

УДК 581.143:577.175.1.05

DOI: 10.31040/2222-8349-2022-0-4-40-45

**ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗА НА РОСТ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) И ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО (*QUERCUS ROBUR* L.)**

© Р.Г. Калякина, Е.М. Ангальт, В.А. Симоненкова, А.Ю. Кулагин, З.Н. Рябинина

Представлены результаты исследования влияния наночастиц железа на развитие сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), произрастающих в зоне Южного Приуралья. Установлено, что морфобиологическая реакция сеянцев на действие наночастиц Fe имеет видовую специфичность. У сеянцев сосны присутствие наночастиц Fe в концентрациях 100 ммоль/л оказало токсическое воздействие на рост сеянцев сосны обыкновенной. Концентрация наночастиц Fe 25 и 6.25 ммоль/л оказывала стимулирующее действие на рост сеянцев сосны. При содержании наночастиц 25 ммоль/л увеличение длины главного корня на 22.5 мм (23.1%). Количество придаточных корней в опытной группе, по сравнению с контрольной, увеличилось на 1.5%, длина придаточных корней – на 10.8 мм (14.4%). Установлено, что сеянцы дуба более устойчивы к токсическому воздействию наночастиц железа. Морфометрические показатели сеянцев дуба в опытной группе, также как и при концентрации 100 ммоль/л, отличались от таковых в контрольной группе незначительно, в пределах 1%.

Ключевые слова: растениеводство, *Pinus sylvestris*, *Quercus robur*, наночастицы железа, морфометрические показатели.

**Введение.** Наночастицы за последние несколько десятилетий получили широкое распространение благодаря своим уникальным электронным, оптическим, механическим, магнитным и химическим свойствам. Спектр их применения достаточно широк: медицина, фармацевтика, косметическое производство, электроника, строительство, ювелирное дело и фотография. В настоящее время в свободной продаже можно найти огромное множество продуктов с содержанием наноматериалов, их количество растет день ото дня. Нанотехнологии и наноматериалы прочно входят в современное производство, в том числе и сельскохозяйственное.

Наночастицы металлов находят все большее применение в растениеводстве (сельском и лесном хозяйстве) в качестве удобрений, пести-

цидов и стимуляторов, а также датчиков для мониторинга качества почвы и здоровья растений [1–5]. В связи с этим большой интерес представляет изучение наночастиц влияния на различные виды растений.

Источником поступления наночастиц является не только антропогенная деятельность, но и ряд естественных процессов. Наночастицы можно обнаружить в вулканическом пепле, на месте лесных пожаров, в виде аэрозолей морской соли, и в качестве оксидов железа или других металлов в почвах, реках и океанах [6–8]. Многие виды адаптировались к присутствию данной формы металлов в среде. Адаптационные возможности определяются генетически, что обуславливает видовые особенности действия наночастиц на организмы растений и животных [9–11].

КАЛЯКИНА Райля Губайдулловна – к.б.н., Оренбургский государственный аграрный университет, e-mail: kalyakina\_railya@mail.ru

АНГАЛЬТ Елена Михайловна – к.б.н., Оренбургский государственный аграрный университет, e-mail: kalyakina\_railya@mail.ru

СИМОНЕНКОВА Виктория Анатольевна – к.с.-.х.н., Оренбургский государственный аграрный университет, e-mail: simon\_vik@mail.ru

КУЛАГИН Алексей Юрьевич – д.б.н., Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН, e-mail: coolagin@list.ru

РЯБИНИНА Зинаида Николаевна – д.б.н., Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН, e-mail: oregreen1@yandex.ru

Влияние нанопорошков на рост и развитие древесных растений изучено фрагментарно, что связано с продолжительным периодом развития (сто и более лет) и невозможностью постановки эксперимента в условиях *in vitro*. Большинство исследователей отмечают в своих работах, что наночастицы Fe способны аккумулироваться в клетках растений и взаимодействовать с внутриклеточными белками и полисахаридами клеточной стенки. Индуцируя образование ионов, наночастицы данного металла способствуют образованию свободных радикалов или активных форм кислорода. Они служат «системой доставки» ионов. Кроме того, они способны формировать комплексы с нуклеиновыми кислотами и тем самым оказывать влияние на синтез веществ в клетке [2, 3, 6–8].

В ряде зарубежных работ отмечено положительное влияние наночастиц металлов на растения, которое проявляется в стимулировании прорастания семян, роста растений, повышении массы их вегетативных органов, плодов и семян, а также увеличении их количества и химического состава [12–15]. В то же время высокие дозы наночастиц способны оказать токсичное действие и подавить прорастание семян, рост побегов и корней [11, 12, 16, 17]. Некоторые авторы считают, что наночастицы токсичны при поглощении растениями, но оказывают положительное влияние, когда просто присутствуют в окружающей среде [18–19]. В связи с этим актуально изучение влияния разных концентраций наночастиц на рост и развитие растений.

