

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 577.3

DOI: 10.5281/zenodo.14923295

EDN: FSQGXС

ВЛИЯНИЕ СОЧЕТАННОГО ДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИИ ЧАСТОТОЙ 10–100 ГЦ И НАНОЧАСТИЦ Fe_3O_4 НА РАННИЕ СТАДИИ РАЗВИТИЯ *ZEA MAYS* L. И *HORDEUM VULGARE* L.

© 2025. К. А. Авдеева, В. О. Корниенко

В работе исследовано влияние сочетанного действия вибрации частотой 10–100 Гц и наночастиц Fe_3O_4 на ранние стадии развития *Zea mays* L. и *Hordeum vulgare* L. Установлено, что при использовании наночастиц железа концентрацией 2,4 мг/мл повысилась энергия прорастания семян кукурузы сахарной на 36 %, всхожесть – на 64 %, увеличилась длина проростков на 5 %. Стимулирующий эффект выявили также для концентрации наночастиц железа 1,2 мг/мл, а ингибирующий для 0,8 мг/мл. Концентрация наночастиц 1,6 мг/мл достоверно повлияла на онтогенетические и морфометрические показатели ячменя обыкновенного. Длина стебля в отличие от контрольной группы возросла на 5 %, диаметр на 15 %. Длина корня в среднем возросла на 15 %, а диаметр на 21 %. Остальные использованные концентрации для проведения экспериментальной части работы проявили ингибирующее или нейтральное действие. Также было установлено, что под влиянием вибрации в диапазоне 10–100 Гц, с дополнительной обработкой семян концентрацией Fe_3O_4 – 2,4 мг/мл, процесс развития организма идет неравномерно. Наибольшую чувствительность к вибрации образцы проявляют на первых этапах постэмбрионального развития, начиная с момента инициации прорастания, до формирования проростков. В большей степени ингибирующим действием обладали частоты 10, 20, 50 и 80 Гц, а стимулирующим – 40, 60 и 70 Гц. Стимулирующее влияние сочетанного действия вибрации и наночастиц железа (1,6 мг/мл) на надземную часть ячменя обыкновенного выявили на частотах 10 и 20 Гц. Увеличение морфометрических показателей составило ~ 30 % от контрольных значений. Для корневой системы стимулирующий эффект наблюдали на частотах 70–100 Гц. Длина корневой системы в среднем была больше на 26–41 % от контроля. Достоверных отличий в длине стебля на частотах 10 и 20 Гц не наблюдалось. Достоверное ингибирующее действие вибрации выявлено на частоте 30 Гц.

Ключевые слова: онтогенез растений, техногенная вибрация, моделирование, морфометрия, сочетанное действие, наночастицы Fe_3O_4 .

Введение. С XX века человечество активно стало применять наноматериалы и наночастицы в различных отраслях сельского хозяйства. Наиболее перспективными в своем применении являются наноматериалы из наночастиц железа и его оксидов в связи с их уникальными свойствами и предполагаемой малой токсичности для живых организмов. Использование наночастиц открывает новые возможности для человека, но, с другой стороны, в силу своей малой изученности, представляет потенциальный риск для здоровья человека и окружающей среды и требует дополнительных исследований [1]. Наночастицы обладают высокой адсорбционной емкостью, химической реакционной способностью и каталитической активностью [2]. Таким образом, наноматериалы используют в различных отраслях: промышленности, медицине и биологии, для мониторинга качества окружающей среды, для биоремедиации почв и очистки сточных вод, для интенсификации сельского хозяйства [3].

Исследований, посвященных использованию наночастиц в сельском хозяйстве достаточно мало, по сравнению с исследованиями в биомедицинской отрасли. Однако известно, что наночастицы могут использоваться и в других процессах сельскохозяйственной отрасли. Так, предпосевная обработка семян кукурузы

ультрадисперсным порошком железа повышала урожайность и способствовала снижению загрязнения зерен кадмием и свинцом [4]. Данное явление объясняется более эффективной доставкой микроэлементов в ткани самого растения. При внесении микроэлементов в виде солей и хелатов используется лишь малая их часть. Доставка ионов через мембраны лимитируется количеством специализированных транспортных белков. Многие наночастицы из-за своих малых размеров не нуждаются в ионно-транспортном механизме и могут более эффективно доставлять микроэлементы в ткани и клетки растительного организма [3].

Наибольший интерес среди известных видов наночастиц представляет магнетит (Fe_3O_4). Кристаллическая решетка магнетита содержит атомы железа с разной валентностью – Fe (II) и Fe (III) [5]. Магнетит при комнатной температуре – ферримагнетик, но при размере частиц < 30 нм он теряет постоянную намагниченность и проявляет суперпарамагнитные свойства, намагничиваясь только в магнитном поле, подобно парамагнетикам. Наночастицы оксидов железа менее токсичны, по сравнению с наночастицами кобальта и никеля. Они биосовместимы, довольно стабильны физически и химически, недороги в производстве и их поведение легко контролировать магнитометрией. Поэтому данный тип наночастиц представляет наибольший интерес для применения в сельском хозяйстве. Однако, без специального покрытия наночастицы образуют устойчивые агрегаты, что негативно влияет на их магнитные свойства [6].

Механизмы и последствия трансформации и накопления наночастиц растениями пока мало изучены, так как результаты экспериментов достаточно противоречивы и зависят от множества факторов [7]. К таким факторам можно отнести как свойства наночастиц оксида железа, так и ростовой субстрат и видовую принадлежность растений [8]. Обладая высокой адгезией к корням, наночастицы могут оказывать физическое и химическое токсическое действие на растение. Задерживаясь на поверхности эпидермиса, либо в дальнейшем внедряясь в клетки корня при определенных условиях, частицы могут закупоривать поры и ионные каналы, а потом модулировать поступление воды и минеральных веществ в растения. Малый размер наночастиц позволяет им проникать даже через сосудистую ткань и распространяться по побегу, перемещаясь через плазмодесмы [10]. Наночастицы также способны транспортироваться по апопласту и хелатироваться [9].

