворы Cu-NPs и массивной формы меди (bulk Cu) во всех концентрациях проявляли фитотоксичность. Гуминовая кислота снижала содержание ионов в растворе bulk Cu, но повышала концентрацию Cu <sup>2+</sup> в растворах Cu-NPs.
Cu-NPs	Химический метод	40-60	13 и 66 г*кг-1	Салат посевной (Lactuca sativa)	15 дней культивирования в почве; оценка микробных колоний и экотоксичности наночастиц	Наночастицы не оказывали значимого влияния на почвенную микробиоту и прорастание семян. Однако Cu-NPs в более высоких концентрациях, а также комбинация Au-NPs + Cu-NPs существенно влияли на рост растений после 15 дней инкубации.
Au-NPs + Cu-NPs:		100+50	13+13 мг*кг-1			↑ соотношение побегов и корней по сравнению с контролем,

70% CuO, 30% Cu <sub>2</sub> O (Cu-NPs):	Химический метод	30	0.025, 0.25, 0.5, 1, 5 мг*л-1 Cu	Элодея густая (Elodea densa Planch)	3 дня выращивания в гидропонике	↑ перекисное окисление липидов (до 120 и 180 %), ↑ активность CAT и SOD (в 1,5–2,0 раза), фитотоксичность наблюдалась при концентрации и 1,0 мг л-1.
--	------------------	----	----------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------	--

Наноудобрения – источники меди (Cu)

Роль меди в растении

Медь регулирует фотосинтез, концентрацию ингибиторов роста, водный обмен и перераспределение углеводов, входит в состав ферментов и оказывает стресспротекторное действие. Под влиянием меди повышается содержание хлорофилла и устойчивость к болезням [38-40].

Дефицит и токсичность

Дефицит меди проявляется потерей тургора молодых листьев, скручиванием, бледной окраской и замедлением роста [41]. Высокие концентрации меди токсичны для растений и могут приводить к загрязнению почвы и водных объектов [42, 43].

Применение Cu-NPs

Оптимальная концентрация меди в гидропонном растворе (Хогланд) составляет 0,02 мг/л [44]. Cu-NPs в дозах 200–1000 мг/л оказывали токсическое воздействие на проростки маша, пшеницы и цуккини [45, 46]. Однако при низких концентрациях наблюдалось стимулирующее действие: на салате-латуке скорость роста увеличивалась на 40–91 % при концентрациях 130–600 мг/кг, а на *Elodea densa* фотосинтез увеличивался на 35 % при 0,25 мг/л [47, 48].

Таблица 3. Применение наночастиц марганца в качестве источников микроэлементов и их влияние на рост, фотосинтез и урожайность сельскохозяйственных культур

Состав	Получение	Размер	Оптимальная концентрация	Объект	Условия	Эффект
--------	-----------	--------	--------------------------	--------	---------	--------

Mn-NPs	Химический метод	20	0.05 мг*л-1	Маш (мунг) ( <i>Vigna radiata</i> R. Wilczek)	Выращивание растений в перлитовой среде в течение 15 дней в фитокамере.	↑ длина корней (+2%), ↑ длина стебля (+11%), ↑ количество клубеньков (+28%), ↑ сухая масса (+50%), ↑ свежая масса (+35%), ↑ поглощение нитратного азота корнями (+48%), ↑ поглощение нитратного азота листьями (+22%) по сравнению с обработкой $MnSO_4$ ,
MnO-NPs	Коммерческий продукт – US Research Nanomaterials (Хьюстон, Техас)	40	0.1 мг*л-1	Баклажан обыкновенный ( <i>Solanum melongena</i> )	Растения выращивали в теплице на бесубстратной среде, заражённой грибом <i>Fusarium</i> (возбудителем фузариозного увядания), в течение до 6 недель, затем обработали и высадили в открытый грунт через неделю.	↑ урожайность (+31%), ↓ площадь под кривой развития болезни (-28%),
Mn <sub>0.5</sub> Zn <sub>0.5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -NPs	«Зелёный» микроволновый гидротермальный метод с использованием микроволн при 160 °C	5-8	10 мг*л-1	Тыква обыкновенная ( <i>Cucurbita pepo</i> )	Внекорневая обработка проводилась через 20 дней после посева в поле.	↑ урожайность (+49-53%) по сравнению с необработанными растениями,
			20 мг*л-1			↑ содержание органического вещества (+76-77%), ↑ общая энергия (250-

						253 ккал·г <sup>-1</sup> ) в плодах, ↑ содержание органического вещества (+73%), ↑ общая энергия (260 и 258 ккал·г <sup>-1</sup> ) в листьях,
	«Зелёный» микроволновой гидротермальный метод с использованием микроволн при 180 °С	10-11	30 мг*л-1			
Fe-Mn nanocomposites	«Зелёная» технология с использованием экстракта листьев <i>Azadirachta indica</i> в качестве восстановителя и этиленгликоля в качестве стабилизирующего агента	10-12	200 мг*л-1	Пшеница мягкая ( <i>Triticum aestivum</i> )	Рассада выращивалась на питательной среде без добавок, а обработка проводилась с использованием твёрдоматричного прайминга и внекорневого опрыскивания.	процент прорастания (в 2 раза), ↑ длина побега (+41%), ↑ свежая масса побега (+13%), ↑ длина корня (+12%), ↑ сухая масса побега (+30%), ↑ сухая масса корня (+21%), ↑ содержание пролина (в 2,2 раза),
Fe-Mn nanocomposites doped GQDs	Синтез графеновых квантовых точек из природного полимера — крахмала	17	200 мг*л-1			↑ свежая масса побега (в 2 раза), ↑ свежая масса корня (+21%), ↑ сухая масса корня (+47,6%), ↑ сухая масса побега (+17%), ↑ содержание пролина (в 2,1 раза),
			500 мг*л-1			↑ длина побега (+27%), ↑ активность САТ (+40,5%), ↑ активность POD (+103%), ↑ активность глутатионредуктазы (+130%), ↑ активность NADPH-оксидазы (+141%), ↑ содержание пролина (в 2,3 раза),

