

Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105, № 1. С. 130-138.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2022. Vol. 105, no 1. P. 130-138.

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

Обзорная статья
УДК 631.559
doi: 10.33284/2658-3135-105-1-130

Регуляторы роста, наночастицы и микроудобрения как факторы повышения урожайности растений путём обработки по вегетации в условиях стресса

Анастасия Алексеевна Емельянова¹, Антонина Александровна Новикова²

^{1,2}Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹emelka1711@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9877-1679>

²tony-novikova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6947-9262>

Аннотация. Повышение урожайности растений и их устойчивости к абиотическим стрессам – важное направление в современной агротехнологии и сельском хозяйстве. Засоление почв, повышенные температуры и засуха – факторы, влияющие на урожайность различных сельскохозяйственных культур. Внекорневая обработка растений по фазам вегетации имеет ряд преимуществ, сохраняющих конкурентоспособность данного метода. В обзоре представлен обобщённый материал, содержащий современную информацию зарубежных авторов о факторах повышения урожайности в условиях стресса обработкой растений различными регуляторами роста, наночастицами и микроудобрениями. Внекорневые подкормки по вегетации стимулируют ускорение роста и развития растения, повышение количества и, что немаловажно, качества урожая.

Ключевые слова: сельскохозяйственные растения, урожайность, обработка по вегетации, некорневая обработка, регуляторы роста, микроудобрения, наночастицы

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2021-2030 гг. ФГБНУ БСТ РАН по теме (№ 0526-2022-0015).

Для цитирования: Емельянова А.А., Новикова А.А. Регуляторы роста, наночастицы и микроудобрения как факторы повышения урожайности растений путём обработки по вегетации в условиях стресса (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105, № 1. С. 130-138. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-130>

Review article

GEOPONICS AND CROP PRODUCTION

Growth regulators, nanoparticles and microfertilizers as factors for increasing plant productivity by vegetation treatment under stress

Anastasiya A Emelyanova¹, Antonina A Novikova²

^{1,2}Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹emelka1711@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9877-1679>

²tony-novikova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6947-9262>

Abstract. An important trend in modern agricultural technology and agriculture is increasing the yield of plants and their resistance to abiotic stress. Soil salinity, elevated temperatures and drought are factors affecting the yield of one of the world's most important crops. Foliar treatment of plants according to the phases of vegetation has a number of advantages that maintain the competitiveness of this method. The review presents a generalized material containing up-to-date information from foreign authors on the factors for increasing yields under stress conditions by treating plants with various growth regulators, nanoparticles and microfertilizers. Foliar top dressing during the growing season stimulates the acceleration of plant growth and development, increasing the quantity and, that is important - the quality of crop.

Keywords: agricultural plants, productivity, vegetation treatment, foliar treatment, growth regulators, microfertilizers, nanoparticles

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2021-2030 FSBRI FRC BST RAS (No. 0526-2022-0015).

For citation: Emelyanova AA, Novikova AA. Growth regulators, nanoparticles and microfertilizers as factors for increasing plant productivity by vegetation treatment under stress (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(1):130-138. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-138>

Введение.

Повышение урожайности растений и их устойчивости к различным видам стресса – ведущее направление в сельском хозяйстве. Среди методов улучшения условий и повышения урожайности рассматривают селекцию новых сортов, внесение различных удобрений в почву, предпосевную обработку семян и некорневую обработку вегетирующих растений. Листовая обработка имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами: экономическая эффективность, меньшая затрата сил и времени на обработку (Zaitseva RI et al., 2021).

Потенциальная урожайность сорта редко реализуется на этапе промышленного выращивания. Причиной этого являются различные виды абиотических стрессов, а именно засоление, холодовой и тепловой стрессы, засуха. Это – основные стрессы, вызывающие снижение урожайности во всём мире и одна из основных угроз продовольственной безопасности из-за постоянного изменения климата и ухудшения состояния окружающей среды, вызванного вмешательством человека. Всякий раз, когда условия окружающей среды отклоняются от оптимальных условий, необходимых для роста и развития, сельскохозяйственные культуры испытывают последствия абиотического стресса, что выражается в уменьшении продуктивности (Li F et al., 2020).

Экзогенная обработка растений регуляторами роста, известных также как фитогормоны, облегчает последствия солевого и теплового стрессов за счёт действия различных антиоксидантных веществ, стимулирует рост и урожайность растений, действуя как стимулятор роста клеток (Iqbal M and Ashraf M, 2013). Обработка наночастицами – сравнительно новое направление в агротехнологии, однако обладающее рядом преимуществ и эффективным результатом (Falco WF et al., 2020). При обработке растений микроэлементами стабилизируется минеральный состав растения, что способствует улучшению качества зерна (Waraich E et al., 2012).