Большой интерес представляет также не монофакторное действие наночастиц на растительный организм, а в комбинации с другими физическими или химическим факторами. Одним из распространенных физических факторов, влияющих на сельскохозяйственные растения является вибрация. Вдоль загруженных автомагистралей она, посредством почвы, передаётся на довольно большие расстояния и влияет на рост и развитие сельскохозяйственных культур. В процессе эволюции, растения выработали механизмы адаптации к воздействию стресса (механических стимулов, вибрации) [9, 12, 15]. Процессы, лежащие в основе морфологических ответов растения на действие вибрации, остаются мало исследованными [11, 14]. По результатам исследований [3], было выявлено, что под влиянием механических колебаний у кукурузы достоверно снижается длина стебля и корней на частотах 10–40 Гц. Незначительный стимулирующий эффект наблюдался на частоте 50 Гц.

Таким образом, актуальным является изучение как действие наночастиц в отдельности на растительный организм, так и в комбинации с другими факторами, которые способны снижать или повышать продуктивность и морфологические показатели сельскохозяйственных культур.

Цель работы – исследование влияния сочетанного действия вибрации частотой 10–100 Гц и наночастиц Fe_3O_4 на ранние стадии развития *Zea mays* L. и *Hordeum vulgare* L.

Задачи:

1. Исследовать влияние наночастиц Fe_3O_4 с концентрацией 0,8; 1,2; 1,6; 2,4 мг/мл на морфометрию и онтогенез *Z. mays* L. и *H. vulgare* L.

2. Исследовать влияние совместного действия вибрации частотой 10–100 Гц и наночастиц Fe_3O_4 с концентрацией 2,4 мг/мл на морфометрию и онтогенез *Z. mays* L.

3. Исследовать влияние совместного действия вибрации частотой 10–100 Гц и наночастиц Fe_3O_4 с концентрацией 1,6 мг/мл на морфометрию и онтогенез *H. vulgare* L.

Материалы и методы. *Синтез и оцифровка магнитных наночастиц.* Для выполнения эксперимента синтезировались магнитные наночастицы магнетита Fe_3O_4 -ALB (частицы, стабилизированные альбуминовым покрытием) (рис. 1). Синтез магнитных наночастиц осуществляли по аналогии с методикой, описанной в работе [12, 13]. Анализ образцов синтезированных наночастиц проводили с использованием электронной микроскопии.

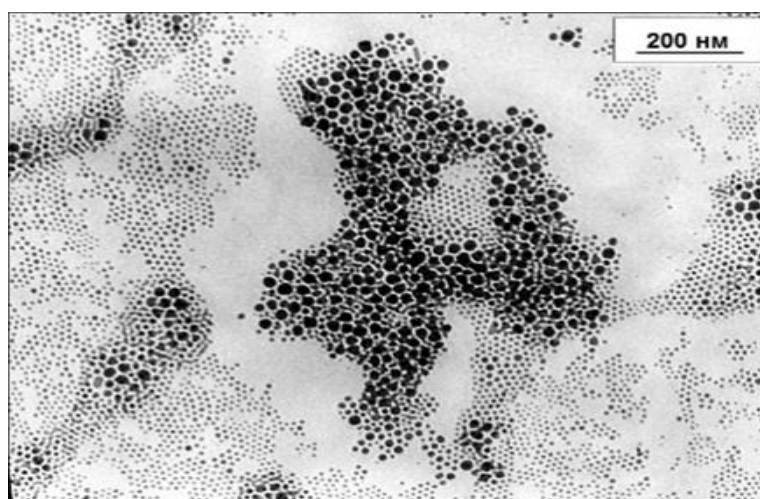


Рис. 1. Микрофотография наночастиц, стабилизированных альбуминовым покрытием

Электронные микрофотографии магнитных наночастиц получали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM 200A. Далее наносили на ультразвуковой излучатель с плоским наконечником и распыляли на тонкую углеродную пленку толщиной 10–20 нм, размещенную на специальной медной сеточке для просвечивающей электронной микроскопии. Анализ электронных микрофотографий для определения линейных размеров магнитных наночастиц выполнен с использованием инструментов программ *AxioVision* Rel. 4.8. Концентрация наночастиц составляла 0,8 г/мл, 1,2 мг/мл, 1,6 мг/мл, 2,4 мг/мл.

Методика закладки образцов. Для экспериментальной части работы использовались семена кукурузы сахарной и ячменя обыкновенного. Семена закладывали в ростовую камеру. В контрольных вариантах семенной материал замачивали в дистиллированной воде, экспериментальные группы обрабатывали суспензией наночастиц металлов разных концентраций. После инкубации семян суспензию наночастиц металлов сливали. Экспозиция составляла 2 часа. После чего семена помещали в чашки Петри, при этом подложкой для семян служила влажная фильтровальная бумага. Семена проращивали при температуре 20 °С. Энергию

прорастания и всхожесть семян определяли в сроки, указанные в ГОСТ 12038-84: на 3-и сутки (энергия прорастания) и 8-е сутки (всхожесть) [14].

Для моделирования воздействия техногенной вибрации на ранние стадии роста и развития *Z. mays* и *H. vulgare* экспериментальные образцы подвергали воздействию исследуемого фактора непрерывно, начиная с обработки семян суспензией наночастиц и их закладки на проращивание. Контрольные образцы были удалены от виброустановки, полив осуществляли только дистиллированной водой. В каждом варианте опыта и контроля выборка составляла 50 семян.

Проращивание осуществляли в течение 8 дней. На третий день была проведена оценка энергии прорастания, на 8-й день – оценивали морфометрические показатели и онтогенетическое развитие.

В ходе проведения исследования были сформированы экспериментальные группы растений. Для выполнения первой задачи: исследование влияния наночастиц Fe_3O_4 с концентрацией 0,8; 1,2; 1,6; 2,4 мг/мл на ростовые процессы и онтогенез *Z. mays* L. и *H. vulgare* сформированы по 5 групп для каждого вида:

- I – контрольная (без обработки наночастицами и вибрацией);
- II – обработка НЧ с концентрацией 0,8 мг/мл;
- III – обработка НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл;
- IV – обработка НЧ с концентрацией 2,4 мг/мл;
- V – обработка НЧ с концентрацией 1,2 мг/мл.