						↓ стресс, ↓ длина корней (-7%), ↓ количество корней (-9%).
--	--	--	--	--	--	--

### Заключение

Таким образом, применение наноудобрений в сельском хозяйстве может являться весьма перспективным, по сравнению с использованием “классических” минеральных удобрений. Главными преимуществами наноудобрений является более выраженное воздействие на рост и урожайность сельскохозяйственных культур, и, как следствие, высокая эффективность использования при меньших концентрациях, чем вносимые минеральные удобрения. Стоит отметить, что минеральные объёмные удобрения могут являться экологически небезопасными, нанося вред окружающей среде, способствуя эвтрофикации, накоплению избытка удобрений в почве и грунтовых водах. Эффект применения наночастиц и наноматериалов имеет видоспецифический характер и зависит от способа внесения, размера, формы, метода получения и используемой концентрации наночастиц. Несмотря на наличие большого числа сообщений о высокой эффективности наноудобрений, отмечается ограниченность количества литературных данных по данной теме. Отдельно стоит отметить недостаток научных данных относительно биобезопасности наноматериалов, используемых в сельском хозяйстве. Как следствие, крайне важным является дальнейшее проведение подробных токсикологических исследований наноудобрений в отношении животных и человека ввиду возможности их попадания в организм с потребляемыми продуктами питания.

### Список литературы:

1. Sharma A., Patni B., Shankhdhar D., Shankhdhar S. C. Zinc - An Indispensable Micronutrient // *Physiology and Molecular Biology of Plants*. - 2012. - Т. 19, № 1. - С. 11-20.
2. Sturikova H., Krystofova O., Huska D., Adam V. Zinc, zinc nanoparticles and plants // *Journal of hazardous materials*. - 2018. - Т. 349. - С. 101-110. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.01.040 EDN: YFIYLZ
3. Liu L., Nian H., Lian T. Plants and rhizospheric environment: Affected by zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs). A review // *Plant Physiology and Biochemistry*. - 2022. - Т. 185. - С. 91-100. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.05.032 EDN: KDJWVV
4. Verma Y., Singh S. K., Jatav H. S., Rajput V. D., Minkina T. Interaction of zinc oxide nanoparticles with soil: Insights into the chemical and biological properties // *Environmental Geochemistry and Health*. - 2021. - Т. 44, № 1. - С. 221-234.
5. Singh K., Madhusudanan M., Verma A. K., Kumar C., Ramawat N. Engineered zinc oxide nanoparticles: an alternative to conventional zinc sulphate in neutral and alkaline soils for sustainable wheat production // *3 Biotech*. - 2021. - Т. 11, № 7. DOI: 10.1007/s13205-021-02861-1 EDN: SJMIYQ

6. Raliya R., Tarafdar J. C., Biswas P. Enhancing the Mobilization of Native Phosphorus in the Mung Bean Rhizosphere Using ZnO Nanoparticles Synthesized by Soil Fungi // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. - 2016. - Т. 64, № 16. - С. 3111-3118.
7. Prakash V., Rai P., Sharma N. C., Singh V. P., Tripathi D. K., Sharma S., Sahi S. Application of zinc oxide nanoparticles as fertilizer boosts growth in rice plant and alleviates chromium stress by regulating genes involved in oxidative stress // *Chemosphere*. – 2022. – Т. 303. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134554 EDN: RQCXYL
8. Mishra Y. K., Milani N., Hettiarachchi G. M., Kirby J. K., Beak D. G., Stacey S. P., McLaughlin M. J. Fate of Zinc Oxide Nanoparticles Coated onto Macronutrient Fertilizers in an Alkaline Calcareous Soil // *Plos One*. - 2015. - Т. 10, № 5.
9. Beig B., Niazi M. B. K., Jahan Z., Zia M., Shah G. A., Iqbal Z., Douna I. Facile coating of micronutrient zinc for slow release urea and its agronomic effects on field grown wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Science of The Total Environment*. – 2022. – Т. 838. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155965 EDN: AEFFSO
10. Mahajan P., Dhoke S., Khanna A. Effect of nano-ZnO particle suspension on growth of mung (*Vigna radiata*) and gram (*Cicer arietinum*) seedlings using plant agar method // *Journal of Nanotechnology*. - 2011. - Т. 2011.
11. Zhao L., Sun Y., Hernandez-Viezcas J. A., Servin A. D., Hong J., Niu G., Peralta-Videa J. R., Duarte-Gardea M., Gardea-Torresdey J. L. Influence of CeO<sub>2</sub> and ZnO Nanoparticles on Cucumber Physiological Markers and Bioaccumulation of Ce and Zn: A Life Cycle Study // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. - 2013. - Т. 61, № 49. - С. 11945-11951.
12. Zhao L., Peralta-Videa J. R., Rico C. M., Hernandez-Viezcas J. A., Sun Y., Niu G., Servin A., Nunez J. E., Duarte-Gardea M., Gardea-Torresdey J. L. CeO<sub>2</sub> and ZnO Nanoparticles Change the Nutritional Qualities of Cucumber (*Cucumis sativus*) // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. - 2014. - Т. 62, № 13. - С. 2752-2759.
13. Lin D., Xing B. Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth // *Environmental Pollution*. - 2007. - Т. 150, № 2. - С. 243-250.
14. Prasad T. N. V. K. V., Sudhakar P., Sreenivasulu Y., Latha P., Munaswamy V., Reddy K. R., Sreeprasad T. S., Sajanlal P. R., Pradeep T. Effect of Nanoscale Zinc Oxide Particles on the Germination, Growth and Yield of Peanut // *Journal of Plant Nutrition*. - 2012. - Т. 35, № 6. - С. 905-927.
15. Sedghi M., Hadi M., Toluie S. G. Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soybean seeds under drought stress // *Ann West Univ Timisoara Ser Biol*. - 2013. - Т. 16, № 2. - С. 73.
16. Tarafdar J. C., Raliya R., Mahawar H., Rathore I. Development of Zinc Nanofertilizer to Enhance Crop Production in Pearl Millet (*Pennisetum americanum*) // *Agricultural Research*. - 2014. - Т. 3, № 3. - С. 257-262.
17. de la Rosa G., López-Moreno M. L., de Haro D., Botez C. E., Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L. Effects of ZnO nanoparticles in alfalfa, tomato, and cucumber at the germination stage: root development and X-ray absorption spectroscopy studies // *Pure and Applied Chemistry*. - 2013. - Т. 85, № 12. - С. 2161-2174.
18. Raskar S., Laware S. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion // *Int J Curr Microbiol App Sci*. - 2014. - Т. 3, № 2. - С. 467-473.

