УДК 631.82 || EDN: WOCWNC
CC BY-NC 4.0
© О.В. Ракова и соавт.; ФНИ «XXI век»

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНЕКОРНЕВОЙ ПОДКОРМКИ ГОРОХА ПОСЕВНОГО (*PISUM SATIVUM*) ЦИНКОМ В ВИДЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА НА УСТОЙЧИВОСТЬ К СТРЕССУ, ВЫЗВАННОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ПОЧВЫ СВИНЦОМ

О.В. Ракова, А.М. Угаев, С.С. Дёмин, Д.Ю. Липухина, Е.А. Петрова, Т.Г. Крупнова

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Эл. почта: rakovaov@susu.ru

Статья поступила в редакцию 20.05.2026; принята к печати 21.08.2026

Загрязнение почвы тяжелыми металлами, в частности свинцом (Pb), является серьезным экологическим стрессором, снижающим продуктивность сельскохозяйственных культур. Горох посевной (*Pisum sativum*) чувствителен к техногенному загрязнению, что требует поиска эффективных и экологически безопасных методов повышения его толерантности. Данное исследование направлено на оценку защитного действия внекорневой обработки наночастицами оксида цинка (ZnO НЧ) со средним размером 80 нм, в сравнении с раствором сульфата цинка, на морфологические, фотосинтетические и биохимические параметры гороха в условиях почвенного загрязнения свинцом (50 и 100 мг/кг). Проведён вегетационный эксперимент с моделированием свинцового умеренного и сильного стресса с внесением 50 и 100 мг Pb на кг почвы соответственно. Оценивались высота побегов, длина корней, масса побегов и корней, содержание хлорофиллов *a, b* и каротиноидов, накопление H_2O_2 и цинка в стручках гороха. Методом сканирующей электронной микроскопии изучено проникновение наночастиц через устьица. Установлено, что ZnO НЧ по защитному действию во всех сценариях превосходит сульфат цинка. Обработка препаратом ZnO НЧ привела к увеличению высоты побегов, длины корней, массы побегов и корней, общее содержание фотосинтетических пигментов достоверно увеличивалось. Подтверждено, что внекорневая обработка препаратом ZnO НЧ эффективнее снижает накопление H_2O_2 и увеличивает содержание цинка в стручках и, таким образом, может быть эффективным агроприёмом, повышающим устойчивость гороха посевного к свинцовому стрессу. Данный метод можно рекомендовать для использования на техногенно загрязненных почвах.

***Ключевые слова**: экологический стресс, загрязнение свинцом, внекорневая подкормка, цинк, посевной горох*

LABORATORY STUDIES OF THE INFLUENCE OF THE FOLIA FEEDING OF GARDEN PEAS (*PISUM SATIVUM*) WITH ZINC APPLIED AS ZINC OXIDE NANOPARTICLES ON RESISTANCE TO STRESS CAUSED BY SOIL CONTAMINATION WITH LEAD

O.V. Rakova, A.M. Ugaev, S.S. Domin, D.Y. Lipukhina, E.A. Petrova, T.G. Krupnova

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Email: rakovaov@susu.ru

Soil contamination with heavy metals, particularly lead (Pb), is a serious environmental stress, which reduces crop productivity. Garden peas (*Pisum sativum*) sensitivity to anthropogenic pollution necessitates searching for effective and environmentally friendly means for increasing its tolerance. The present study aims to assess the protective effect of 80 nm nanoparticles of zinc oxide (ZnO NP) applied to leaves, compared to zinc sulphate solution, on the morphological, photosynthetic and biochemical parameters of pea in conditions of soil contamination with lead (50 and 100 mg/kg). Moderate and severe lead stresses were induced by adding 50 and 100 mg Pb per kg of soil respectively. Shoot height, root length, shoot and root masses, chlorophylls a and b and carotenoids contents, H_2O_2 accumulation, and zinc content in pea pods were assessed. Nanoparticles penetration through folia stomata was visualized using scanning electron microscopy. The protective effect of ZnO NP is found to be superior to that of zinc sulfate in all experimental scenarios. Treatment with ZnO NP resulted in increases in shoot height, root length, shoot and root masses, and photosynthetic pigments contents. It has been confirmed that treatment with ZnO NP is effective in reducing of H_2O_2 accumulation and increasing of zinc content in pods, and thus may be a potent agricultural means for increasing pea resistance to lead stress. This method may be recommended for use on contaminated soils.

***Keywords**: environmental stress, pollution with lead, folia feeding, zinc, garden peas*

Введение

В современных условиях сельское хозяйство сталкивается с серьёзными вызовами, связанными с ухудшением экологической обстановки и изменением климата. Растения постоянно подвергаются воздействию различных абиотических стрессоров, среди которых особое место занимают тяжёлые металлы. Почва выступает ключевым элементом в распространении тяжёлых металлов, аккумулируя их и способствуя попаданию в биоту вследствие высоких коэффициентов аккумуляции. Накопление свинца в сельскохозяйственных почвах представляет особую опасность. Этот металл легко поглощается растениями. Даже незначительные концентрации Pb вызывают серьёзные нарушения. К ним относятся окислительное повреждение тканей, нарушение метаболизма, снижение фотосинтетической активности и подавление роста растений [12]. Кроме того, свинец является токсикантом. Он способен накапливаться в съедобных частях сельскохозяйственных культур. В условиях растущего населения Земли к 2050 году потребуется увеличить производство продовольствия на 60–110 % [15]. Это делает проблему устойчивости сельскохозяйственных растений к стрессовым факторам высоко актуальной.