Для выполнения второй и третьей задачи было сформировано по 11 групп *Z. mays* L. и *H. vulgare* (табл. 1).

Таблица 1

Схема обработки семян *Zea mays* L. и *Hordeum vulgare* L.

Группа	Параметры обработки	
	<i>Zea mays</i> L.	<i>Hordeum vulgare</i> L.
I	контрольная (без обработки наночастицами и вибрацией);	контрольная (без обработки наночастицами и вибрацией);
II	обработка НЧ с концентрацией 2,4 мг/мл + 10 Гц;	обработка НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл + 10 Гц;
III	обработка НЧ с концентрацией 2,4 мг/мл + 20 Гц	обработка НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл + 20 Гц
IV	обработка НЧ с концентрацией 2,4 мг/мл + 30 Гц	обработка НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл + 30 Гц
V	обработка НЧ с концентрацией 2,4 мг/мл + 40 Гц	обработка НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл + 40 Гц
VI	обработка НЧ с концентрацией 2,4 мг/мл + 50 Гц	обработка НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл + 50 Гц
VII	обработка НЧ с концентрацией 2,4 мг/мл + 60 Гц	обработка НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл + 60 Гц
VIII	обработка НЧ с концентрацией 2,4 мг/мл + 70 Гц	обработка НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл + 70 Гц
IX	обработка НЧ с концентрацией 2,4 мг/мл + 80 Гц	обработка НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл + 80 Гц
X	обработка НЧ с концентрацией 2,4 мг/мл + 90 Гц	обработка НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл + 90 Гц
XI	обработка НЧ с концентрацией 2,4 мг/мл + 100 Гц	обработка НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл + 100 Гц

Вибрационно-частотный диапазон выбран в связи с его преобладанием в техногенно-загруженном регионе г. Донецка (автотранспорт, ж/д транспорт, промышленные предприятия).

После проведения экспериментальной части были произведены морфометрические измерения стебля и корней опытных и контрольной групп. Достоверность отличий средних значений полученных данных определяли с использованием t-теста. В пределах каждой группы и по объединённым в общий пул данным обеих групп определяли коэффициенты корреляции и их достоверность. Зависимости между морфометрическими показателями и группой (концентрацией) определяли с применением t-теста. Для статистической обработки данных использовали программы «Statistica 8» (StatSoft Inc.) и «Excel 2010» (Microsoft Corporation). Сравнение средних значений независимых выборок проводили по критерию Стьюдента или Манна-Уитни, зависимых — тест Вилкоксона.

Результаты и обсуждение. *Морфометрические и онтогенетические изменения образцов *Z. mays* L.* Энергия прорастания семян кукурузы возрастает после обработки семян наночастицами разных металлов, по сравнению с контролем. Однако после проведенного эксперимента эффективность воздействия наночастиц наблюдали не у всех групп. Не все образцы контрольной группы (I) перешли в фазу развития всходов: 20 % невсхожие семена (не проросли совсем), у 12 % наблюдали набухание, и только у 56 % – колеоптиля; II группа – 30 % образцов не проросли, 30 % набухли и 40 % достигли стадии развития колеоптиля; III группа – 38 % не проросших, 62 % набухли (поглотили воду); IV группа – 36 % не проросшие семена (в фазе набухания), 64 % выпустили колеоптиль; V группа – 34 % не проросли, 54 % набухли и 12 % находились в стадии колеоптиля.

На восьмой день были сняты морфометрические показатели *Z. mays* L. Увеличение длины и диаметра стебля в отличие от контрольной группы выявлены в IV опытной группе: 80 % для главного корня и 20 % для стебля (рис. 2). Для второй группы наблюдали нейтральный эффект, для III и V – ингибирующее действие на 50–60 %.

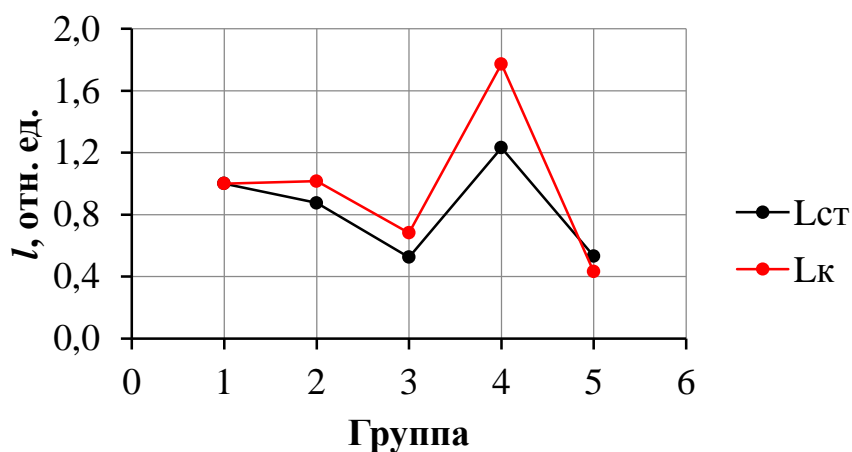
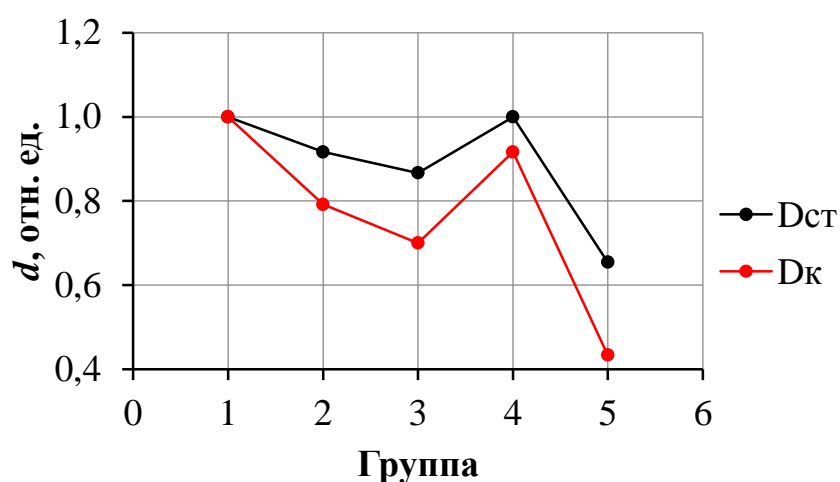


Рис. 2. Изменение длины стебля и корня *Zea mays* L.