19. Ramesh M., Palanisamy K., Babu K., Sharma N. K. Effects of bulk & nano-titanium dioxide and zinc oxide on physio-morphological changes in *Triticum aestivum* Linn // *J Glob Biosci.* - 2014. - T. 3, № 2. - С. 415-422.
20. Raliya R., Nair R., Chavalmane S., Wang W.-N., Biswas P. Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant // *Metallomics.* - 2015. - T. 7, № 12. - С. 1584-1594.
21. Raliya R., Tarafdar J. C. ZnO Nanoparticle Biosynthesis and Its Effect on Phosphorous-Mobilizing Enzyme Secretion and Gum Contents in Clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) // *Agricultural Research.* - 2013. - T. 2, № 1. - С. 48-57.
22. Poornima R., Koti R. Effect of nano zinc oxide on growth, yield and grain zinc content of sorghum (*Sorghum bicolor*) // *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry.* - 2019. - T. 8, № 4. - С. 727-731.
23. Lee C. W., Mahendra S., Zodrow K., Li D., Tsai Y. C., Braam J., Alvarez P. J. J. Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabidopsis thaliana* // *Environmental Toxicology and Chemistry.* - 2009. - T. 29, № 3. - С. 669-675.
24. López-Moreno M. L., de la Rosa G., Hernández-Viezcas J. Á., Castillo-Michel H., Botez C. E., Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L. Evidence of the Differential Biotransformation and Genotoxicity of ZnO and CeO<sub>2</sub> Nanoparticles on Soybean (*Glycine max*) Plants // *Environmental Science & Technology.* - 2010. - T. 44, № 19. - С. 7315-7320.
25. Lin D., Xing B. Root Uptake and Phytotoxicity of ZnO Nanoparticles // *Environmental Science & Technology.* - 2008. - T. 42, № 15. - С. 5580-5585.
26. Reshma Z., Meenal K. Foliar application of biosynthesised zinc nanoparticles as a strategy for ferti-fortification by improving yield, zinc content and zinc use efficiency in amaranth // *Heliyon.* – 2022. – T. 8, № 10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10912 EDN: MCZIIS
27. Sharma P., Urfan M., Anand R., Sangral M., Hakla H. R., Sharma S., Das R., Pal S., Bhagat M. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Eucalyptus lanceolata* leaf litter: characterization, antimicrobial and agricultural efficacy in maize // *Physiology and Molecular Biology of Plants.* – 2022. – T. 28, № 2. – С. 363-381. DOI: 10.1007/s12298-022-01136-0 EDN: ZOAILD
28. Dhiman S., Varma A., Rao M., Prasad R., Goel A. Deciphering the fertilizing and disease suppression potential of phytofabricated zinc oxide nanoparticles on *Brassica juncea* // *Environmental Research.* - 2023. - T. 231.
29. Yusefi-Tanha E., Fallah S., Rostamnejadi A., Pokhrel L. R. Responses of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) to zinc oxide nanoparticles: Understanding changes in root system architecture, zinc tissue partitioning and soil characteristics // *Science of The Total Environment.* – 2022. – T. 835. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155348 EDN: REABEA
30. García L., Niño M., Olivares S., Lira S., Barriga C., Vázquez A., Rodríguez S., Zavala G. Foliar Application of Zinc Oxide Nanoparticles and Zinc Sulfate Boosts the Content of Bioactive Compounds in Habanero Peppers // *Plants.* - 2019. - T. 8, № 8.
31. Shebl A., Hassan A. A., Salama D. M., Abd El-Aziz M. E., Abd Elwahed M. S. A. Template-free microwave-assisted hydrothermal synthesis of manganese zinc ferrite as a nanofertilizer for squash plant (*Cucurbita pepo* L) // *Heliyon.* - 2020. - T. 6, № 3.