Внекорневая обработка растений регуляторами роста и микроудобрениями – не новая тема, она изучается уже на протяжении многих лет, однако всё ещё остаётся актуальной и имеет неизученные аспекты. Также в последнее время становится популярной обработка вегетирующих растений наночастицами. На рисунке 1 указана статистика публикаций по ключевым словам «foliar application, growth regulators» (внекорневая обработка, регуляторы роста), «foliar application, micronutrient» (внекорневая обработка, микроудобрения) и «foliar application, nanoparticles» (внекорневая обработка, наночастицы) за последние 10 лет. Данные темы развиваются постепенно, увеличивая количество публикаций с каждым годом. Однако заметно, что обработка наночастицами – сравнительно новая тема.

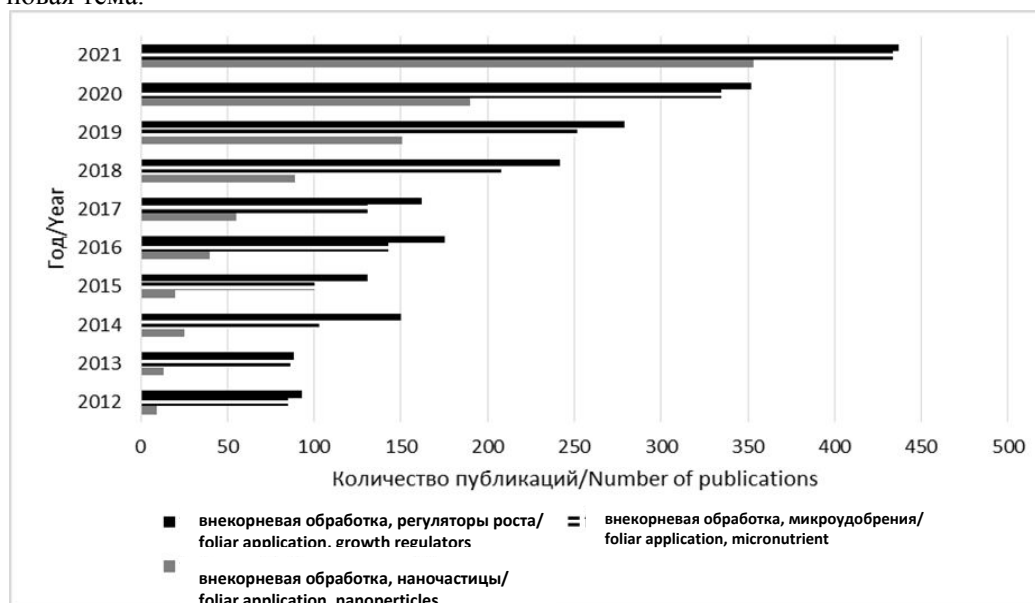


Рис. 1 – Статистика публикаций в базе данных «Science Direct»
Figure 1 – Publication statistics in «Science Direct» database

Цель исследования.

По материалам зарубежных публикаций рассмотреть регуляторы роста, микроудобрения и наночастицы как факторы повышения урожайности растений путём их обработки по вегетации в условиях стресса.

Влияние регуляторов роста.

Регуляторы роста растений (РР) определяются как синтетические или встречающиеся в природе органические соединения, которые влияют на биологические процессы в высших растениях в очень низких концентрациях (Rademacher W, 2015). РР вырабатываются в растениях в виде фитогормонов, однако широко распространено и их экзогенное использование. Они играют важную роль в облегчении солевого стресса посредством широкого спектра физиологических изменений и изменений в развитии (Wani SH et al., 2016). В широком смысле РР участвуют в увеличении физиологической доступности воды и необходимых питательных веществ, помогая растениям снизить токсическую нагрузку солей (Iqbal M and Ashraf M, 2007). Они также оказывают большое влияние на активность антиоксидантных ферментов в растениях (Faghieh S et al., 2019). РР индуцируют солеустойчивость за счёт повышения активности ферментов, удаляющих активные формы кислорода, для поддержания его на нетоксичном уровне (Tognetti VB et al., 2012).

Широко используемым регулятором роста растений является ауксин. Он участвует в делении и удлинении клеток, органогенезе и апикальном доминировании. Ауксин стимулирует удлинение клеток за счёт увеличения растяжимости стенок и участвует в регуляции свойств клеточных стенок (Majda M and Robert S, 2018; Hager A, 2003). Листовая подкормка ауксином подсолнечника в условиях загрязнения почвы ураном (U) и кадмием (Cd) улучшила процессы фиторемедиации и, как следствие, увеличила продуктивность культуры (Chen L et al., 2021). Внекорневая подкормка ауксином проростков арабидопсиса также приводила к повышению урожайности культуры (Fujita K et al., 2012). Исследования Keller CP (2017) доказывают положительное влияние ауксина на рост растения – увеличение длины стебля, площади листьев и общей массы.