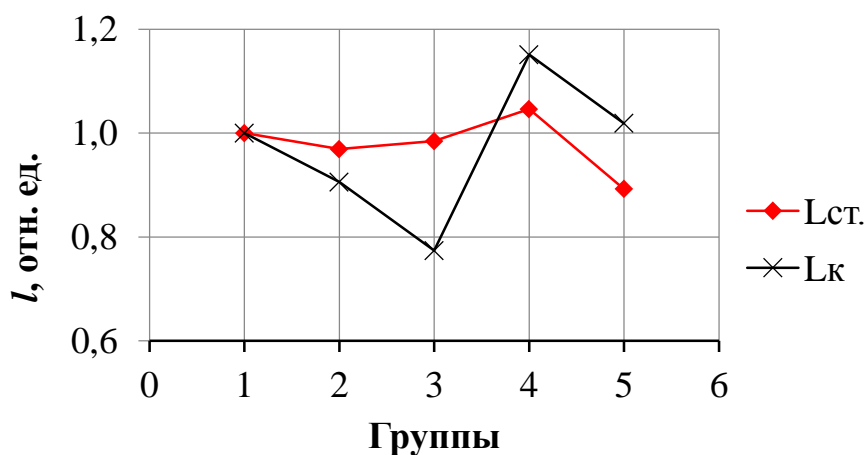
Диаметр корня в вариантах опыта II, III и V ниже контрольного значения (рис. 3). Значительные изменения морфометрии выявили для V группы: ~60 % снижение диаметра главного корня и ~35 % стебля. Для IV выборки получили нейтральный эффект. Имеется незначительное снижение ростовых показателей корня.

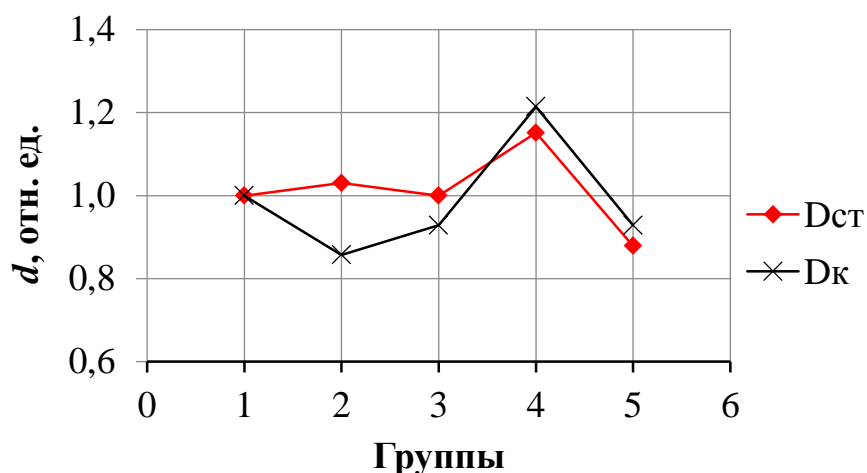
Рис. 3. Изменение диаметра стебля и корня *Zea mays* L.

Морфометрические и онтогенетические изменения образцов H. vulgare L. Наблюдение показало, что семена на 3 день эксперимента находились в трех фазах: не проросли, набухли, и вышли в стадию coleoptilya. Образцы контрольной группы имели следующие показатели: не проросли 29 %, набухших семян было 27 %, а в фазе coleoptilya всего 44 %.

Только у семян IV группы, с концентрацией наночастиц 1,6 мг/мл наблюдали незначительное стимулирующее действие. Так, в фазе не проросших семян находилось всего 17 % выборки, набухших было 32 %, а в фазе coleoptilya 51 %. Образцы контрольной группы имели следующее распределение: 14 % набухли, у 21 % coleoptilya, 1 лист у 54 % семян, и 11 % имеют 2 листа; II группа – 19 % достигли стадии coleoptilya, 45 % с одним листом и 8 % – два листа; III группа – 17 % набухли, 32 % находятся в стадии coleoptilya, 51 % – 1 лист и 7 % с двумя листьями; IV группа – 23 % в стадии coleoptilya, 67 % – один лист и 23 % – два листа; V группа – 32 % набухли 41 % находились в стадии coleoptilya, 27 % с одним листом и 3 % два листа.

На восьмой день были сняты морфометрические показатели. Увеличение длины и диаметра стебля в отличие от контрольной группы наблюдали в IV опытной группе (рис. 4, 5). Остальные варианты обработки семян физическими факторами и наночастицами имеют значения меньше контрольной группы, а выступают как ингибиторы.

Рис. 4. Изменение длины стебля и корня *Hordeum vulgare* L.

Рис. 5. Изменение диаметра стебля и корня *Hordeum vulgare* L.

Концентрация наночастиц 1,6 мг/мл достоверно повлияла на морфометрические показатели стебля и корневой системы. Длина стебля в отличие от контрольной группы возросла на 5 %, диаметр на 15 %. Длина корня в среднем возросла на 15 %, а диаметр на 21 %. Остальные использованные концентрации при проведении эксперимента проявили ингибирующее или нейтральное действие.

Результаты влияния совместного действия вибрации частотой 10–100 Гц и наночастиц Fe₃O₄ с концентрацией 2,4 мг/мл на морфометрию и онтогенез Z. mays L. На третьи сутки исследования изучали онтогенетическое (постэмбриональное) развитие контрольных и опытных образцов кукурузы сахарной *Z. mays* L, которые подвергались действию вибрации в диапазоне 10–100 Гц, после обработки концентрацией наночастиц 2,4 мг/мл. Под действием вибрации семена кукурузы прорастали менее активно, чем в контроле, хотя при вибрации 30 Гц, 40 Гц и 60 Гц ингибирующий эффект был менее значительным.