32. Millaleo R., Reyes- Diaz M., Ivanov A. G., Mora M. L., Alberdi M. Manganese as Essential and Toxic Element for Plants: Transport, Accumulation and Resistance Mechanisms // *Journal of soil science and plant nutrition*. - 2010. - Т. 10, № 4. - С. 470-481.
33. Ducic T., Polle A. Transport and detoxification of manganese and copper in plants // *Brazilian Journal of Plant Physiology*. - 2005. - Т. 17. - С. 103-112.
34. Pradhan S., Patra P., Das S., Chandra S., Mitra S., Dey K. K., Akbar S., Palit P., Goswami A. Photochemical Modulation of Biosafe Manganese Nanoparticles on *Vigna radiata*: A Detailed Molecular, Biochemical, and Biophysical Study // *Environmental Science & Technology*. - 2013. - Т. 47, № 22. - С. 13122-13131.
35. Pradhan S., Patra P., Mitra S., Dey K. K., Jain S., Sarkar S., Roy S., Palit P., Goswami A. Manganese Nanoparticles: Impact on Non-nodulated Plant as a Potent Enhancer in Nitrogen Metabolism and Toxicity Study both in Vivo and in Vitro // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. - 2014. - Т. 62, № 35. - С. 8777-8785.
36. Elmer W. H., White J. C. The use of metallic oxide nanoparticles to enhance growth of tomatoes and eggplants in disease infested soil or soilless medium // *Environmental Science: Nano*. – 2016. – Т. 3, № 5. – С. 1072-1079. DOI: 10.1039/c6en00146g EDN: XZLPPP
37. Haydar M. S., Ali S., Mandal P., Roy D., Roy M. N., Kundu S., Kundu S., Choudhuri C. Fe-Mn nanocomposites doped graphene quantum dots alleviate salt stress of *Triticum aestivum* through osmolyte accumulation and antioxidant defense // *Scientific Reports*. - 2023. - Т. 13, № 1.
38. Yuan H.-M., Xu H.-H., Liu W.-C., Lu Y.-T. Copper Regulates Primary Root Elongation Through PIN1-Mediated Auxin Redistribution // *Plant and Cell Physiology*. – 2013. – Т. 54, № 5. – С. 766-778. DOI: 10.1093/pcp/pct030 EDN: YERFEZ
39. Raven J. A., Evans M. C., Korb R. E. The role of trace metals in photosynthetic electron transport in O<sub>2</sub>-evolving organisms // *Photosynthesis research*. – 1999. – Т. 60. – С. 111-150. DOI: 10.1023/a:1006282714942 EDN: LSMCQF
40. Droppa M., Terry N., Horvath G. Effects of Cu deficiency on photosynthetic electron transport // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. - 1984. - Т. 81, № 8. - С. 2369-2373.
41. Uchida R. Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms // *Plant nutrient management in Hawaii's soils*. - 2000. - Т. 4. - С. 31-55.
42. Zhen Y., Ge L., Chen Q., Xu J., Duan Z., Loo J. J., Wang M. Latent Benefits and Toxicity Risks Transmission Chain of High Dietary Copper along the Livestock-Environment-Plant-Human Health Axis and Microbial Homeostasis: A Review // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. – 2022. – Т. 70, № 23. – С. 6943-6962. DOI: 10.1021/acs.jafc.2c01367 EDN: RBIXBF
43. Feigl G., Kumar D., Lehotai N., Tugyi N., Molnár Á., Ördög A., Szepesi Á., Gémes K., Laskay G., Erdei L., Kolbert Z. Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2013. – Т. 94. – С. 179-189. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2013.04.029 EDN: YDVDDF
44. Hoagland D. R., Arnon D. I. The water-culture method for growing plants without soil // *Circular*. California agricultural experiment station. - 1950. - Т. 347, № 2nd edit.