Sergiev I с коллегами (2018) заметили, что содержание пролина возрастает, когда растения гороха садового обрабатывают аналогами ауксина (кальциевой солью 1-2-хлорэтоксикарбонилметил-4-нафталинсульфоновой кислоты и хлорметилатом 1-2-диметиламиноэтоксикарбонилметилнафталина) в условиях теплового стресса. В том же эксперименте установили, что уровень малонового диальдегида у обработанных растений был ниже по сравнению с растениями без применения ауксинов. Данные различия свидетельствуют о повышении устойчивости растения к тепловому стрессу.

Важную роль в сельском хозяйстве играют гиббереллины, поскольку вызывают удлинение стеблей растений и увеличение свежей массы, а также задерживают созревание плодов и опадение листьев (Yilmaz C and Ozguyen A I, 2009). Было показано, что применение гибберелловой кислоты (ГК) к растениям томата вызывает заметное удлинение стебля, увеличение свежей массы, ускорение цветения и образование большего количества цветков на растении, а также увеличивает завязываемость плодов (Witter SH and Bukovac MJ, 1957). Влияние листовой подкормки ГК на рост и урожайность изучалось на различных культурах. В клубнике её применение увеличивало вегетативный рост, хотя размер, вес и урожайность плода уменьшались (Qureshi KM et al., 2013), в то время как у ананаса данный регулятор роста увеличивал вес плода (Li YH et al., 2011).

Брассиностероиды (БР) – регуляторы роста, которые используются для смягчения последствий теплового стресса. Ogweno JO с соавторами (2008) сообщили, что экзогенные опрыскивания БР увеличивали чистую скорость фотосинтеза, устьичную проводимость и максимальную скорость карбоксилирования рибулозобисфосфаткарбоксилазы в растениях томата в условиях теплового стресса. Опрыскивание листьев БР вызывало более высокую скорость фотосинтеза у растений огурца в условиях теплового стресса (Yu JQ et al., 2004). Кроме того, экзогенное применение БР замедляло деградацию хлорофилла и повышало эффективность использования воды у растений, подвергшихся тепловому стрессу (Thussagunpanit J et al., 2015). Внекорневая обработка БР воздей-

ствовала на многие компоненты урожайности зерна в пшенице и рисе, увеличивая количество зёрен в колосе и метёлке, количество побегов, степень плодоношения колоса и отношение урожайности зерна к биомассе (урожайный индекс) (Ramraj VM et al., 1997).

Выживаемость растений повышалась при использовании жасмоновой кислоты (ЖК). Обработка этим регулятором стимулировала иммунные реакции и ростовые процессы. (Fargoq MA et al., 2016). Sheteiwy MS с коллегами (2021) показали, что внекорневая подкормка ЖК улучшала водный и осмотический потенциалы, эффективность использования воды и относительное содержание воды у растений сои в условиях засоления. Загрунтованные, опрысканные ЖК или обработанные их комбинацией растения усиливали флуоресценцию хлорофилла, которая была нарушена солевым стрессом. Обработка ЖК улучшала уровни абсцизовой кислоты, гибберелловой кислоты и ЖК на 60,57 %, 62,50 % и 52,25 % соответственно в условиях солевого стресса по сравнению с таковыми в контрольных условиях.

Влияние наночастиц.

Наночастицы (НЧ) различного типа, размера и морфологии считаются потенциальными агентами для сельского хозяйства в качестве удобрений, регуляторов роста и пестицидов (рис. 2) (Нao Y et al., 2016). НЧ могут повысить продуктивность растений, поскольку стимулируют прорастание, способствуют медленному высвобождению эффективной дозировки воды и удобрений, наночастицы используют для доставки гербицидов и борьбы с вредителями (Aqeel U et al., 2022; Palocci C et al., 2017; Hu P et al., 2020).