Цель работы – исследовать влияние наночастиц Fe на рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), произрастающих в лесостепной зоне Южного Приуралья.

**Объекты и методы исследований.** Исследования проводили в 2020 г. на базе ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН» (г. Оренбург). Объектом исследования являлись сеянцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), собранных с модельных деревьев на контрольных участках на территории Тюльганского района Оренбургской области.

Культивирование сеянцев проводили с использованием наночастиц Fe ( $80 \pm 15$  нм) [20], которые представляли смесь окислов  $Fe^{2+}$

и  $Fe^{3+}$ . На первом этапе исследования навески нанопорошка Fe (100 ммоль/л каждого вещества) разводили дистиллированной водой (10 мл) и диспергировали путем обработки ультразвуком частотой 35 кГц в источнике ванного типа «Сапфир ТТЦ» 30 мин, после чего готовили трехкратные разведения.

В качестве субстрата для проращивания использовали кварцевый песок, предварительно обработанный. Бiotестирование проводили в соответствии с ГОСТ 15150 в лабораторных условиях. Эксперимент проводили по следующей схеме: в контейнеры помещали предварительно подготовленный субстрат, после чего семена заглубляли и проводили орошение заранее приготовленными суспензиями или растворами. Орошение контрольных образцов проводили дистиллированной водой. После чего контейнеры помещали в термостат с оптимальным режимом проращивания на срок 30 дней, при необходимости проводили увлажнение субстрата исследуемыми растворами. Диагностическими признаками служили всхожесть семян, морфометрические показатели сеянцев.

Статистическую обработку результатов выполняли в программе Microsoft Excel 2007. Из каждой выборки исключали значения параметров, выходящие за рамки  $\pm 3\sigma$ . Итоговые значения, представленные в таблице, являются средней арифметической величиной  $\pm$  основная ошибка средней арифметической величины. Оценку существенности различий средних величин проводили с использованием t-критерия Стьюдента.

**Результаты и обсуждение.** Анализ роста сеянцев сосны обыкновенной в среде с разным содержанием наночастиц Fe выявил значимые изменения морфометрических показателей по сравнению с контролем. Присутствие в среде наночастицы Fe в концентрации 100 ммоль/л угнетало всхожесть семян сосны обыкновенной, и практически не повлияло на всхожесть дуба черешчатого. Следует отметить, что дуб показал относительную индифферентность к действию высоких концентраций нанопорошка Fe (табл.).

Максимальная опытная концентрация наночастиц Fe снижала длину побега и и корня сосны обыкновенной на 2.2 мм (6.4%) и 2.3 мм (3.1%) соответственно. При этом количество придаточных корней у сеянцев сосны обыкновенной в опытной группе по сравнению с контрольной

увеличилось на 7.7%. Морфометрические показатели сеянцев дуба черешчатого в опытной и контрольной группах отличались от таковых в контрольной группе не более чем на 1%.

Концентрация наночастиц Fe 25 ммоль/л оказывала стимулирующее действие на рост сеянцев сосны обыкновенной. Установлено увеличение длины главного корня на 22.5 мм (23.1%). Количество придаточных корней в опытной группе по сравнению с контрольной увеличилось на 1.5%, длина придаточных корней – на 10.8 мм (14.4%). Морфометрические показатели сеянцев дуба черешчатого в опытной группе, также как и при концентрации 100 ммоль/л, отличались от таковых в контрольной группе незначительно.

Снижение концентрации наночастиц Fe до 6.25 ммоль/л ослабило стимулирующее действие на рост сеянцев сосны обыкновенной. Общая длина корней снизилась на 18.4 мм (8.9%), высота стволика – на 0.7 мм (2.0%). При этом по сравнению с контрольной группой сеянцы сосны обыкновенной отличались по длине главного корня на 2.9 мм (2.9%), количеству придаточных корней – на 0.4 мм (1.9%), длине придаточных – на 12 мм (16,0%). При этом высота стволика в данной опытной группе снизилась по сравнению с контролем на 0.3 мм (0.8%). Морфометриче-

ские показатели сеянцев дуба черешчатого в опытной группе, также как и при предыдущих концентрациях отличались от таковых в контрольной группе незначительно.