45. Lee W. M., An Y. J., Yoon H., Kweon H. S. Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): Plant agar test for water-insoluble nanoparticles // *Environmental Toxicology and Chemistry*. - 2009. - T. 27, № 9. - С. 1915-1921.
46. Musante C., White J. C. Toxicity of silver and copper to *Cucurbita pepo*: Differential effects of nano and bulk-size particles // *Environmental Toxicology*. - 2010. - T. 27, № 9. - С. 510-517.
47. Shah V., Belozeroва I. Influence of Metal Nanoparticles on the Soil Microbial Community and Germination of Lettuce Seeds // *Water, Air, and Soil Pollution*. - 2008. - T. 197, № 1-4. - С. 143-148.
48. Nekrasova G. F., Ushakova O. S., Ermakov A. E., Uimin M. A., Byzov I. V. Effects of copper(II) ions and copper oxide nanoparticles on *Elodea densa* Planch // *Russian Journal of Ecology*. - 2011. - T. 42, № 6. - С. 458-463. DOI: 10.1134/S1067413611060117 EDN: PEDYET
49. Taran N. Y., Gonchar O. M., Lopatko K. G., Batsmanova L. M., Patyka M. V., Volkogon M. V. The effect of colloidal solution of molybdenum nanoparticles on the microbial composition in rhizosphere of *Cicer arietinum* L // *Nanoscale Research Letters*. - 2014. - T. 9, № 1. DOI: 10.1186/1556-276X-9-289 EDN: XNHYQL
50. Chen J., Yin Y., Zhu Y., Song K., Ding W. Favorable physiological and morphological effects of molybdenum nanoparticles on tobacco (*Nicotiana tabacum* L.): root irrigation is superior to foliar spraying // *Frontiers in Plant Science*. - 2023. - T. 14.
51. Li M., Zhang P., Guo Z., Zhao W., Li Y., Yi T., Cao W., Gao L., Tian C. F., Chen Q., Ren F., Rui Y., White J. C., Lynch I. Dynamic Transformation of Nano-MoS<sub>2</sub> in a Soil-Plant System Empowers Its Multifunctionality on Soybean Growth // *Environmental Science & Technology*. - 2024. - T. 58, № 2. - С. 1211-1222. DOI: 10.1021/acs.est.3c09004 EDN: SEECHG
52. Brown P. H., Bellaloui N., Wimmer M. A., Bassil E. S., Ruiz J., Hu H., Pfeffer H., Dannel F., Römheld V. Boron in Plant Biology // *Plant Biology*. - 2008. - T. 4, № 2. - С. 205-223.
53. Ryden P., Sugimoto-Shirasu K., Smith A. C., Findlay K., Reiter W.-D., McCann M. C. Tensile Properties of Arabidopsis Cell Walls Depend on Both a Xyloglucan Cross-Linked Microfibrillar Network and Rhamnogalacturonan II-Borate Complexes // *Plant Physiology*. - 2003. - T. 132, № 2. - С. 1033-1040.
54. Robertson G. A., Loughman B. C. Rubidium Uptake and Boron Deficiency in *Vicia faba* L // *Journal of Experimental Botany*. - 1973. - T. 24, № 6. - С. 1046-1052. EDN: IRHOGR
55. Dell B., Huang L. // *Plant and Soil*. - 1997. - T. 193, № 2. - С. 103-120. EDN: AJTPPB
56. Shen Z., Liang Y., Shen K. Effect of boron on the nitrate reductase activity in oilseed rape plants // *Journal of Plant Nutrition*. - 1993. - T. 16, № 7. - С. 1229-1239.
57. Marschner's mineral nutrition of higher plants. / Marschner H.: Academic press, 2011.
58. Miwa K., Takano J., Fujiwara T. Improvement of seed yields under boron-limiting conditions through overexpression of BOR1, a boron transporter for xylem loading, in *Arabidopsis thaliana* // *The Plant Journal*. - 2006. - T. 46, № 6. - С. 1084-1091.
59. Shireen F., Nawaz M., Chen C., Zhang Q., Zheng Z., Sohail H., Sun J., Cao H., Huang Y., Bie Z. Boron: Functions and Approaches to Enhance Its Availability in Plants for Sustainable

Agriculture // International Journal of Molecular Sciences. – 2018. – Т. 19, № 7. DOI: 10.3390/ijms19071856 EDN: YICHMD

60. Abdelghany A. M., El-Banna A. A. A., Salama E. A. A., Ali M. M., Al-Huqail A. A., Ali H. M., Paszt L. S., El-Sorady G. A., Lamlom S. F. The Individual and Combined Effect of Nanoparticles and Biofertilizers on Growth, Yield, and Biochemical Attributes of Peanuts (*Arachis hypogea* L.) // *Agronomy*. – 2022. – Т. 12, № 2. DOI: 10.3390/agronomy12020398 EDN: RTWLHA
61. Meier S., Moore F., Morales A., González M.-E., Seguel A., Meriño-Gergichevich C., Rubilar O., Cumming J., Aponte H., Alarcón D., Mejías J. Synthesis of calcium borate nanoparticles and its use as a potential foliar fertilizer in lettuce (*Lactuca sativa*) and zucchini (*Cucurbita pepo*) // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2020. – Т. 151. – С. 673-680. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.04.025 EDN: RTXIX

### References:

1. Sharma A., Patni B., Shankhdhar D., Shankhdhar S. C. Zinc - An Indispensable Micronutrient // *Physiology and Molecular Biology of Plants*. - 2012. - Т. 19, № 1. - С. 11-20.
2. Sturikova H., Krystofova O., Huska D., Adam V. Zinc, zinc nanoparticles and plants // *Journal of hazardous materials*. – 2018. – Т. 349. – С. 101-110. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.01.040 EDN: YFIYLZ
3. Liu L., Nian H., Lian T. Plants and rhizospheric environment: Affected by zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs). A review // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2022. – Т. 185. – С. 91-100. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.05.032 EDN: KDJWVV
4. Verma Y., Singh S. K., Jatav H. S., Rajput V. D., Minkina T. Interaction of zinc oxide nanoparticles with soil: Insights into the chemical and biological properties // *Environmental Geochemistry and Health*. - 2021. - Т. 44, № 1. - С. 221-234.
5. Singh K., Madhusudanan M., Verma A. K., Kumar C., Ramawat N. Engineered zinc oxide nanoparticles: an alternative to conventional zinc sulphate in neutral and alkaline soils for sustainable wheat production // *3 Biotech*. – 2021. – Т. 11, № 7. DOI: 10.1007/s13205-021-02861-1 EDN: SJMIYQ
6. Raliya R., Tarafdar J. C., Biswas P. Enhancing the Mobilization of Native Phosphorus in the Mung Bean Rhizosphere Using ZnO Nanoparticles Synthesized by Soil Fungi // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. - 2016. - Т. 64, № 16. - С. 3111-3118.
7. Prakash V., Rai P., Sharma N. C., Singh V. P., Tripathi D. K., Sharma S., Sahi S. Application of zinc oxide nanoparticles as fertilizer boosts growth in rice plant and alleviates chromium stress by regulating genes involved in oxidative stress // *Chemosphere*. – 2022. – Т. 303. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134554 EDN: RQCXYL
8. Mishra Y. K., Milani N., Hettiarachchi G. M., Kirby J. K., Beak D. G., Stacey S. P., McLaughlin M. J. Fate of Zinc Oxide Nanoparticles Coated onto Macronutrient Fertilizers in an Alkaline Calcareous Soil // *Plos One*. - 2015. - Т. 10, № 5.
9. Beig B., Niazi M. B. K., Jahan Z., Zia M., Shah G. A., Iqbal Z., Douna I. Facile coating of micronutrient zinc for slow release urea and its agronomic effects on field grown wheat