При изучении динамики изменения образцов кукурузы сахарной по фазам онтогенеза на 8-е сутки выяснилось, что процесс прорастания семян при вибрации с разной частотой ингибируется меньше, чем прорастание и набухание, т.е. в этих условиях наблюдается как бы "консервация" прорастания семян.

На 10 день после закладки кукурузы наблюдается следующая картина (рис. 6): в результате все образцы контрольной группы (I) попали в фазу развития всходов (у 50 % преобладала фаза колеоптиль, 40 % имели стадию развития 1 листа), II, III и IV группы – являются наиболее приближенной к контролю, при этом количество развитых образцов меньше, однако для развития корневой системы вибрационный фактор проявил стимулирующий эффект; V группа – наблюдали стимулирование прорастания семян из них 34 % имели стадию одного листа и хорошо развитый главный корень с множеством корневых отростков; VI группа – также произошло стимулирование прорастания семян кукурузы; VIII, X и XI группы – претерпели наибольшие изменения вследствие вибрационной нагрузки, т. к. в среднем 30 % остались не проросшими, 10 % только проклюнулись и 5 % выпустили небольшой стебель и только у 50 % был развит колеоптиль; IX группа – 44 образца находились в фазе развития всходов (выпустили колеоптиль).

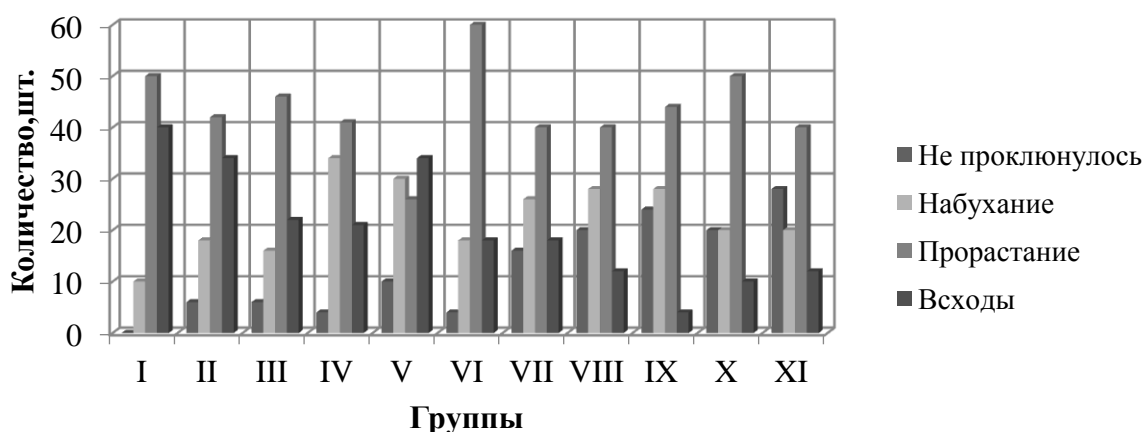


Рис. 6. Диаграмма образцов кукурузы сахарной по фазам онтогенеза

При обработке морфометрических показателей, были получены следующие данные. Длина стебля (рис. 7): статистически значимый стимулирующий эффект (22 %) наблюдается на частоте 40 Гц; ингибирующий (22–28 %) – 10, 30, 50, 100 Гц.

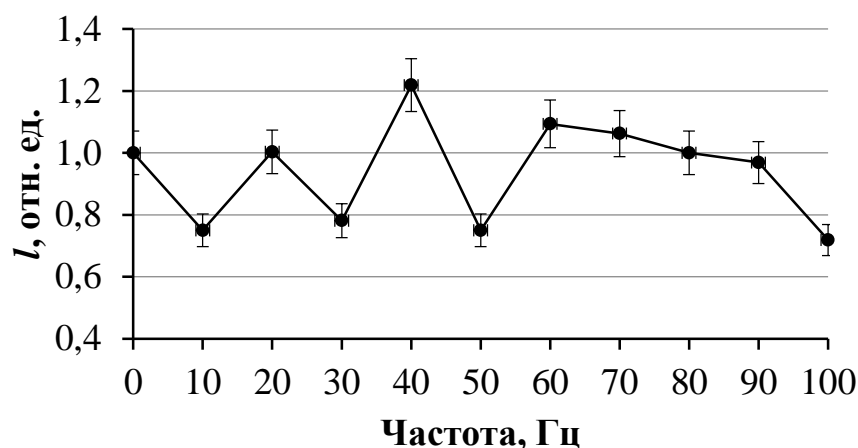


Рис. 7. Зависимость длины стебля (в относительных единицах*) от частоты вибрации в диапазоне 10–100 Гц

Длина корня (рис. 8): статистически значимый стимулирующий эффект (5-ти кратный) наблюдается на частотах 60 и 70 Гц; ингибирующий (29–41 %) – 10, 20, 50, 80 Гц.

Диаметр стебля (рис. 9): стимулирующего эффекта не обнаружено, на частотах 30, 50, 90 и 100 Гц достоверных отличий от контроля не было; ингибирующий (21–37 %) – 10, 20, 60, 70, 80 Гц.

Диаметр корня (рис. 10): статистически значимый стимулирующий эффект (18–20 %) наблюдается на частотах 30, 40 и 100 Гц; статистически значимого ингибирующего эффекта обнаружено не было.