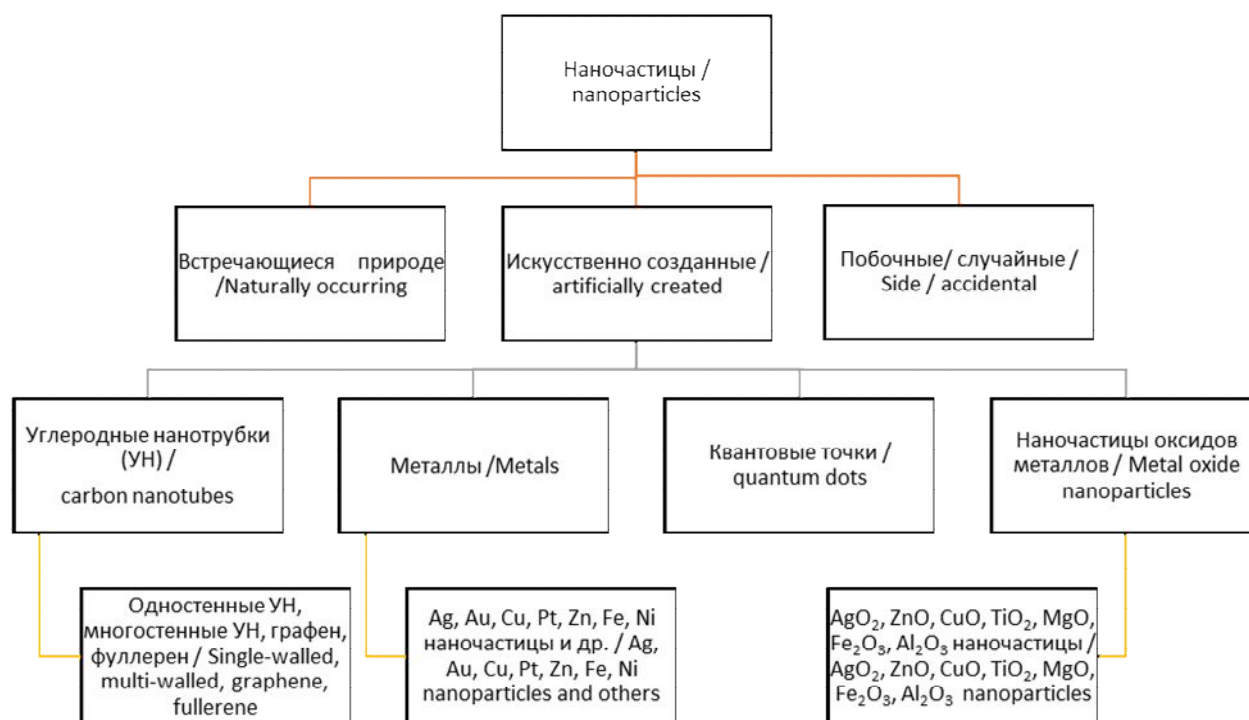


Рис. 2 – Виды наночастиц
Figure 2 – Types of nanoparticles

Некоторые НЧ обладают фитотоксическим действием, вызывающим ингибирование прорастания семян или токсичность проростков (Rajput V et al., 2018; Hayes KL et al., 2020). Хотя удобрения являются важным источником для роста и развития, некоторые из них становятся недо-

ступными для растений из-за выщелачивания, гидролиза, фотолиза и разложения. Многие новые растворы НЧ, такие как нанодоброения и нанопестициды, предназначены для снижения потерь питательных веществ и значительного повышения продуктивности пищевых продуктов.

Некоторые неметаллические НЧ, такие как одностенные углеродные нанотрубки и фуллерены, были хорошо изучены и выявлены механизмы их нанотоксичности. Так, Panigrahy M с коллегами (2021) выявили влияние углеродных НЧ на растение риса. Обработка приводила к увеличению длины побега, количества и длины корней, площади семядолей, содержания хлорофилла и общего содержания сахара в проростках риса. У взрослых растений она вызывала увеличение высоты, количества продуктивных побегов на растение, нормализованного вегетационного индекса и урожайности. При изучении молекулярного механизма воздействия углеродных НЧ было обнаружено значительное подавление транскриптафитохрома B.

Shafiq F с соавторами (2020) подтвердили влияние нанесения фуллерола на листву пшеницы как фактор повышения солеустойчивости за счёт разделения ионов, осмотической коррекции и регуляции ферментативных антиоксидантов. Усиление роста вместе с ускорением прорастания семян различных органов кукурузы, томата, риса и сои наблюдалось при воздействии одностенных углеродных нанотрубок (Lahiani MH et al., 2015; Adhikari T et al., 2012).

НЧ хитозана использовались для инкапсулирования гербицида, благодаря чему наблюдалось значительное повышение его эффективности (Mugayama CR et al., 2016; Al-Amri N et al., 2020). Внекорневое внесение НЧ хитозана значительно увеличивало рост, урожайность растений и содержание в них минеральных веществ (Fe, Zn, Mn, P, Ca, Mg) по сравнению с необработанным хитозаном контролем в растениях пальчатого проса (Sathiyabama M and Manikandan A, 2021; Alabdallah NM and Alzahrani HS, 2020). НЧ хитозана индуцировали несколько ферментов, связанных с защитой (хитиназа, β -1,3 глюканаза, хитозаназа, ингибиторы протеазы, пероксидаза, полифенолоксидаза) в листьях растений, усиливая врождённый иммунный ответ.