Известно, что цинк повышает устойчивость растений к стрессам, поскольку он участвует в регуляции процессов роста, фотосинтеза, синтеза белка, выполнении антиоксидантной функции и контроле активных форм кислорода (АФК), в экспрессии генов и обеспечении целостности мембран [6]. Лишь малое количество цинка может быть усвоено из почвы; по некоторым данным, эффективность использования цинка при почвенных подкормках составляет менее 3,5% [17]. При этом от дефицита цинка страдает почти каждый третий человек в мире [11]. Дефицит цинка негативно влияет на организм человека, вызывая замедление роста, нарушения в работе иммунной системы, снижение способности к обучению, развитие рака и нарушения в структуре ДНК [9]. Повышение содержания цинка в продуктах питания и полевых культурах – важная задача. В качестве перспективного решения данных проблем рассматривается применение нанотехнологий. Особого внимания заслуживают наночастицы оксида цинка (ZnO НЧ), демонстрирующие высокую эффективность в защите растений от негативного воздействия тяжёлых металлов.

Горох посевной (*Pisum sativum*) остается одной из самых востребованных сельскохозяйственных культур, благодаря комплексу полезных свойств, высокой урожайности и универсальности применения в различных отраслях сельского хозяйства и пищевой промышленности. Российскими учеными [2] было показано, что зернобобовые культуры (горох и фасоль) обладают большей устойчивостью к проникновению соединений свинца при сравнении с другими, например, овощными культурами. Тем не менее в лабораторном опыте добавление раствора соли свинца в соответствии с ПДК приводило к снижению процента прорастания семян гороха овощного в 1,5 раза. Содержание моносахаридов, фенольных соединений и хлорофилла в проростках гороха посевного было снижено при выращивании на загрязненной свинцом почве. Поскольку в почвах ряда регионов РФ фиксируются превышения ПДК пахотного слоя почвы по свинцу [1, 3], актуальной задачей остается поиск эффективных агроприемов, позволяющих снизить поступление токсиканта в растения и ослабить вызванный им стресс. Ранее было показано, что ZnO НЧ усиливают антиоксидантную защиту растений, тем самым нейтрализуя активные формы кислорода (АФК), и снижают поглощение свинца стеблями, листьями и семенами горчицы [16]. Вместе с тем, сведения об использовании ZnO НЧ в качестве средства защиты *P. sativum* от свинцового стресса остаются фрагментарными, и потенциал этих НЧ как экологичной замены традиционным агрохимикатам требует дальнейшего изучения. Целью настоящей работы было лабораторное изучение влияния различных концентраций ZnO НЧ (в сравнении с раствором сульфата цинка) при внекорневом внесении на рост, биохимические показатели и антиоксидантную систему при выращивании *P. sativum* в загрязненных свинцом почвах.

Материалы и методы

В качестве тест-культуры для лабораторного эксперимента использовали семена ультрараннего сорта гороха Амброзия («Гавриш», Россия).

Эксперименты по использованию нанооксидов в качестве внекорневой добавки для подавления экологического стресса ведутся лишь в нескольких лабораториях в мире, и для разработки плана эксперимента нами были рассмотрены результаты этих исследований (табл. 1).

Эксперимент, спланированный с учетом табл. 1, был проведен в лаборатории Южно-Уральского государственного университета, в 2025 году. Растения были высажены в глиняные горшки (высотой 20 см, диаметром 15 см) с питательным универсальным почвогрунтом, содержащим N_2 400 мг/кг, P_2O_5 1000 мг/кг, K_2O 600 мг/кг, pH 6–7. Масса почвы в каждом горшке составляла 2 кг. В каждый горшок высадили по 10 семян, всхожесть составила от 40 до 60%. В каждом горшке оставляли по 4 растения. Растения выращивали при фотопериоде 14/10 ч (свет/темнота) с использованием фитоламп для дополнительного освещения. Температура в лаборатории поддерживалась на уровне 18–19 °C, относительная влажность воздуха составляла 50–60 %.

Для внекорневой подкормки использовали ZnO НЧ с размерами (80±20) нм, синтезированные в Научно-образовательном центре «Нанотехнологии» ЮУрГУ. Обработку проводили суспензиями ZnO НЧ с концентрациями 50 и 100 мг на 1 л и раствором Zn^{2+} в виде сульфата цинка при концентрации, в пересчете на оксид цинка, 100 мг на 1 л. (х.ч., Китай). Для моделирования свинцового загрязнения в эксперименте использовался нитрат свинца ($Pb(NO_3)_2$) в концентрациях 0 (контроль), 50 (умеренный стресс) и 100 мг на кг (сильный стресс). Каждая из этих 12 экспериментальных групп была представлена в трех повторностях, всего 36 горшков. Соли свинца в почву вносили непосредственно перед посадкой растений. Внекорневые удобрения вносили на стадии появления 3–4 листка, на стадии начала цветения и через 2 недели после начала цветения. Схема эксперимента представлена в таблице 2.

Эксперимент длился три месяца. После аккуратного извлечения растения были разделены на корни и побеги и промыты водопроводной водой. Стручки были отделены от побегов. Была измерена общая высота растения и длина его корней с помощью метрической шкалы. Для оценки биомассы свежих растений использовались электронные весы.

В свежей зеленой массе (ЗМ) листьев определяли содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилла – суммарно *a* и *b,* а также их соотношение, каротина) и перекиси водорода. Хлорофиллы *a* и *b* и каротиноиды определяли спектрофотометрическим методом. Для этого растительный экстракт готовили путем гомогенизации навески листьев (например, 0,1–0,2 г) с 95% этанолом, после чего инкубировали при комнатной температуре в темноте в течение 24 ч для полной экстракции пигментов. Полученную

Табл. 1

Опубликованные эксперименты по изучению воздействия внекорневых добавок нанооксида цинка на растения в почве, загрязненной тяжелыми металлами