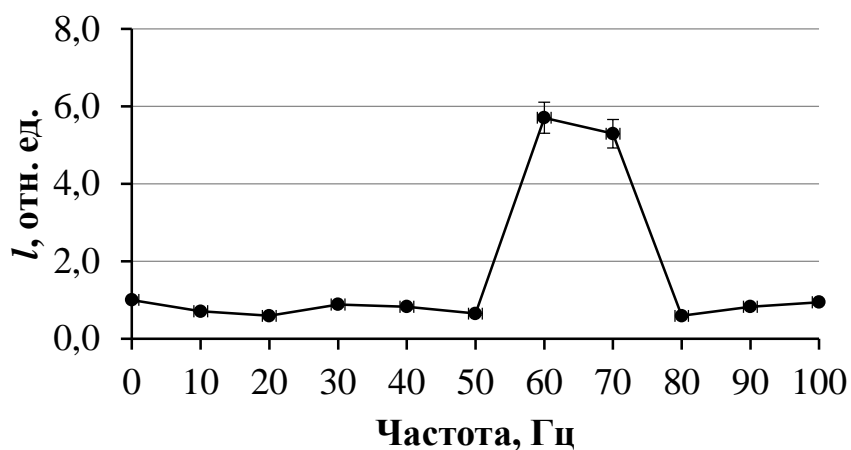


Рис. 8. Зависимость длины корня (в относительные единицах*) от частоты вибрации в диапазоне 10–100 Гц

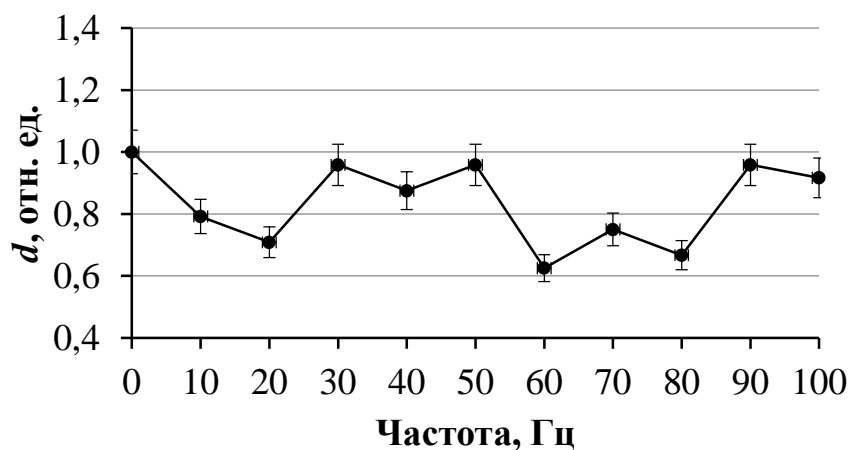


Рис. 9. Зависимость диаметра стебля (в относительные единицах*) от частоты вибрации в диапазоне 10–100 Гц

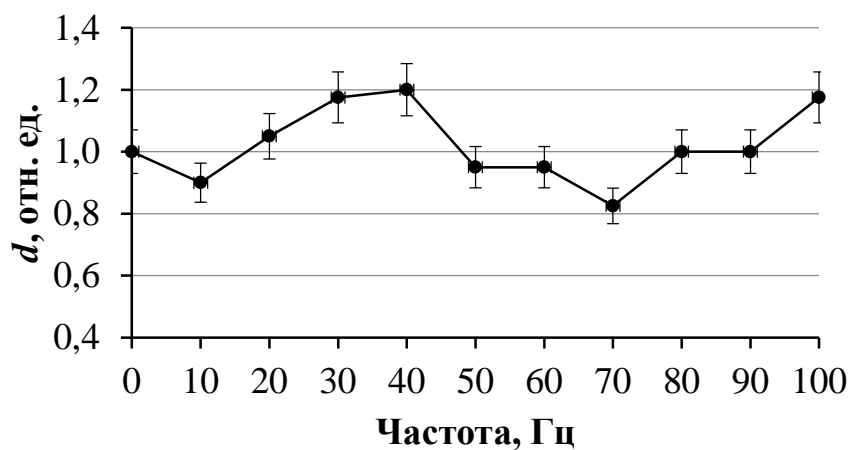


Рис. 10. Зависимость диаметра корня (в относительные единицах) от частоты вибрации в диапазоне 10–100 Гц

Влияние механических колебаний на морфометрические показатели кукурузы оказалось значительным ($p > 0,95$) на частотах 10 Гц и 20 Гц. У растений угнеталась корневая система и ростовые показатели стебля. На частотах 50 и 80 Гц происходило значительное угнетение длины корневой системы.

Общий стимулирующий эффект проявился на частоте 40 Гц. На частотах 60 и 70 Гц наблюдалось увеличение длины стебля и корневой системы, однако диаметр стебля при этом был на 30 % меньше, чем у контроля. Тем не менее положительный эффект весьма значителен (5-ти кратный) и его стоит в дальнейшем исследовать детальнее.

На частотах 30, 90, 100 Гц достоверных изменений ростовых процессов не наблюдалось, лишь незначительное снижение длины стебля.

*Результаты онтогенетических исследований *H. vulgare* L. после обработки НЧ с концентрацией 1,6 мг/мл и вибрацией частотой 10–100 Гц (шаг 10 Гц).* На третий день исследования после обработки вибрацией наблюдали энергию прорастания семян ячменя обыкновенного. После трехдневного воздействия вибрацией на образцы семян ячменя обыкновенного, в опытных группах IV, VII, VIII энергия прорастания семян составляет 100 %. На седьмой день исследования мы обнаружили незначительные различия в фазах онтогенеза (рис. 6) по сравнению с контролем (I группой), в вариантах опыта I, IV, V, VI, VIII, IX, XI изменений онтогенетического развития не наблюдали. Ингибирующее действие факторов выявили в X группе. Стимулирующее действие вибрации совместно с наночастицами на онтогенетическое (постэмбриональное) развитие (98–100 %) опытных групп по отношению к контрольной группе отметили для II, III и VII группы.

По результатам исследования можно отметить, что низкочастотная вибрация 10, 20, 30, 60 Гц проявила стимулирующее действие. Угнетающее действие выявили для образцов семян ячменя обыкновенного с высокой частотой вибрации 80, 90 и 100 Гц.

Без изменений по отношению к контрольной группе образцов семян остались опытные группы с частотой вибрации 40, 50, 70.

На 10 сутки исследования после вибрационной обработки образцов ячменя обыкновенного с частотой от 10 до 100 Гц наблюдали, морфометрические изменения ростков ячменя.

Стимулирующее влияние сочетанного действия вибрации и наночастиц (1,6 мг/мл) на надземную часть ячменя обыкновенного выявили на частотах 10 и 20 Гц (низкочастотный диапазон) (рис. 11). Увеличение морфометрических показателей составило ~ 30 % от контрольных значений.