- (*Triticum aestivum* L.) // Science of The Total Environment. – 2022. – Т. 838. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155965 EDN: AEFSSO
10. Mahajan P., Dhoke S., Khanna A. Effect of nano-ZnO particle suspension on growth of mung (*Vigna radiata*) and gram (*Cicer arietinum*) seedlings using plant agar method // Journal of Nanotechnology. - 2011. - Т. 2011.
  11. Zhao L., Sun Y., Hernandez-Viezcas J. A., Servin A. D., Hong J., Niu G., Peralta-Videa J. R., Duarte-Gardea M., Gardea-Torresdey J. L. Influence of CeO<sub>2</sub> and ZnO Nanoparticles on Cucumber Physiological Markers and Bioaccumulation of Ce and Zn: A Life Cycle Study // Journal of Agricultural and Food Chemistry. - 2013. - Т. 61, № 49. - С. 11945-11951.
  12. Zhao L., Peralta-Videa J. R., Rico C. M., Hernandez-Viezcas J. A., Sun Y., Niu G., Servin A., Nunez J. E., Duarte-Gardea M., Gardea-Torresdey J. L. CeO<sub>2</sub> and ZnO Nanoparticles Change the Nutritional Qualities of Cucumber (*Cucumis sativus*) // Journal of Agricultural and Food Chemistry. - 2014. - Т. 62, № 13. - С. 2752-2759.
  13. Lin D., Xing B. Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth // Environmental Pollution. - 2007. - Т. 150, № 2. - С. 243-250.
  14. Prasad T. N. V. K. V., Sudhakar P., Sreenivasulu Y., Latha P., Munaswamy V., Reddy K. R., Sreeprasad T. S., Sajanlal P. R., Pradeep T. Effect of Nanoscale Zinc Oxide Particles on the Germination, Growth and Yield of Peanut // Journal of Plant Nutrition. - 2012. - Т. 35, № 6. - С. 905-927.
  15. Sedghi M., Hadi M., Toluie S. G. Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soybean seeds under drought stress // Ann West Univ Timisoara Ser Biol. - 2013. - Т. 16, № 2. - С. 73.
  16. Tarafdar J. C., Raliya R., Mahawar H., Rathore I. Development of Zinc Nanofertilizer to Enhance Crop Production in Pearl Millet (*Pennisetum americanum*) // Agricultural Research. - 2014. - Т. 3, № 3. - С. 257-262.
  17. de la Rosa G., López-Moreno M. L., de Haro D., Botez C. E., Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L. Effects of ZnO nanoparticles in alfalfa, tomato, and cucumber at the germination stage: root development and X-ray absorption spectroscopy studies // Pure and Applied Chemistry. - 2013. - Т. 85, № 12. - С. 2161-2174.
  18. Raskar S., Laware S. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion // Int J Curr Microbiol App Sci. - 2014. - Т. 3, № 2. - С. 467-473.
  19. Ramesh M., Palanisamy K., Babu K., Sharma N. K. Effects of bulk & nano-titanium dioxide and zinc oxide on physio-morphological changes in *Triticum aestivum* Linn // J Glob Biosci. - 2014. - Т. 3, № 2. - С. 415-422.
  20. Raliya R., Nair R., Chavalmane S., Wang W.-N., Biswas P. Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant // Metallomics. - 2015. - Т. 7, № 12. - С. 1584-1594.
  21. Raliya R., Tarafdar J. C. ZnO Nanoparticle Biosynthesis and Its Effect on Phosphorous-Mobilizing Enzyme Secretion and Gum Contents in Clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) // Agricultural Research. - 2013. - Т. 2, № 1. - С. 48-57.