Локация эксперимента, ссылка	Культура	Использованный нанооксид. Вид стресса	Условия эксперимента
Сад лекарственных растений Джамия Хамдард, Нью-Дели, Индия. Естественные условия сада [16]	Горчица (*Brassica juncea* (L.) Czern.	ZnO НЧ (Sigma Aldrich, США). Свинец в почве	Растения выращивали в глиняных горшках с суглинистой почвой (pH 7) без свинца или с 250 μM либо 500 μM свинца, без внекорневой обработки наночастицами или с использованием ZnO НЧ в концентрациях 250, 500 или 1000 ppm
Исламский университет Бахавалпура, Пакистан. Естественные условия экспериментальной площадки университета [4]	Барвинок розовый *Catharanthus roseus*	ZnO НЧ (Sigma-Aldrich, США). Кадмий в почве	Растения выращивали в глиняных горшках с супесчаным суглинком (pH 7). Через две недели после посадки растений в почву вводили кадмий ($CdCl_2$ 0,5 μM). При внекорневом применении ZnO НЧ использовали в концентрации 25 мг/л. Горшки были разделены на четыре группы: без опрыскивания (контроль), с опрыскиванием листьев ZnO НЧ, с добавлением Cd, с добавлением Cd и опрыскиванием ZnO НЧ.
Тебризский университет, Тебриз, Иран. Теплица [14]	Эхинацея пурпурная *Echinacea purpurea* (L.) Moench	TiO_2 НЧ и ZnO НЧ, синтезированые в лаборатории. Свинец в почве.	Растения высаживали в горшки с садовой почвой и песком (3:1). В почву добавляли сульфат свинца ($PbSO_4$) 50 мг/кг и 100 мг/кг. В эксперименте использовали TiO_2 НЧ (50 мг/л), ZnO НЧ (50 мг/л) и совместно TiO_2 НЧ и ZnO НЧ (50 мг/л)
Ботанический сад университета Хохай, Нанкин, Китай. Теплица [18]	Шпинат *Spinacia oleracea* L.	ZnO НЧ и FeO НЧ (источник не указан). Мышьяк в почве	Почва (pH 6,9) была собрана на экспериментальных станциях университета Хохай. Горшки с растениями были разделены на три группы: без обработки почвы мышьяком, с добавлением 60 μM или 120 μM мышьяка. Внекорневую обработку производили FeO НЧ в концентрации10 или 20 мг/л, а также ZnO НЧ в концентрации 20 или 40 мг/л.

суспензию осветляли центрифугированием при 10 000 об/мин в течение 15 мин (центрифуга Centurion Scientific Limited PRO-ASTM BC, Великобритания). Оптическую плотность супернатанта измеряли на спектрофотометре Shimadzu UV-270 (Япония) при следующих длинах волн: 664 нм (хлорофилл *a*), 648 нм (хлорофилл *b*) и 470 нм (каротиноиды). Концентрацию пигментов рассчитывали по формулам для 95% этанола, согласно работе [5]. Содержание перекиси водорода (H_2O_2) в листьях определяли фотоколориметрически по образованию окрашенного комплекса пероксида титана [19], измеряя оптическую плотность на спектрофотометре Shimadzu UV-270 (Япония) при 410 нм.

Содержание цинка в сухой массе стручков с зернами определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, Agilent 7700x, Agilent Technologies Inc., США) в Центре коллективного пользования Южно-Уральского научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс). Для этого стручки вместе с зернами, находящимися внутри, предварительно высушивали до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 60°C, после чего измельчали в агатовой ступке до гомогенного порошка. Навеску образца (0,5 г) помещали в тефлоновые автоклавы и проводили минерализацию в микроволновой системе с использованием концентрированной азотной кислоты (HNO_3, 65 %, марка «ос.ч.») при температуре 200 °C в течение 20 мин. Для контроля правильности измерений параллельно анализировали сертифицированный стандартный образец состава растительного материала (ГСО 8923-2007, листья березы). Все измерения выполняли в трёх повторностях, результаты выражали в мг/кг сухой массы.

Для лучшего понимания механизма воздействия наночастиц при внекорневой подготовке изучали поверхность листьев с применением комплекса сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с энергодисперсионным рентгеновским анализом Jeol JSM-7001F (Япония).

Для каждой экспериментальной группы рассчитывали стандартную ошибку среднего на основе выборочной дисперсии, а доверительные интервалы для средних значений определяли с использованием критерия Стьюдента (двусторонний) при уровне значимости p = 0,05. В таблицах данные представлены как среднее ± стандартная ошибка среднего. Нормальность выборок была определена по критерию Шапиро–Уилка для каждой экспериментальной группы, состоящей из трех технических повторностей (3 параллельных опыта в трех горшках) и четырех биологических повторностей (по четыре растения в каждом

Табл. 2

Схема эксперимента

Шифр экспериментальной группы		**Описание**	**Внесение реактивов**	
			Pb в почве, мг/кг	*ZnO или Zn^{2+}, мг по ZnO в 1 л*
Без Pb	K	Контроль (без стресса и без внекорневой обработки)	–	–
	ZnO50	Без стресса с внекорневой обработкой разбавленной суспензией ZnO НЧ	–	50
	ZnO100	Без стресса с внекорневой обработкой высококонцентрированной суспензией ZnO НЧ	–	100
	Zn^{2+}	Без стресса с внекорневой обработкой раствором соли цинка	–	100
Pb_50	K	Средний стресс без внекорневой обработки	50	–
	Pb50ZnO50	Умеренный стресс с внекорневой обработкой мало концентрированной суспензией ZnO НЧ	50	50
	Pb50ZnO100	Умеренный стресс с внекорневой обработкой мало концентрированной суспензией ZnO НЧ	50	100
	$Pb50Zn^{2+}$	Умеренный стресс с внекорневой обработкой раствором соли цинка	50	100
Pb_100	K	Сильный стресс без внекорневой обработки	100	–
	Pb100ZnO50	Сильный стресс с внекорневой обработкой высоко концентрированной суспензией ZnO НЧ	100	50
	Pb100ZnO100	Сильный стресс с внекорневой обработкой высоко концентрированной суспензией ZnO	100	100
	$Pb100Zn^{2+}$	Сильный стресс с внекорневой обработкой раствором соли цинка	100	100

горшке). Значимость различий между показателями обработанных и контрольных растений оценивали с помощью двустороннего t-критерия Стьюдента для независимых выборок. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. На рисунках значимо различающиеся выборки обозначены знаком *. Статистическую обработку результатов проводили в программе IBM SPSS Statistics 23 (США), а визуализацию данных и построение графиков выполняли в программе Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Стресс, вызванный наличием свинца в почве, привел к депрессии роста растений (рис. 1).