Внекорневое внесение НЧ кремния (Si) улучшало рост растений, в том числе сои, за счёт усиления углеродного обмена в условиях затенения (Hussain S et al., 2021). Так, при затенении чистая скорость усвоения и рост растений значительно снижались. Однако внекорневое внесение Si при затенении значительно повышало скорость фотосинтеза, скорость транспирации, улучшало устьичную проводимость и снижало концентрацию двуокиси углерода в клетках.

Несколько исследований воздействия наночастиц металлов и оксидов металлов на растения показали токсическое воздействие на растения, тогда как несколько исследований также указали на их полезную роль в виде улучшения параметров роста и продуктивности растений (Okupnik A and Pflugmacher S, 2016; Cvjetko P et al., 2017; Tripathi DK et al., 2017).

Влияние микроудобрений.

Микроэлементы часто действуют как кофакторы в ферментных системах и участвуют в окислительно-восстановительных реакциях, а также выполняют ряд других жизненно важных функций в растениях. Они участвуют в ключевых физиологических процессах фотосинтеза и дыхания – их дефицит может препятствовать этим жизненно важным физиологическим процессам, что ограничивает прирост урожая. Например, дефицит бора (B) может существенно снизить урожайность пшеницы, нута и чечевицы; а для риса дефицит цинка (Zn) является основным фактором, ограничивающим урожайность в ряде азиатских стран (Fargoq M et al., 2012). Внекорневая подкормка микроэлементами способствует более быстрому перемещению элементов в растение по сравнению с внесением их в почву, что очень важно для смягчения стресса у растений, особенно при позднем посеве. Экзогенное применение питательных веществ – мощный инструмент для смягчения пагубного воздействия жары (Waraich E et al., 2012).

Venugopalan VK с коллегами (2021) исследовали опрыскивание листвы чечевицы микроэлементами. Внекорневая обработка железом (Fe), бором (B) и цинком (Zn) способствовала лучшему покрытию растительной ткани и, таким образом, уменьшению испарения влаги на более поздних стадиях роста культуры, когда температура была выше пороговой. Скорость роста урожая и биомасса были значительно выше. По результатам исследования сделан вывод о том, что опти-

мальное время посева и внекорневое опрыскивание микроэлементами может быть полезным для снижения действия теплового стресса и обеспечения устойчивости чечевицы. Sajedi NA с соавторами (2011) оценили влияние селена (Se) и других питательных микроэлементов (Fe, Zn, Cu, Mn, B, Mo) на кукурузу в условиях засухи. Так, внесение селена на стадии налива зерна приводило к наибольшему урожаю в условиях засушливого стресса. Однократное, но не комбинированное использование селена или микроэлементов смягчало неблагоприятное воздействие стресса засухи на урожайность кукурузы, влияя на метаболизм растений, включая антиоксидантную активность.

Новым направлением в сельском хозяйстве является создание продукта с определённым элементным составом. Для этого широко используется листовая обработка микроэлементами. Внекорневая обработка цинком (Zn) растений приводила к увеличению содержания белка и стабилизировала содержание микроэлементов в листьях растения, в том числе железа (Fe), меди (Cu), марганца (Mn), азота (N) и цинка (Zn). Так, в экспериментах на растениях фасоли была выявлена зависимость между внекорневой обработкой Zn и минеральным составом листьев культуры (Poshtmasari HK et al., 2008). Внекорневая обработка твёрдой пшеницы сульфатами цинка (ZnSO₄) и железа (FeSO₄) уменьшала дефицит Zn и Fe в растениях, что способствовало повышению урожайности и улучшению качества зерна (Melash AA et al., 2019). Устранение дефицита микроэлементов в сельскохозяйственных культурах является важным направлением агротехнологий, эффективным подходом к обогащению зерна для коррекции питания человека (Aziz MZ et al., 2019).

Таким образом, обработка вегетирующих растений различными регуляторами роста, наночастицами и микроудобрениями стимулирует урожайность культур даже на фоне различных абиотических стрессов. Это – эффективное направление в повышении устойчивости растений к засухе, солевому стрессу, повышенным температурам и другим факторам внешней среды.

Заключение.

Анализ литературных источников свидетельствует о стремительном развитии данной сферы. Однако всё ещё существуют моменты, которые требуют исследования и экспериментальных данных. Внекорневая обработка наночастицами – относительно новое направление, требующее изучения. Обработка микроэлементами сельскохозяйственных зерновых культур, в частности, является приоритетным экспериментальным направлением в связи с их влиянием на урожайность и качество зерна.