Наночастицы Fe в концентрации 1.56 ммоль/л оказало разнонаправленное действие на рост и развитие сеянцев сосны. Длина главного корня незначительно снизилась на 0.9 мм (0.9%), в то же время общая длина корней увеличилась за счет увеличения количества придаточных корней на 9.6 мм (5.6%). При этом величина стволика снизилась на 2 мм (5.8%). Изменения морфометических показателей сеянцев дуба при данной концентрации не отмечены.

**Заключение.** Выявлена видовая специфичность реакции на действие наночастиц Fe на сеянцы изучаемых древесных пород. Сеянцы дуба черешчатого индифферентны к действию даже высоких концентраций наночастиц Fe. Аналогичные результаты были установлены при изучении действия наночастиц Ag и Cu [4, 5].

Сосна обыкновенная, напротив, показала большую чувствительность к действию наночастиц Fe. При этом установлено стимулирующее действие наночастиц Fe на рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной.

Т а б л и ц а

*Морфометрические показатели сеянцев сосны обыкновенной (Pinus sylvestris L.) и дуба черешчатого (Quercus robur L.) при культивировании в среде, содержащей наночастицы Fe*

Концентрация наночастиц Fe, ммоль/л	Длина главного корня, мм	Количество придаточных корней, шт.	Длина придаточных корней, мм	Высота стволика, мм
<i>Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris L.)</i>				
Контроль	97.3±4.84	2.09±0.04	75.1±3.61	34.3±1.11
100	76.2±8.47	2.25±0.24	72.3±3.57	32.1±1.24
25	119.8±7.61	2.12±0.18	85.9±3.10	34.7±1.35
6.25	100.2±7.51	2.13±0.16	87.1±4.92	33.9±1.48
1.56	96.4±7.83	2.15±0.14	85.6±4.93	32.2±1.33
<i>Дуб черешчатый (Quercus robur L.)</i>				
Контроль	187.2±7.21	86.8±5.14	79.0±4.32	117.5±6.54
100	186.4±7.01	86.1±5.42	78.3±4.41	117.8±6.27
25	188.6±6.98	87.3±6.01	79.1±4.59	116.7±6.18
6.25	186.9±6.65	86.9±6.07	78.8±4.62	117.2±6.77
1.56	187.0±7.11	87.0±5.96	79.0±4.23	117.4±6.45

В диапазоне 6.25–25 ммоль/л отмечалось увеличение придаточных корней, что может рассматриваться в качестве компенсаторной реакции на подавление роста главного корня. Данные дозы могут быть рекомендованы для предпосевной обработки семян сосны обыкновенной. Действие данного вида наночастиц не ограничивается «протравливающим» эффектом, но и, возможно, изменяет химический состав поверхности корня и, как следствие, влияет на усвоение питательных веществ [8, 10]. Сверхвысокие дозы (100 ммоль/л) подавляют рост сеянцев сосны. Данный факт ряд авторов склонен объяснять закупоркой корневых транспортных каналов, ингибируя всасывающую способность [4, 5].

Статья написана в рамках выполнения плановых научно-исследовательских работ по темам №0526-2022-0014 и №АААА-А18-118022190103-01.