Умеренный стресс не повлиял на морфологические показатели гороха посевного. В условиях сильного стресса высота и масса побегов уменьшались на 20% и 21%, а длина и масса корней на 25% и 28% (рис. 1). Под действием внекорневых подкормок в виде ZnO НЧ эти параметры статистически значимо изменились в сторону роста как ВП и ДК, так и МП и МК (рис. 1). Так для растений, выращенных в условиях отсутствия свинцового стресса обработка суспензией ZnO НЧ с концентрацией 50 мг/л вызывала увеличение ВП, ДК, МП и МК на 30%, 42%, 50% и 72% по сравнению с контролем, а обработка суспензией с концентрацией 100 мг/л привела к увеличению ВП, ДК, МП и МК на 35%, 33%, 63% и 76%.

Внекорневая подкормка суспензией ZnO НЧ с концентрацией 50 мг/л вызывала увеличение по сравнению с контролем ВП, ДК, МП и МК на 50%, 38%, 71% и 43% у растений, подвергавшихся умеренному стрессу от загрязнению почв свинцом, и на 56%, 44%, 69% и 43%, соответственно, при сильном стрессе. Обработка высоко концентрированной суспензией ZnO НЧ (100 мг/л) при умеренном стрессе вызвала увеличение показателей ВП, ДК, МП и МК на 78%, 38%, 124% и 57%. При сильном стрессе от введения свинца в почву обработка высоко концентрированной суспензией также показала прекрасный результат и показатели

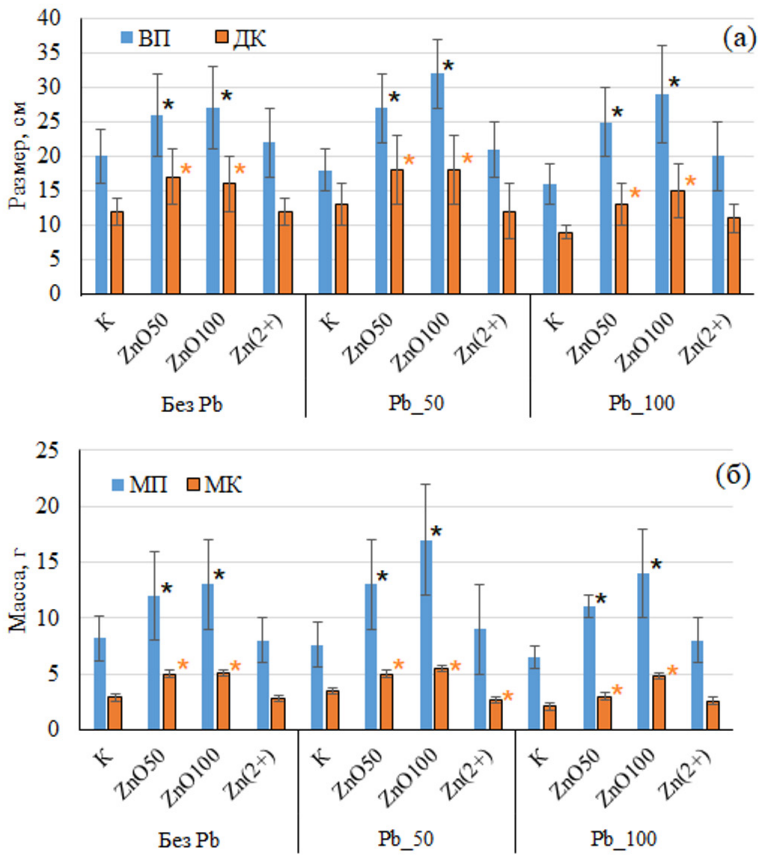


Рис. 1. Влияние внекорневых обработок наночастицами оксида цинка (ZnO НЧ) в концентрациях 50 мг/л (ZnO50), 100 мг/л (ZnO100) и сульфатом цинка 100 мг/л [Zn(2+)] при сравнении с контролем (К) на высоту побега (ВП) и длину корня (ДК) (а); масса побега (МП) и масса корня (МК) (б) в сериях экспериментов без внесения свинца в почву (без Pb) и в условиях умеренного (Pb_50) и сильного (Pb_100) свинцового стресса. Значимость различий между выборками обработанных и контрольных растений оценена по двустороннему t-критерию Стьюдента для независимых выборок ($p < 0,05$). Значимо отличные от контроля выборки указаны знаком *.