Список источников

1. Adhikari T, Kundu S, Biswas AK, Tarafdar JC, Rao AS. Effect of copper oxide nanoparticle on seed germination of selected crops. *J Agric Sci Technol.* 2012;2(6):815-823.
2. Alabdallah NM, Alzahrani HS. The potential mitigation effect of ZnO nanoparticles on (*Abelmoschus esculentus* L. Moench) metabolism under salt stress conditions. *Saudi J Biol Sci.* 2020;27(11):3132-3137. doi: 10.1016/j.sjbs.2020.08.005
3. Al-Amri N et al. Size effect of iron (III) oxide nanomaterials on the growth, and their uptake and translocation in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicol Environ Saf.* 2020;194:110377. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110377
4. Aqeel U et al. A comprehensive review of impacts of diverse nanoparticles on growth, development and physiological adjustments in plants under changing environment. *Chemosphere.* 2022;291(1):132672. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132672
5. Aziz MZ et al. Foliar application of micronutrients enhances crop stand, yield and the biofortification essential for human health of different wheat cultivars. *Journal of Integrative Agriculture.* 2019;18(6):1369-1378. doi: 10.1016/S2095-3119(18)62095-7
6. Chen L, Hu WF, Long C, Wang D. Exogenous plant growth regulator alleviate the adverse effects of U and Cd stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) and improve the efficacy of U and Cd remediation. *Chemosphere.* 2021;262:127809. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127809

7. Cvjetko P et al. Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2017;137:18-28. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.11.009
8. Faghieh S, Zarei A, Ghobadi C. Positive effects of plant growth regulators on physiology responses of *Fragaria Camarosa* under salt stress. *Int J Fruit Sci.* 2019;19(1):104-114. doi: 10.1080/15538362.2018.1462291
9. Falco WF, Scherer MD, Oliveira SL, Wender H, Colbeck I, Lawson T, Caires AR. Phytotoxicity of silver nanoparticles on *Vicia faba*: evaluation of particle size effects on photosynthetic performance and leaf gas exchange. *Sci Total Environ.* 2020;701:134816. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134816
10. Farooq M, Wahid A, Siddique KHM. Micronutrient application through seed treatments - a review. *J Soil Sci Plant Nutr.* 2012;12(1):125-142. doi: 10.4067/S0718-95162012000100011
11. Farooq MA et al. Methyl jasmonate regulates antioxidant defense and suppresses arsenic uptake in *Brassica napus* L. *Frontiers in Plant Science.* 2016;7:468. doi: 10.3389/fpls.2016.00468
12. Fujita K, Horiuchi H, Takato H, Kohno M, Suzuki S. Auxin-responsive grape Aux/IAA9 regulates transgenic *Arabidopsis* plant growth. *Mol Biol Rep.* 2012;39(7):7823-7829. doi: 10.1007/s11033-012-1625-9
13. Hager A. Role of the plasma membrane H⁺-ATPase in auxin-induced elongation growth: historical and new aspects. *J Plant Res.* 2003;116(6):483-505. doi: 10.1007/s10265-003-0110-x
14. Hao Y, Zhang Z, Rui Y, Ren JY, Hou TQ, Wu SJ, Liu LM. Effect of different nanoparticles on seed germination and seedling growth in rice. In: Bhatnagar AK et al., editors. *Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Advanced Material Engineering (AME 2016)*, 15-17 April 2016, Wuhan, China. *Adv. Eng. Res. Atlantis Press.* 2016;85:166-173. doi: 10.2991/ame-16.2016.28
15. Hayes KL, Mui J, Song B, Sani ES, Eisenman SW, Sheeld JB, Kim B. Effects, uptake, and translocation of aluminum oxide nanoparticles in lettuce: a comparison study to phytotoxic aluminum ions. *Sci Total Environ.* 2020;719:137393. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137393
16. Hu P, An J, Faulkner MM, Wu H, Li Z, Tian X, Giraldo JP. Nanoparticle charge and size control foliar delivery efficiency to plant cells and organelles. *ACS Nano.* 2020;14(7):7970-7986. doi: 10.1021/acsnano.9b09178
17. Hussain S et al. Foliar application of silicon improves growth of soybean by enhancing carbon metabolism under shading conditions. *Plant Physiol Biochem.* 2021;159:43-52. doi: 10.1016/j.plaphy.2020.11.053
18. Iqbal M, Ashraf M. Gibberellic acid mediated induction of salt tolerance in wheat plants: Growth, ionic partitioning, photosynthesis, yield and hormonal homeostasis. *Environ Exp. B.* 2013;86:76-85. doi: 10.1016/j.envexpbot.2010.06.002
19. Iqbal M, Ashraf M. Seed treatment with auxins modulates growth and ion partitioning in salt-stressed wheat plants. *J Integr Plant Biol.* 2007;49(7):1003-1015. doi: 10.1111/j.1672-9072.2007.00488.x
20. Keller CP. Leaf expansion in *Phaseolus*: transient auxin-induced growth increase. *Physiol Plant.* 2017;130(4):580-589. doi: 10.1111/j.1399-3054.2007.00916.x
21. Lahiani MH, Chen J, Irin F, Poretzky AA, Green MJ, Khodakovskaya MV. Interaction of carbon nanohorns with plants: uptake and biological effects. *Carbon.* 2015;81:607-619. doi: 10.1016/j.carbon.2014.09.095
22. Li F et al. The specific W-boxes of GAPC5 promoter bound by TaWRKY are involved in drought stress response in wheat. *Plant Sci.* 2020;296:110460. doi: 10.1016/j.plantsci.2020.110460
23. Li YH, Wu YJ, Wu B, Zum MH, Zhang Z, Sun GM. Exogenous gibberellic acid increases the fruit weight of Comte de Paris pineapple by enlarging flesh cells without negative effects on fruit quality. *Acta Physiol. Plant.* 2011;33:1715-1722. doi: 10.1007/s11738-010-0708-2
24. Majda M, Robert S. The role of auxin in cell wall expansion. *Int J Mol Sci.* 2018;19(4):951. doi: 10.3390/ijms19040951
25. Maruyama CR et al. Nanoparticles based on chitosan as carriers for the combined herbicides imazapic and imazapyr. *Sci Rep.* 2016;6:19768. doi: 10.1038/srep19768