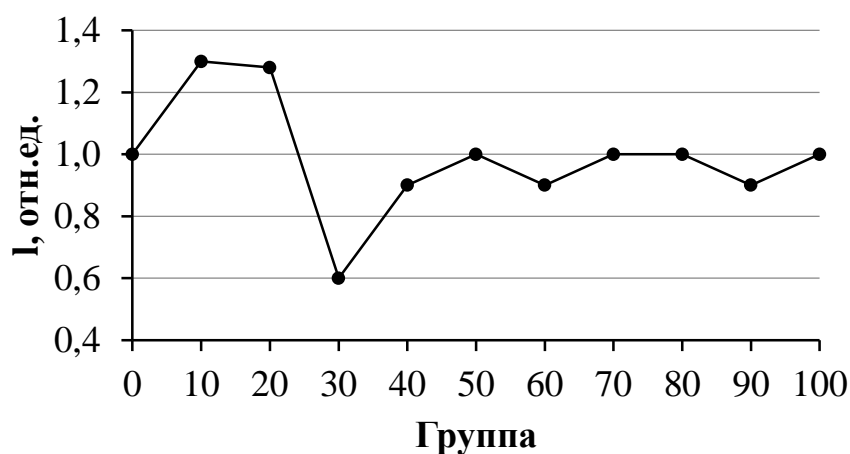


Рис. 11. Среднее значение относительной длины стеблей на разных частотах при обработке наночастицами концентрацией 1,6 мг/мл

Для корневой системы стимулирующий эффект наблюдали на частотах 70–100 Гц (рис. 12). Длина корневой системы в среднем была больше на 26–41 % от контроля. Достоверных отличий в длине стебля на частотах 10 и 20 Гц не наблюдалось ($p < 0,05$).

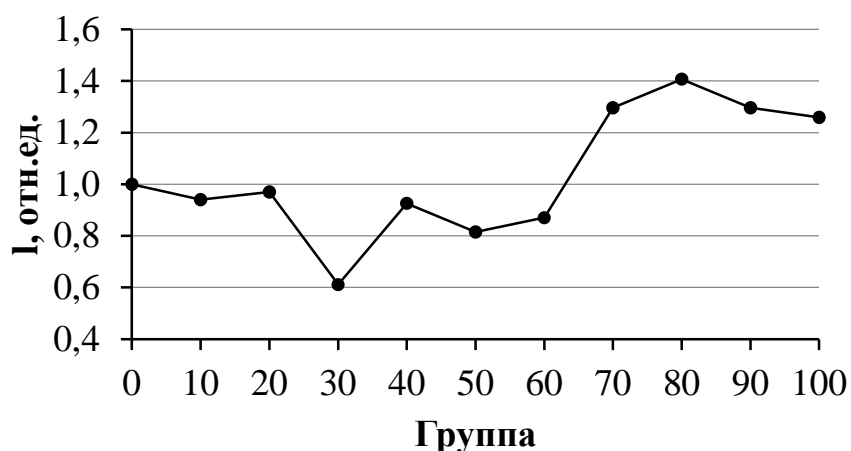


Рис. 12. Среднее значение длины корней на разных частотах при обработке наночастицами концентрацией 1,6 мг/мл

Выводы

1. При использовании наночастиц железа концентрацией 2,4 мг/мл повысилась энергия прорастания семян кукурузы сахарной на 36 %, всхожесть – на 64 %, увеличилась длина проростков на 5 %. Стимулирующий эффект проявили концентрации 1,2 мг/мл (d стебля – 2,9 %, l стебля – 2,9 %, l корня – 6,8 %, d корня – 1,8 %), 2,4 мг/мл (d стебля – 6,9 %, l стебля – 6,9 %, l корня – 18,5 %, d корня – 2,4 %), а ингибирующий 0,8 мг/мл (d стебля – 2,2 %, l стебля – 4,9 %, l корня – 14,5 %, d корня – 1,6 %).

Концентрация наночастиц 1,6 мг/мл достоверно повлияла на онтогенетические и морфометрические показатели ячменя обыкновенного. Длина стебля в отличие от контрольной группы возросла на 5 %, диаметр на 15 % ($p < 0,05$). Длина корня в среднем возросла на 15 %, а диаметр на 21 %. Остальные, использованные в эксперименте концентрации, проявили ингибирующее или нейтральное действие.

2. Установлено, что под влиянием вибрации в диапазоне 10–100 Гц, с дополнительной обработкой семян концентрацией Fe_3O_4 – 2,4 мг/мл, процесс развития организма идет неравномерно. В большей степени ингибирующим действием обладали частоты 10, 20, 50 и 80 Гц, а стимулирующим – 40, 60 и 70 Гц.

3. Стимулирующее влияние сочетанного действия вибрации и наночастиц (1,6 мг/мл) на надземную часть ячменя обыкновенного выявили на частотах 10 и 20 Гц (низкочастотный диапазон). Увеличение морфометрических показателей составило ~ 30 % от контрольных значений. Для корневой системы стимулирующий эффект наблюдали на частотах 70–100 Гц. Длина корневой системы в среднем была больше контроля на 26–41 % от контроля. Достоверных отличий в длине стебля на частотах 10 и 20 Гц не наблюдалось. Достоверное ингибирующее действие вибрации выявлено на частоте 30 Гц ($p < 0,05$).