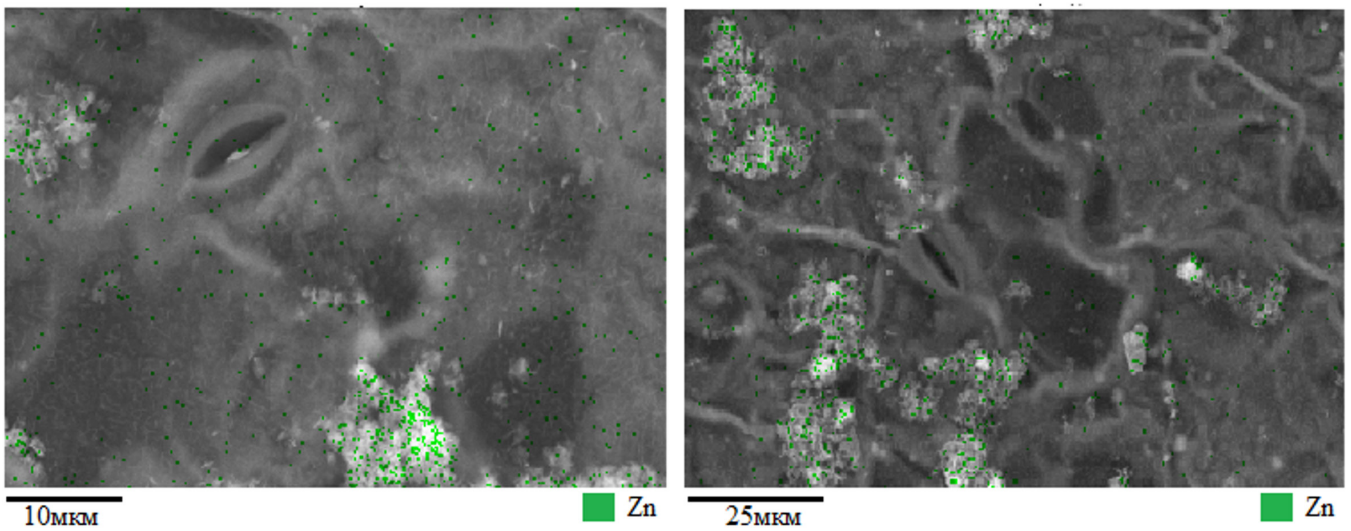


Рис. 2. СЭМ-изображение устьиц.

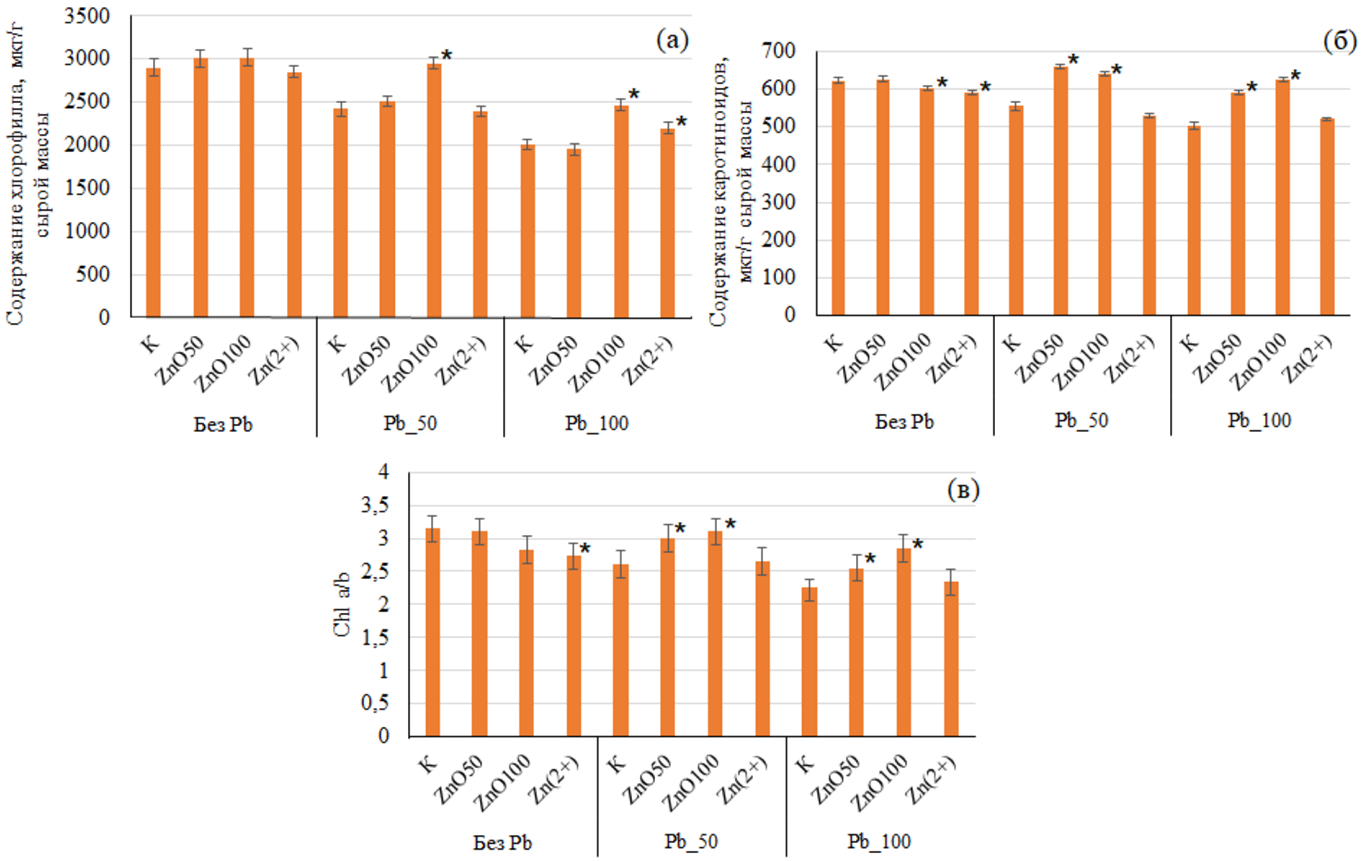


Рис. 3. Влияние внекорневых обработок наночастицами оксида цинка (ZnO НЧ) в концентрациях 50 мг/л (ZnO50), 100 мг/л (ZnO100) и сульфатом цинка 100 мг/л [Zn(2+)] по сравнению с контролем на суммарную концентрация хлорофилла *a* и *b* (а), соотношение хлорофиллов, Chl *a*/*b* (б) и каротина (в) в сериях экспериментов без внесения свинца в почву (без Pb), умеренного (Pb_50) и сильного (Pb_100) свинцового стресса. Значимость различий между выборками обработанных и контрольных растений оценена по двустороннему t-критерию Стьюдента для независимых выборок ($p < 0,05$). Значимо отличные от контроля выборки указаны знаком *.

были превышены по сравнению с контролем на 81%, 115%, 71% и 129 %, соответственно (рис. 1). Внекорневая обработка раствором соли цинка ни в одной серии экспериментов не привела к статистически значимому увеличению морфологических параметров растений по сравнению с контролем.