### Литература

1. Belava V.N., Panyuta O.O., Yakovleva G.M., Pysmenna Y.M., Volkogon, M.V. The Effect of Silver and Copper Nanoparticles on the Wheat // Pseudocercospora herpotrichoides Pathosystem Nanoscale Research Letters. 2017. V. 12(1). P. 250.
2. Gavriš I.A., Lebedev S.V., Galaktionova L.V., Zorov A.A. Study of effects of metallic nanoparticles when introduced into soil on plant *Triticum vulgare* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 341(1). P. 012168.
3. Kalyakina R.G., Maiski R.A., Ryabukhina M.V. Influence of different forms of iron on the morphobiological indicators of *Pinus sylvestris* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. – 687(6). P. 066044.
4. Aleksandrowicz-Trzcińska M., Olchowik J., Studnicki M. Urban Do silver nanoparticles stimulate the formation of ectomycorrhizae in seedlings of pedunculate oak (*Quercus robur L.*)? // Symbiosis. 2019. V. 79(1). P. 89–97.
5. Aleksandrowicz-Trzcińska M., Bederska-Blaszczyk M., Szaniawski A., Olchowik J., Studnicki M. The effects of copper and silver nanoparticles on container-grown Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) and pedunculate oak (*Quercus robur L.*) seedlings // Forests. 2019. V. 10(3). P. 269.
6. Ruffini Castiglione M., Cremonini R. Nanoparticles and higher plants // Caryologia. 2009. V. 62. P. 161–165.
7. Klaine S., Alvarez P.J.J., Batley G.E., Fernandes T.F., Handy R.D., Lyon D.Y., Mahendra S., McLaughlin M.J., Lead J.R. Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects // Environ. Toxicol. Chem. 2008. V. 27. P. 1825–1851.
8. Masarovic E., Kral'ova K. Metal nanoparticles and plants // Ecol. Chem. Eng. S. 2013. V. 20. P. 9–22.
9. Duhan J.S., Kumar R., Kumar N., Nehra K., Duhan S. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture // Biotechnol. Rep. 2017. V. 15. P. 11–23.
10. Wang P., Lombi E., Zhao F.-J., Kopittke P.M. Nanotechnology: A new opportunity in plant sciences // Trends Plant Sci. 2016. V. 21. P. 699–712.
11. Ruttkay-Nedecky B., Krystofova O., Nejd L., Adam V. Nanoparticles based on essential metals and their phytotoxicity // J. Nanobiotechnol. 2017. V. 15. P. 33.
12. Dietz K.-J., Herth S. Plant nanotoxicology // Trends Plant Sci. 2011. V. 16. P. 582–589.
13. Rastogi A., Zivcak M., Sytar O., Kalaji H.M., He X., Mbarki S., Brestic M. Impact of metal and metal oxide nanoparticles on plant: A critical Review // Front. Chem. 2017. V. 5. P. 78.
14. Nel A., Xia T., Madler L., Li N. Toxic potential of materials at the nanolevel // Science. 2006. V. 311. P. 622–627.
15. Yang J., Cao W., Rui Y. Interactions between nanoparticles and plants: Phytotoxicity and defense mechanisms // J. Plant Interact. 2017. V. 12. P. 158–169.
16. Ryabinina Z.N., Bastaeva G.T., Lebedev S.V., Kalyakina R.G., Ryabuhina M.V., Hakimov E.R. Impact of emissions from the Orenburg gas chemical complex on the state of forest ecosystems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 579(1). P. 012095.
17. Ryabinina Z.N., Bastaeva G.T., Lyavdanskaya O.A., Lebedev S.V., Kalyakina R.G., Ryabuhina M.V. Radial growth of artificial forest stands under the aerotechnogenic impact of the Orenburg gas chemical complex // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 579(1). P. 012115.
18. Cyrusová T., Petrová Š., Vaněk T., Podlipná R. Responses of Wetland Plant *Carex vulpina* to Copper and Iron Nanoparticles Water, Air, and Soil Pollution. 2017. 228 (7). P. 258.
19. Galaktionova L., Gavriš I., Lebedev S. Bioeffects of Zn and Cu Nanoparticles in Soil Systems // Toxicology and Environmental Health Sciences. 2019. V. 11(4). P. 259–270.
20. Методические указания 1.2.2635-10. Медико-биологическая оценка безопасности наноматериалов: Методические указания. М.: Федеральный

центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 122 с.