Работа выполнена в рамках государственного задания «Влияние параметров магнитных полей на транспортные характеристики магнитомаркированных биологических клеток и на модификацию свойств живых систем» (№ госрегистрации 124012400345-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазуренко, В.В. Наночастицы, наноматериалы, нанотехнологии: учебное пособие / В.В. Мазуренко, А.Н. Руденко, В.Г. Мазуренко. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – 102 с.
2. Анциферова, И.В. Источники поступления наночастиц в окружающую среду / И.В. Анциферова // *Vestnik.pstu.ru*. – 2012. – С. 55–56.
3. Шайтан, К.В. Основы нано- и биобезопасности: курс лекций / К.В. Шайтан. – М.: НОУДПО «Институт «АйТи», 2009. – 102 с.
4. Impact of Ag nanoparticle exposure on p,p'-DDE bioaccumulation by *Cucurbita pepo* (zucchini) and *Glycine max* (soybean) / R. De la Torre-Roche // *Environ. Sci. Technol.* – 2013. – Vol. 47. – P. 718–725.
5. Uptake, translocation and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants / H. Zhu [et al.] // *Journal Environment Monitoring*. – 2008. – № 10. – P. 713–717.
6. Моргалёв Ю.Н. Биотестирование наноматериалов: о возможности транслокации наночастиц в пищевые сети / Ю.Н. Моргалёв // *Российские нанотехнологии*. – 2010. – Т. 5, № 11-12. – С. 131-135.
7. Нанотехнологии и наноматериалы в агропромышленном комплексе: науч. издание / В.Ф. Федоренко [и др.]. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. – 312 с
8. Синтез наночастиц с использованием растений / П. Горелкин [и др.] // *Наноиндустрия*. – 2012. – Вып. 7. – С. 16–22.
9. Зеленые» нанотехнологии: синтез металлических наночастиц с использованием растений / В. В. Макаров [и др.] // *Acta Naturae*. – 2014. –Т. 6, № 1 (20). – С.37–47.
10. Шуленберг, М. Наночастицы – крохотные частицы с огромным потенциалом. Возможности и риски / М. Шуленберг. – Бон, Берлин: Федеральное министерство образования и научных исследований, 2008. – 60 с.
11. Стимулирующее действие наночастиц серебра на рост и развитие растений пшеницы / А.В. Омельченко [и др.] // *Ученые записки Таврического национального университета. Серия «Биология, химия»*. – 2014. – Т. 27 (66), № 1. – С. 127–135.
12. Effect of biologically synthesized silver nanoparticles on *Bacopa monnieri* (Linn.) Wettst / Krishnaraj [et al.] // *Plant growth metabolism. Process Biochem.* – 2012 – Vol. 47, No 4. – P. 51–658.
13. Savithramma N. Effect of nanoparticles on seed germination and seedling growth of *Boswellia ovalifoliolata* an endemic and endangered medicinal tree taxon / N. Savithramma, S. Ankanna, G. Bhumi // *Nano Vision*. – 2012. – Vol. 2. – P. 61–68.
14. Корниенко В. О. Влияние сочетанного действия переменного магнитного поля и низкочастотной вибрации на рост и развитие кукурузы сахарной (*Zea mays L.*) / В. О. Корниенко, П. Ф. Котюк, А. С. Яицкий // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки*. – 2022. – № 09. – С. 15-21.
15. Корниенко В.О. Влияние переменного магнитного поля с различной формой сигнала на морфометрию и онтогенез кукурузы сахарной (*Zea mays L.*) / В.О. Корниенко, А.С. Яицкий, К.А. Авдеева // *Самарский научный вестник*. – 2023. – Т. 12, № 4. – С. 51–57. – DOI: 10.55355/snv2023124107.

Поступила в редакцию 14.02.2025 г.

THE EFFECT OF THE COMBINED EFFECT OF 10-100 HZ VIBRATION AND Fe₃O₄ NANOPARTICLES ON THE EARLY STAGES OF ZEA MAYS L. DEVELOPMENT AND THE HORDEUM VULGARE L.

K. A. Avdeeva, V. O. Kornienko

The effect of the combined action of vibration with a frequency of 10–100 Hz and Fe₃O₄ nanoparticles on the early stages of development of *Zea mays L.* and *Hordeum vulgare L.* was investigated. It was found that when using iron nanoparticles with a concentration of 2.4 mg/ml, the germination energy of sugar corn seeds increased by 36 %, germination by 64 %, and the length of seedlings increased by 5 %. Concentrations of 1.2 mg/ml, 2.4 mg/ml, and 0.8 mg/ml showed a stimulating effect. The concentration of 1.6 mg/ml nanoparticles significantly affected the ontogenetic and morphometric parameters of common barley. The length of the stem, in contrast to the control group, increased by 5 %, and the diameter by 15 %. The root length increased by 15 % on average, and the diameter by 21 %. The remaining concentrations used for the experimental part of the work showed an inhibitory or neutral effect. It was also found that under the influence of vibration in the range of 10–100 Hz, with additional seed treatment with a concentration of Fe₃O₄ – 2.4 mg/ml, the body's development

process is uneven. The samples show the greatest sensitivity to vibration at the first stages of development, starting from the moment of germination of seeds and emergence of seedlings. Frequencies of 10, 20, 50, and 80 Hz had a greater inhibitory effect, while 40, 60, and 70 Hz had a stimulating effect. The stimulating effect of the combined action of vibration and nanoparticles (1.6 mg/ml) on the aboveground part of common barley was detected at frequencies of 10 and 20 Hz (low frequency range). The increase in morphometric parameters was ~ 30 % of the control values. For the root system, the stimulating effect was observed at frequencies of 70–100 Hz. The length of the root system was on average 26–41 % longer than the control. There were no significant differences in stem length at frequencies of 10 and 20 Hz. A significant inhibitory effect of vibration was detected at a frequency of 30 Hz.

Keywords: plant ontogenesis, technogenic vibration, modeling, morphometry, combined action, Fe₃O₄ nanoparticles.

Авдеева Ксения Александровна

заведующая межкафедральной учебной лабораторией биологии, младший научный сотрудник лаборатории магнитобиологии кафедры физиологии и биофизики; ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
ORCID: 0009-0000-1983-5671
AuthorID: 1235550

Avdeeva Ksenia Alexandrovna

Junior Researcher at the Scientific Research Institute, Head of the Laboratory of the Department of Physiology and Biophysics; Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Корниенко Владимир Олегович

кандидат биологических наук, заведующий научно-исследовательской частью, доцент кафедры физиологии и биофизики; ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
ORCID: 0000-0002-7728-8116
AuthorID: 958435

Kornienko Vladimir Olegovich

candidate of biological sciences, head of Research Department, associate professor of physiology and biophysics Department; Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.