Наиболее выраженный протекторный и ростостимулирующий эффект наблюдается при использовании концентрации ZnO НЧ 100 мг/л, особенно в условиях сильного загрязнения почвы свинцом, где прирост показателей массы и длины корней достигал максимальных значений (до 129%). Эффективность ZnO НЧ обусловлена их наноразмерными свойствами, обеспечивающими высокую биодоступность цинка, тогда как применение раствора соли цинка в идентичных условиях оказалось неэффективным. Это указывает на то, что положительный эффект связан не просто с восполнением дефицита микроэлемента, а с комплексным действием наночастиц, вероятно, включающим антиоксидантную защиту и модуляцию физиологических процессов, как было показано в литературе [20].

СЭМ-изображения на рис. 2 позволяют судить о пути внекорневого проникновения наночастиц в растения через листья.

СЭМ четко показывает, что наночастицы и их скопления в виде конгломератов микронных размеров оседают в устьичной полости и на поверхности замыкающих клеток. Но устьица предназначены для газообмена, а не для поглощения жидкости. Поверхность устьиц обычно гидрофобная, и СЭМ показывает, что просто так капля внутрь не всасывается, а наночастицы находятся по краям устьиц. Наночастицы вызывают повреждение кутикулы и «ожоги» устьиц [10]: замыкающие клетки теряют тургор и сморщиваются. СЭМ фиксирует разрыв мембран в районе устьичной щели, куда устремляются частицы. Здесь возможны две трактовки: (1) агрессивный путь, когда частицы сами проделывают отверстия и (2) пассивный путь, ведь любое опрыскивание (даже водой через пульверизатор) вызывает микротравмы листа (разрывы кутикулы из-за гидроудара) и частицы используют эти готовые повреждения.

Влияние на фотосинтетические пигменты в физиологических условиях и при свинцовом стрессе показано на рис. 3.

На рис. 3 видно, что свинцовый стресс 50 мг Pb/кг привёл к умеренному снижению содержания общего хлорофилла в свежих листьях (на 17% от контроля) и незначимому увеличению каротиноидов, в то время как сильный свинцовый стресс (100 мг Pb/кг) значительно снизил содержание хлорофилла (на 31 %) и каротиноидов (на 25%). Причина снижения хлорофилла может состоять в том, что Pb замещает Mg в молекуле хлорофилла, ингибирует синтез аминолевулиновой кислоты (предшественника) и вызывает окислительный стресс [13]. Одновременно с этим каротиноиды – важные антиоксиданты и светособирающие пигменты. При умеренном свинцовом стрессе их содержание сначала незначительно увеличивается (возможно, как защитная реакция на окислительный стресс), а при высоком содержании Pb падает из-за разрушения мембран хлоропластов [7]. Соотношение хлорофилл *a*/хлорофилл *b* (Chl *a*/*b*) чувствительно к структурным изменениям фотосистем. Его норма для гороха составляет около 2,8–3,2, в нашем случае в контрольном образце соотношение было 3,15. Под действием Pb соотношение снизилось при среднем стрессе до

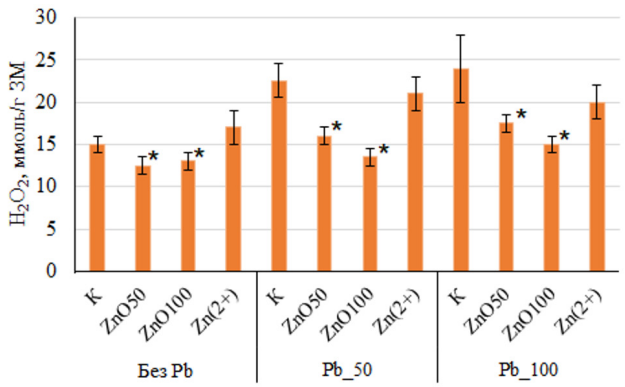


Рис. 4. Влияние внекорневых обработок наночастицами оксида цинка (ZnO НЧ) в концентрациях 50 мг/л (ZnO50), 100 мг/л (ZnO100) и сульфатом цинка 100 мг/л [Zn(2+)] по сравнению с контролем на содержание перекиси водопода в листьях гороха (H_2O_2, ммоль/г ЗМ) в сериях экспериментов без внесения свинца в почву (без Pb), умеренного (Pb_50) и сильного (Pb_100) свинцового стресса. Значимость различий между выборками обработанных и контрольных растений оценена с помощью двустороннего t-критерия Стьюдента для независимых выборок ($p < 0,05$). Достоверно отличные от контроля выборки указаны знаком *.

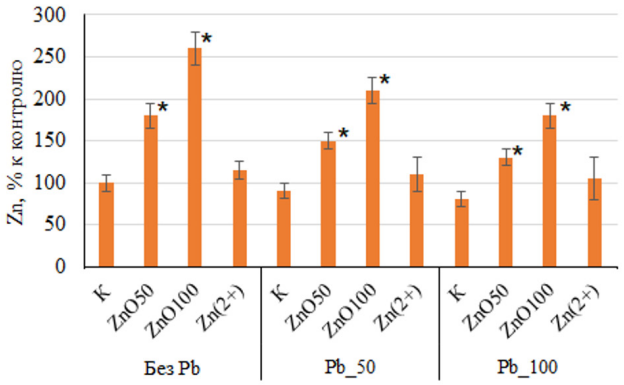


Рис. 5. Влияние внекорневых обработок наночастицами оксида цинка (ZnO НЧ) в концентрациях 50 мг/л (ZnO50), 100 мг/л (ZnO100) и сульфатом цинка 100 мг/л [Zn(2+)] на содержание Zn в стручках гороха при физиологических условиях и при свинцовом стрессе в % относительно контроля (без свинца в почве и внекорневой обработки) [Содержание цинка (100 %) в контрольных растениях (без свинца в почве и внекорневой обработки) составило 85 мкг/г сухой массы]. Показаны серии экспериментов без внесения свинца в почву (без Pb), умеренного (Pb_50) и сильного (Pb_100) свинцового стресса. Значимость различий между выборками обработанных и контрольных растений оценена по двустороннему t-критерию Стьюдента для независимых выборок ($p < 0,05$). Значимо отличные от контроля выборки указаны знаком *.