26. Melash AA, Mengistu DK, Aberra DA, Tsegay A. The influence of seeding rate and micronutrients foliar application on grain yield and quality traits and micronutrients of durum wheat. *Journal of Cereal Science*. 2019;85:221-227. doi: 10.1016/j.jcs.2018.08.005
27. Ogwenjo JO et al. Brassinosteroids alleviate heat-induced inhibition of photosynthesis by increasing carboxylation efficiency and enhancing antioxidant systems in *Lycopersicon esculentum*. *J Plant Growth Regul*. 2008;27:49-57. doi: 10.1007/s00344-007-9030-7
28. Okupnik A, Pflugmacher S. Oxidative stress response of the aquatic macrophyte *Hydrilla verticillata* exposed to TiO₂ nanoparticles. *Environ Toxicol Chem*. 2016;35(11):2859-2866. doi: 10.1002/etc.3469
29. Palocci C et al. Endocytic pathways involved in PLGA nanoparticle uptake by grapevine cells and role of cell wall and membrane in size selection. *Plant Cell Rep*. 2017;36:1917-1928. doi: 10.1007/s00299-017-2206-0
30. Panigrahy M, Das S, Poli Y, Sahoo PK, Kumari K, Panigrahi KCS. Carbon nanoparticle exerts positive growth effects with increase in productivity by down-regulating phytochrome B and enhancing internal temperature in rice. *Rice Science*. 2021;28(3):289-300. doi: 10.1016/j.rsci.2021.04.007
31. Poshtmasari HK, Bahmanyar MA, Pirdashti H, Shad MA. Effects of Zn rates and application forms on protein and some micronutrients accumulation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Pak J Biol Sci*. 2008;11(7):1042-6. doi: 10.3923/pjbs.2008.1042.1046
32. Qureshi KM, Chughtai US, Qureshi US, Abbasi NA. Impact of exogenous application of salt and growth regulators on growth and yield of strawberry. *Pak J Bot*. 2013;45:1179-1185.
33. Rademacher W. Plant growth regulators: Backgrounds and uses in plant production. *J Plant Growth Regul*. 2015;34:845-872. doi: 10.1007/s00344-015-9541-6
34. Rajput V, Minkina T, Fedorenko A, Sushkova S, Mandzhieva S, Lysenko V, Ghazaryan K. Toxicity of copper oxide nanoparticles on spring barley (*Hordeum sativum distichum*). *Sci Total Environ*. 2018;645:1103-1113. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.211
35. Ramraj VM, Vyas BN, Godrej NB, Mistry KB, Swami BN, Singh N. Effects of 28-homobrassinolide on yields of wheat, rice, groundnut, mustard, potato and cotton. *The Journal of Agricultural Science*. 1997;128(4):405-413. doi: 10.1017/S0021859697004322
36. Sajedi NA et al. The effects of selenium and other micronutrients on the antioxidant activities and yield of corn (*Zea mays* L.) under drought stress. *Physiol Mol Biol Plants*. 2011;17:215-222. doi: 10.1007/s12298-011-0067-5
37. Sathiyabama M, Manikandan A. Foliar application of chitosan nanoparticle improves yield, mineral content and boost innate immunity in finger millet plants. *Carbohydrate Polymers*. 2021;258:117691. doi: 10.1016/j.carbpol.2021.117691
38. Sergiev I, Todorova D, Shopova E, Jankauskiene J, Jankovska-Bortkevič E, Jurkonien ES. Effects of auxin analogues and heat stress on garden pea. *Zemdirbyste-Agricult*. 2018;105(3):243-248. doi: 10.13080/z-a.2018.105.031
39. Shafiq F, Iqbal M, Ashraf MA, Ali M. Foliar applied fullerol differentially improves salt tolerance in wheat through ion compartmentalization, osmotic adjustments and regulation of enzymatic antioxidants. *Physiol Mol Biol Plants*. 2020;26(3):475-487. doi: 10.1007/s12298-020-00761-x
40. Sheteiwy MS et al. Seed priming and foliar application with jasmonic acid enhance salinity stress tolerance of soybean (*Glycine max* L.) seedlings. *J Sci Food Agric*. 2021;101(5):2027-2041. doi: 10.1002/jsfa.10822
41. Thussagunpanit J et al. Effects of brassinosteroid and brassinosteroid mimic on photosynthetic efficiency and rice yield under heat stress. *Photosynthetica*. 2015;53(2):312-320. doi: 10.1007/s11099-015-0106-5
42. Tognetti VB, Mühlenbock P, Van Breusegem F. Stress homeostasis - the redox and auxin perspective. *Plant Cell Environ*. 2012;35(2):321-33. doi: 10.1111/j.1365-3040.2011.02324.x