22. Poornima R., Koti R. Effect of nano zinc oxide on growth, yield and grain zinc content of sorghum (*Sorghum bicolor*) // *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. - 2019. - Т. 8, № 4. - С. 727-731.
23. Lee C. W., Mahendra S., Zodrow K., Li D., Tsai Y. C., Braam J., Alvarez P. J. J. Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabidopsis thaliana* // *Environmental Toxicology and Chemistry*. - 2009. - Т. 29, № 3. - С. 669-675.
24. López-Moreno M. L., de la Rosa G., Hernández-Viezcas J. Á., Castillo-Michel H., Botez C. E., Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L. Evidence of the Differential Biotransformation and Genotoxicity of ZnO and CeO<sub>2</sub> Nanoparticles on Soybean (*Glycine max*) Plants // *Environmental Science & Technology*. - 2010. - Т. 44, № 19. - С. 7315-7320.
25. Lin D., Xing B. Root Uptake and Phytotoxicity of ZnO Nanoparticles // *Environmental Science & Technology*. - 2008. - Т. 42, № 15. - С. 5580-5585.
26. Reshma Z., Meenal K. Foliar application of biosynthesised zinc nanoparticles as a strategy for ferti-fortification by improving yield, zinc content and zinc use efficiency in amaranth // *Heliyon*. – 2022. – Т. 8, № 10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10912 EDN: MCZIIS
27. Sharma P., Urfan M., Anand R., Sangral M., Hakla H. R., Sharma S., Das R., Pal S., Bhagat M. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Eucalyptus lanceolata* leaf litter: characterization, antimicrobial and agricultural efficacy in maize // *Physiology and Molecular Biology of Plants*. – 2022. – Т. 28, № 2. – С. 363-381. DOI: 10.1007/s12298-022-01136-0 EDN: ZOAILD
28. Dhiman S., Varma A., Rao M., Prasad R., Goel A. Deciphering the fertilizing and disease suppression potential of phytofabricated zinc oxide nanoparticles on *Brassica juncea* // *Environmental Research*. - 2023. - Т. 231.
29. Yusefi-Tanha E., Fallah S., Rostamnejadi A., Pokhrel L. R. Responses of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) to zinc oxide nanoparticles: Understanding changes in root system architecture, zinc tissue partitioning and soil characteristics // *Science of The Total Environment*. – 2022. – Т. 835. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155348 EDN: REABEA
30. García L., Niño M., Olivares S., Lira S., Barriga C., Vázquez A., Rodríguez S., Zavala G. Foliar Application of Zinc Oxide Nanoparticles and Zinc Sulfate Boosts the Content of Bioactive Compounds in Habanero Peppers // *Plants*. - 2019. - Т. 8, № 8.
31. Shebl A., Hassan A. A., Salama D. M., Abd El-Aziz M. E., Abd Elwahed M. S. A. Template-free microwave-assisted hydrothermal synthesis of manganese zinc ferrite as a nanofertilizer for squash plant (*Cucurbita pepo* L) // *Heliyon*. - 2020. - Т. 6, № 3.
32. Millaleo R., Reyes- Diaz M., Ivanov A. G., Mora M. L., Alberdi M. Manganese as Essential and Toxic Element for Plants: Transport, Accumulation and Resistance Mechanisms // *Journal of soil science and plant nutrition*. - 2010. - Т. 10, № 4. - С. 470-481.
33. Ducic T., Polle A. Transport and detoxification of manganese and copper in plants // *Brazilian Journal of Plant Physiology*. - 2005. - Т. 17. - С. 103-112.
34. Pradhan S., Patra P., Das S., Chandra S., Mitra S., Dey K. K., Akbar S., Palit P., Goswami A. Photochemical Modulation of Biosafe Manganese Nanoparticles on *Vigna radiata*: A Detailed Molecular, Biochemical, and Biophysical Study // *Environmental Science & Technology*. - 2013. - Т. 47, № 22. - С. 13122-13131.

35. Pradhan S., Patra P., Mitra S., Dey K. K., Jain S., Sarkar S., Roy S., Palit P., Goswami A. Manganese Nanoparticles: Impact on Non-nodulated Plant as a Potent Enhancer in Nitrogen Metabolism and Toxicity Study both in Vivo and in Vitro // Journal of Agricultural and Food Chemistry. - 2014. - Т. 62, № 35. - С. 8777-8785.
36. Elmer W. H., White J. C. The use of metallic oxide nanoparticles to enhance growth of tomatoes and eggplants in disease infested soil or soilless medium // Environmental Science: Nano. – 2016. – Т. 3, № 5. – С. 1072-1079. DOI: 10.1039/c6en00146g EDN: XZLPPP
37. Haydar M. S., Ali S., Mandal P., Roy D., Roy M. N., Kundu S., Kundu S., Choudhuri C. Fe-Mn nanocomposites doped graphene quantum dots alleviate salt stress of *Triticum aestivum* through osmolyte accumulation and antioxidant defense // Scientific Reports. - 2023. - Т. 13, № 1.
38. Yuan H.-M., Xu H.-H., Liu W.-C., Lu Y.-T. Copper Regulates Primary Root Elongation Through PIN1-Mediated Auxin Redistribution // Plant and Cell Physiology. – 2013. – Т. 54, № 5. – С. 766-778. DOI: 10.1093/pcp/pct030 EDN: YERFEZ
39. Raven J. A., Evans M. C., Korb R. E. The role of trace metals in photosynthetic electron transport in O<sub>2</sub>-evolving organisms // Photosynthesis research. – 1999. – Т. 60. – С. 111-150. DOI: 10.1023/a:1006282714942 EDN: LSMCQF
40. Droppa M., Terry N., Horvath G. Effects of Cu deficiency on photosynthetic electron transport // Proceedings of the National Academy of Sciences. - 1984. - Т. 81, № 8. - С. 2369-2373.
41. Uchida R. Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms // Plant nutrient management in Hawaii's soils. - 2000. - Т. 4. - С. 31-55.
42. Zhen Y., Ge L., Chen Q., Xu J., Duan Z., Loo J. J., Wang M. Latent Benefits and Toxicity Risks Transmission Chain of High Dietary Copper along the Livestock-Environment-Plant-Human Health Axis and Microbial Homeostasis: A Review // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2022. – Т. 70, № 23. – С. 6943-6962. DOI: 10.1021/acs.jafc.2c01367 EDN: RBIXBF
43. Feigl G., Kumar D., Lehotai N., Tugyi N., Molnár Á., Ördög A., Szepesi Á., Gémes K., Laskay G., Erdei L., Kolbert Z. Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2013. – Т. 94. – С. 179-189. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2013.04.029 EDN: YDVDDF
44. Hoagland D. R., Arnon D. I. The water-culture method for growing plants without soil // Circular. California agricultural experiment station. - 1950. - Т. 347, № 2nd edit.
45. Lee W. M., An Y. J., Yoon H., Kweon H. S. Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): Plant agar test for water-insoluble nanoparticles // Environmental Toxicology and Chemistry. - 2009. - Т. 27, № 9. - С. 1915-1921.
46. Musante C., White J. C. Toxicity of silver and copper to *Cucurbita pepo*: Differential effects of nano and bulk-size particles // Environmental Toxicology. - 2010. - Т. 27, № 9. - С. 510-517.