2,6, а при сильном упало до 2,25. Pb сильнее повреждает фотосистему II, где преобладает хлорофилл *a* (Chl *a*), а белки антенного комплекса (с Chl *b*) более устойчивы. Также может нарушаться превращение Chl *b* в Chl *a*. Таким образом, снижение Chl *a/b* выступает маркером деградации реакционных центров фотосистемы II [8]. Обработка наночастицами ZnO при 100 мг/л частично нормализует Chl *a/b*, возвращая к значению 3,1 за счет защиты белков фотосистемы II и поддержки синтеза Chl *a*. ZnO НЧ (особенно в концентрации 100 мг/л) действуют эффективнее сульфата цинка. Внекорневая обработка препаратом ZnO НЧ ведёт к статистически значимому увеличению содержания каротиноидов по сравнению с контролем (рис. 3). Сульфат цинка (100 мг/л в пересчете на ZnO) даёт меньший или статистически не значимый прирост. Предположительно, это связано с тем, что ионы Zn^{2+} при высоком уровне Pb могут быть токсичны, а также обладают худшей, чем у НЧ, способностью проникать через устьица в составе ионного раствора, тогда как НЧ, как показано выше, проникают через повреждения кутикулы.

Количество H_2O_2 в листьях гороха при свинцовом стрессе возрастало и варьировалось в зависимости от концентрации наночастиц, нанесенных на растения (рис. 4).

В растениях, обработанных ZnO НЧ, содержание H_2O_2 было значимо ниже, чем в растениях, обработанных сульфатом цинка, как в отсутствие стресса, так и при умеренном и сильном свинцовом стрессе (рис. 4).

Измерения количества цинка в стручках гороха (рис. 5) показали, что при физиологических условиях содержание цинка в листьях после опрыскивания наночастицами ZnO пропорционально увеличивается. Кроме того, результаты показали, что содержание цинка в листьях снижается при воздействии свинцового стресса, и это снижение более выражено компенсируется после опрыскивания наночастицами ZnO, чем после опрыскивания раствором сульфата цинка.

Выводы

Внекорневая подкормка суспензиями ZnO НЧ превосходит раствор сульфата цинка по защите от загрязнения почв свинцом. Во всех сценариях свинцового стресса обработка ZnO НЧ обеспечивала лучшее восстановление морфологических параметров (высота побега, длина корней, масса побегов и корней), чем эквивалентная по концентрации соль цинка, что может быть связано с более эффективным преодолением устьичного барьера наночастицами.

Внекорневая подкормка суспензиями ZnO НЧ эффективно восстанавливает фотосинтетический пигментный комплекс. Особенно при 100 мг/л наблюдается нормализация соотношения Chl a/b до 3,1, восстановление общего хлорофилла (до 85% от контроля при сильном свинцовом стрессе). Сульфат цинка не обеспечивает такой эффект, возможно из-за худшего проникновения через устьица и кутикулу.

Внекорневая подкормка суспензиями ZnO НЧ снижает накопление H_2O_2 (маркера окислительного стресса) в растениях, подвергшихся стрессу от загрязнения почв свинцом, тогда как сульфат цинка не дает такого эффекта. Кроме того, обработка наночастицами увеличивает содержание цинка в стручках гороха даже на фоне свинцового стресса, тогда как обработка раствором сульфата цинка не приводит к статистически значимому увеличению содержания цинка в стручках по отношению к контролю.

СЭМ-изображения показывают, что наночастицы и их конгломераты оседают в устьичной полости и на замыкающих клетках, чем могут вызывать локальные повреждения кутикулы («ожоги»), потерю тургора и разрывы мембран, через которые частицы проникают в ткань листа.

Представленное исследование имеет ограничения. Работа выполнена в вегетационном опыте (почва в горшках). Не учтены полевые факторы (ветер, осадки, УФ, перепады температур), которые могут повлиять на стабильность суспензии наночастиц и их взаимодействие с листом. Механизм проникновения наночастиц в растения остается дискуссионным. Был исследован один вид растений и одна форма наночастиц. Перенос на другие культуры (злаки, пасленовые) требует проверки. В работе отсутствуют данные о долгосрочной судьбе ZnO НЧ.

Полученные данные являются основанием для продолжения исследования в полевых условиях. Для сельского хозяйства на почвах, загрязненных свинцом (особенно в диапазоне 50–100 мг/кг), рекомендуется двукратная внекорневая обработка суспензией нано-ZnO в концентрации 100 мг/л (что соответствует ~2 кг ZnO/га). Эта доза обеспечивает максимальное восстановление биомассы и фотосинтеза даже при сильном стрессе. При умеренном загрязнении возможно использование более низкой дозы (50 мг/л) для экономии препарата и мягкой стимуляции корневой системы. Также работа выявила важные рекомендации по мониторингу в процессе полевого эксперимента. Необходимо оценивать состояние растений не только по высоте и массе, но и по соотношению Chl a/b (пороговое значение <2,7 – сигнал стресса) и содержанию каротиноидов (рост на начальных этапах стресса – благоприятный признак).

Благодарности: *Работа выполнена при поддержке грантовой программы Виктора Христенко "Шаг в будущее", ЮУрГУ. Благодарим НОЦ «Нанотехнологии» ЮУрГУ и ЦКП ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН за помощь в проведении анализов, Екатерину Булатову за синтез образца нанооксида цинка.*

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Байкенова ЮГ. Оценка степени опасности загрязнения почв тяжелыми металлами. Аграрный вестник Урала. 2014;7(125):10-4.
2. Демиденко ГА. Влияние свинца на рост и развитие семян и проростков гороха овощного. Вестник КрасГАУ. 2019;(4):16-23.
3. Павлов АА. Содержание валовых форм цинка, свинца и кадмия в дерново-подзолистых супесчаных почвах земель сельскохозяйственного назначения. Аграрный вестник Урала. 2024;24(9):1138-46. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-09-1138-1146.