43. Tripathi DK et al. Nitric oxide alleviates silver nanoparticles (AgNps)-induced phytotoxicity in *Pisum sativum* seedlings. *Plant Physiol Biochem.* 2017;110:167-177. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.06.015
44. Venugopalan VK et al. The response of lentil (*Lens culinaris* Medik.) to soil moisture and heat stress under different dates of sowing and foliar application of micronutrients. *Front Plant Sci.* 2021;22(12):679469. doi: 10.3389/fpls.2021.679469
45. Wani SH, Kumar V, Shriram V, Sah SK. Phytohormones and their metabolic engineering for abiotic stress tolerance in crop plants. *Crop J.* 2016;4(3):162-176. doi: 10.1016/j.cj.2016.01.010
46. Waraich E, Ahmad R, Halim A, Aziz T. Alleviation of temperature stress by nutrient management in crop plants: A Review. *J Soil Sci Plant Nutr.* 2012;12(2):221-244. doi: 10.4067/S0718-95162012000200003
47. Witter SH, Bukovac MJ et al. Some effects of gibberellin on flowering and fruit setting. *Plant Physiol.* 1957;32(1):39-41. doi: 10.1104/pp.32.1.39
48. Yilmaz C, Ozguyen AI. The effects of some plant nutrients, gibberellic acid and pinolene treatments on the yield, fruit quality and cracking in pomegranate. *Acta Hort.* 2009;818:205-212. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.818.30
49. Yu JQ, Huang LF, Hu WH, Zhou YH, Mao WH, Ye SF, Nogués S. A role for brassinosteroids in the regulation of photosynthesis in *Cucumis sativus*. *J Exp Bot.* 2004;55(399):1135-43. doi: 10.1093/jxb/erh124
50. Zaitseva RI, Komarov NM, Frid AS, Anikina LM, Zhuravlyova AS, Chumakova VV, Sokolenko NI, Panova GG. The effect of soil salinization and pre-sowing seed treatment with sili-con-containing micronutrient fertilizer on barley seedlings. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: The VIII Congress of the Dokuchaev Soil Science Society 19-24 July 2021, Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation. Bristol, England: IOP Publishing; 2021;862:012089. doi: 10.1088/1755-1315/862/1/012089

Информация об авторах:

Анастасия Алексеевна Емельянова, магистрант, лаборант-исследователь, лаборатория селекционно-генетических исследований в растениеводстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина, 27/1, тел.: 89198526182.

Антонина Александровна Новикова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией селекционно-генетических исследований в растениеводстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина, 27/1, тел.: 89228884481.

Information about authors:

Anastasia A Emelyanova, master student, laboratory researcher, laboratory of Selection and Genetic Research in Crop Production, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave., Orenburg, 460051, tel.: 89198526182.

Antonina A Novikova, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Head of the Laboratory for Breeding and Genetic Research in Plant Growing, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave., Orenburg, 460051, tel.: 89228884481.

Статья поступила в редакцию 24.02.2022; одобрена после рецензирования 20.03.2022; принята к публикации 21.03.2022.

The article was submitted 11.01.2022; approved after reviewing 07.02.2022; accepted for publication 21.03.2022.