47. Shah V., Belozerova I. Influence of Metal Nanoparticles on the Soil Microbial Community and Germination of Lettuce Seeds // *Water, Air, and Soil Pollution*. - 2008. - Т. 197, № 1-4. - С. 143-148.
48. Nekrasova G. F., Ushakova O. S., Ermakov A. E., Uimin M. A., Byzov I. V. Effects of copper(II) ions and copper oxide nanoparticles on *Elodea densa* Planch // *Russian Journal of Ecology*. – 2011. – Т. 42, № 6. – С. 458-463. DOI: 10.1134/S1067413611060117 EDN: PEDYET
49. Taran N. Y., Gonchar O. M., Lopatko K. G., Batsmanova L. M., Patyka M. V., Volkogon M. V. The effect of colloidal solution of molybdenum nanoparticles on the microbial composition in rhizosphere of *Cicer arietinum* L // *Nanoscale Research Letters*. – 2014. – Т. 9, № 1. DOI: 10.1186/1556-276X-9-289 EDN: XNHYQL
50. Chen J., Yin Y., Zhu Y., Song K., Ding W. Favorable physiological and morphological effects of molybdenum nanoparticles on tobacco (*Nicotiana tabacum* L.): root irrigation is superior to foliar spraying // *Frontiers in Plant Science*. - 2023. - Т. 14.
51. Li M., Zhang P., Guo Z., Zhao W., Li Y., Yi T., Cao W., Gao L., Tian C. F., Chen Q., Ren F., Rui Y., White J. C., Lynch I. Dynamic Transformation of Nano-MoS<sub>2</sub> in a Soil-Plant System Empowers Its Multifunctionality on Soybean Growth // *Environmental Science & Technology*. – 2024. – Т. 58, № 2. – С. 1211-1222. DOI: 10.1021/acs.est.3c09004 EDN: SEECHG
52. Brown P. H., Bellaloui N., Wimmer M. A., Bassil E. S., Ruiz J., Hu H., Pfeffer H., Dannel F., Römheld V. Boron in Plant Biology // *Plant Biology*. - 2008. - Т. 4, № 2. - С. 205-223.
53. Ryden P., Sugimoto-Shirasu K., Smith A. C., Findlay K., Reiter W.-D., McCann M. C. Tensile Properties of Arabidopsis Cell Walls Depend on Both a Xyloglucan Cross-Linked Microfibrillar Network and Rhamnogalacturonan II-Borate Complexes // *Plant Physiology*. - 2003. - Т. 132, № 2. - С. 1033-1040.
54. Robertson G. A., Loughman B. C. Rubidium Uptake and Boron Deficiency in *Vicia faba* L // *Journal of Experimental Botany*. - 1973. - Т. 24, № 6. - С. 1046-1052. EDN: IRHOGR
55. Dell B., Huang L. // *Plant and Soil*. - 1997. - Т. 193, № 2. - С. 103-120. EDN: AJTPPB
56. Shen Z., Liang Y., Shen K. Effect of boron on the nitrate reductase activity in oilseed rape plants // *Journal of Plant Nutrition*. - 1993. - Т. 16, № 7. - С. 1229-1239.
57. Marschner's mineral nutrition of higher plants. / Marschner H.: Academic press, 2011.
58. Miwa K., Takano J., Fujiwara T. Improvement of seed yields under boron-limiting conditions through overexpression of BOR1, a boron transporter for xylem loading, in *Arabidopsis thaliana* // *The Plant Journal*. - 2006. - Т. 46, № 6. - С. 1084-1091.
59. Shireen F., Nawaz M., Chen C., Zhang Q., Zheng Z., Sohail H., Sun J., Cao H., Huang Y., Bie Z. Boron: Functions and Approaches to Enhance Its Availability in Plants for Sustainable Agriculture // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2018. – Т. 19, № 7. DOI: 10.3390/ijms19071856 EDN: YICHMD
60. Abdelghany A. M., El-Banna A. A. A., Salama E. A. A., Ali M. M., Al-Huqail A. A., Ali H. M., Paszt L. S., El-Sorady G. A., Lamtom S. F. The Individual and Combined Effect of Nanoparticles and Biofertilizers on Growth, Yield, and Biochemical Attributes of Peanuts (*Arachis hypogea* L.) // *Agronomy*. – 2022. – Т. 12, № 2. DOI: 10.3390/agronomy12020398 EDN: RTWLHA

61. Meier S., Moore F., Morales A., González M.-E., Seguel A., Meriño-Gergichevich C., Rubilar O., Cumming J., Aponte H., Alarcón D., Mejías J. Synthesis of calcium borate nanoparticles and its use as a potential foliar fertilizer in lettuce (*Lactuca sativa*) and zucchini (*Cucurbita pepo*) // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2020. – Т. 151. – С. 673-680. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.04.025 EDN: RTXIX