### References

1. Belava V.N., Panyuta O.O., Yakovleva G.M., Pysmenna Y.M., Volkogon, M.V. The Effect of Silver and Copper Nanoparticles on the Wheat // *Pseudocercospora herpotrichoides* Pathosystem Nanoscale Research Letters, 2017, vol. 12(1), 250 p.
2. Gavrish I.A., Lebedev S.V., Galaktionova L.V., Zorov A.A. Study of effects of metallic nanoparticles when introduced into soil on plant *Triticum vulgare* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, vol. 341(1), 012168 p.
3. Kalyakina R.G., Maiski R.A., Ryabukhina M.V. Influence of different forms of iron on the morphobiological indicators of *Pinus sylvestris* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 687(6), 066044 p.
4. Aleksandrowicz-Trzcińska M., Olchowik, J. Studnicki M. Urban Do silver nanoparticles stimulate the formation of ectomycorrhizae in seedlings of pedunculate oak (*Quercus robur L.*)? // *Symbiosis*, 2019, vol. 79(1), pp. 89-97.
5. Aleksandrowicz-Trzcińska M., Bederska-Blaszczyk M., Szaniawski A., Olchowik J., Studnicki M. The effects of copper and silver nanoparticles on container-grown Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) and pedunculate oak (*Quercus robur L.*) seedlings // *Forests*, 2019, vol. 10(3), 269 p.
6. Ruffini Castiglione M., Cremonini R. Nanoparticles and higher plants // *Caryologia*, 2009, vol. 62, pp. 161-165.
7. Klaine S., Alvarez P.J.J., Batley G.E., Fernandes T.F., Handy R.D., Lyon D.Y., Mahendra S., McLaughlin M.J., Lead J.R. Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects // *Environ. Toxicol. Chem.*, 2008, vol. 27, pp. 1825-1851.
8. Masarovicova E., Kral'ova K. Metal nanoparticles and plants // *Ecol. Chem. Eng. S.*, 2013, vol. 20, pp. 9-22.
9. Duhan J.S., Kumar R., Kumar N., Nehra K., Duhan S. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture // *Biotechnol. Rep.*, 2017, vol. 15, pp. 11-23.
10. Wang P., Lombi E., Zhao F.-J., Kopittke P.M. Nanotechnology: A new opportunity in plant sciences // *Trends Plant Sci.*, 2016, vol. 21, pp. 699-712.
11. Ruttkay-Nedecky B., Krystofova O., Nejd L., Adam V. Nanoparticles based on essential metals and their phytotoxicity // *J. Nanobiotechnol.*, 2017, vol. 15, 33 p.
12. Dietz K.-J., Herth S. Plant nanotoxicology // *Trends Plant Sci.*, 2011, vol. 16, pp. 582-589.
13. Rastogi A., Zivcak M., Sytar O., Kalaji H.M., He X., Mbarki S., Brestic M. Impact of metal and metal oxide nanoparticles on plant: A critical Review // *Front. Chem.*, 2017, vol. 5, 78 p.
14. Nel A., Xia T., Madler L., Li N. Toxic potential of materials at the nanolevel // *Science*, 2006, vol. 311, pp. 622-627.
15. Yang J., Cao W., Rui Y. Interactions between nanoparticles and plants: Phytotoxicity and defense mechanisms // *J. Plant Interact.*, 2017, vol. 12, pp. 158-169.
16. Ryabinina Z.N., Bastaeva G.T., Lebedev S.V., Kalyakina R.G., Ryabuhina M.V., Hakimov E.R. Impact of emissions from the Orenburg gas chemical complex on the state of forest ecosystems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, vol. 579(1), 012095 p.
17. Ryabinina Z.N., Bastaeva G.T., Lyavdanskaya O.A., Lebedev S.V., Kalyakina R.G., Ryabuhina M.V. Radial growth of artificial forest stands under the aerotechnogenic impact of the Orenburg gas chemical complex // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, vol. 579(1), 012115 p.
18. Cyrusová T., Petrová Š., Vaněk T., Podlipná R. Responses of Wetland Plant *Carex vulpina* to Copper and Iron Nanoparticles Water, Air, and Soil Pollution, 2017, vol. 228 (7), 258 p.
19. Galaktionova L., Gavrish I., Lebedev S. Bioeffects of Zn and Cu Nanoparticles in Soil Systems // *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 2019, vol. 11(4), pp. 259-270.
20. Methodological guidelines 1.2.2635-10. Biomedical safety assessment of nanomaterials: Methodological guidelines. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rosпотребнадзор, 2010, 122 p.



**INFLUENCE OF IRON NANOPARTICLES ON THE GROWTH OF SCOTTEN PINE SEEDLINGS  
(*PINUS SYLVESTRIS L.*) AND OAK OAK (*QUERCUS ROBUR L.*)**

© R.G. Kalyakina<sup>1</sup>, E.M. Anhalt<sup>1</sup>, W.A. Simonenkova<sup>1</sup>, A.Yu. Kulagin<sup>2</sup>, Z.N. Raybinina<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Orenburg State Agrarian University,  
18, Chelyuskintsev str., 460014, Orenburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre  
of the Russian Academy of Sciences,  
69, prospect Oktyabrya, 450054, Ufa, Russian Federation

<sup>3</sup> Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies,  
29, January 9th str., 460000, Orenburg, Russian Federation

The paper presents the results of a study of the effect of iron nanoparticles on the development of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and English oak (*Quercus robur* L.) seedlings growing in the South Cis-Ural zone. It has been established that the morphobiological response of seedlings to the action of Fe nanoparticles has a species specificity. In pine seedlings, the presence of Fe nanoparticles at a concentration of 100 mmol / l had a toxic effect on the growth of Scots pine seedlings. The concentration of Fe nanoparticles 25 and 6.25 mmol / l stimulated the growth of Scots pine seedlings. With a nanoparticle content of 25 mmol / l, an increase in the length of the main root by 22.5 mm (23.1%). The number of adventitious roots in the experimental group, in comparison with the control, increased by 1.5%, the length of adventitious roots – by 10.8 mm (14.4%). Found that the seedlings of pedunculate oak are more resistant to the toxic effects of iron nanoforms. Morphometric parameters of seedlings of pedunculate oak in the experimental, as well as at a concentration of 100 mmol / l differed from those in the control group insignificantly, within 1%.

Keywords: plant growing, *Pinus sylvestris*, *Quercus robur*, iron nanoparticles, morphometric parameters.