Общий список литературы / Reference List

1. Baikenova YuG. [Estimation of the degree of danger of soil pollution with heavy metals]. Agrarnyi Vestnik Urala. 2014;7(125):10-4. (In Russ).
2. Demidenko GN. [The Influence of lead on growth and development of seeds and seed growth of vegetable pea]. Vestnik Krasnoyarskogo Gosudarstvennogo Universiteta. 2019;(4):16-23 (In Russ.).
3. Pavlov AA. [Content of gross forms of zinc, lead and cadmium in sod-podzolic sandy loam soils of agricultural lands]. Agrarnyi Vestnik Urala. 2024;24(9):1138-46. (In Russ).
4. Ahsan M, Radicetti E, Mancinelli R, Ali HM, Younis A, Sajid M, Manan A, Ali S, Valipour M, Zulfiqar H. Alleviation of cadmium stress and improved growth performance of periwinkle (*Catharanthus roseus* L.) by foliar application of zinc oxide nanoparticles. South African Journal of Botany. South Afr J Bot. 2025;176:129-40. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.10.057.
5. Alam MZ, Carpenter-Boggs L, Hoque MA, Ahammed GJ. Effect of soil amendments on antioxidant activity and photosynthetic pigments in pea crops grown in arsenic contaminated soil. Heliyon. 2020;6(11):e05475. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05475.
6. Ali MF, Ali A, Bilal S, Ali U, Huma N, Adnan M. Mitigating zinc deficiency in plants and soils through agronomic techniques: A review. J Environ Agric Sci. 2021;23(1&2):1-10.
7. Baek SA, Han T, Ahn SK, Kang H, Cho MR, Lee SC, Im KH. Effects of heavy metals on plant growths and pigment contents in *Arabidopsis thaliana*. Plant Pathol J. 2012;28(4):446-452. https://doi.org/10.5423/PPJ.NT.01.2012.0006.
8. Bhattacharjee S, Mukherjee AK. Heavy metals alter photosynthetic pigment profiles as well as activities of chlorophyllase and 5-aminolevulinic acid dehydratase (ALAD) in Amaranthus lividus seedlings. J Environ Biol. 2003;24(4):395-9. PMID:15248652
9. Black R, Allen L, Bhutta ZA, Caulfield LE, Onis M, Ezzati M, Mathers C, Rivera-Dommarco J. Maternal and child undernutrition: global and re-

gional exposures and health consequences. Lancet. 2008;371(9608):243-60. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61690-0.
10. Burkhardt J, Basi S, Pariyar S, Hunsche M. Stomatal penetration by aqueous solutions - an update involving leaf surface particles. New Phytologist. 2012;196(3):774-87. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04307.x.
11. Escobedo Monge MF, Barrado E, Vicente CA, Redondo Del Río MP, Marugán de Miguelsanz JM. Zinc nutritional status in patients with cystic fibrosis. Nutrients. 2019;11(1):150. https://doi.org/10.3390/nu11010150.
12. Jagota N, Singh S, Kaur H, Kaur R, Sharma A. Oxidative stress in lead toxicity in plants and its amelioration. In: Kumar N, Kumar JA, eds. Lead Toxicity Mitigation: Sustainable Nexus Approaches. Changsha: Springer; 2024. p. 299-333. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46146-0_14.
13. Khan A, Khan AA, Irfan M, Sayeed Akhtar M, Hasan SA. Lead-induced modification of growth and yield of *Linum usitatissimum* L. and its soil remediation potential. Int J Phytoremediat. 2022;25(8):1067-1076. https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2128040.
14. Panahirad S, Dadpour M, Gohari G, Fotopoulos V. Simultaneous application of titanium dioxide (TiO2) and zinc oxide (ZnO) nanoparticles ameliorates lead (Pb) stress effects in medicinal plant *Echinacea purpurea* (L.) Moench. Plant Stress. 2024;13:100546. https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100546.
15. Rockström J, Williams J, Daily G, Noble A, Matthews N, Gordon L, Wetterstrand H, DeClerck F, Shah M, Steduto P, Fraiture C, Hatibu N, Unver O, Bird J, Sibanda L, Smith J. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. Ambio. 2017;46(1):4-17. https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6.
16. Singh T, Saffeullah P, Umar S. Foliar application of zinc oxide (ZnO) nanoparticles ameliorates growth, yield traits, osmolytes, cell viability, and antioxidant system of Brassica juncea (L.) Czern. grown in lead (Pb) stress. Chemosphere. 2025;(370):143950. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143950.
17. Suganya A, Saravanan A, Baskar M, Pandiyarajan P, Kavimani R. Agronomic biofortification of maize (*Zea mays* L.) with zinc by using of graded levels of zinc in combination with zinc solubilizing bacteria and Arbuscular mycorrhizal fungi. J Plant Nutrit. 2020;44(7):988-994. https://doi:10.1080/01904167.2020.1845383.
18. Sun Y, Mfarrej MB, Song X, Ma J, Min B, Chen Fu. New insights in to the ameliorative effects of zinc and iron oxide nanoparticles to arsenic stressed spinach (*Spinacia oleracea* L.). Plant Physiol Biochem. 2023;199:107715. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107715.
19. Yotsova E, Dobrikova A, Stefanov M, Misheva S, Bardáčová M, Matušíková I, Žideková L, Blehová A, Apostolova E. Effects of cadmium on two wheat cultivars depending on different nitrogen supply. Plant Physiol Biochem. 2020;155:789-99. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.06.042.
20. Zafar H, Ali A, Ali JS, Haq IU, Zia M. Effect of ZnO Nanoparticles on *Brassica nigra* seedlings and stem explants: Growth dynamics and antioxidative response. Front Plant Sci. 2016;7:00535. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00535.

