

# ВОЗДЕЙСТВИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕДИ И ЖЕЛЕЗА НА РОСТ И АРХИТЕКТУРУ КОРНЯ АРАБИДОПСИСА

П. О. Мучинская, В. В. Тарима

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,  
220030, г. Минск, Беларусь, [samokhina@bsu.by](mailto:samokhina@bsu.by)  
Научный руководитель — В. В. Самохина

В работе было охарактеризовано воздействие наночастиц (НЧ) оксидов меди и железа на ростовые параметры модельного растения *Arabidopsis thaliana*. Показано стимулирующее действие низких концентраций НЧ и токсичность высоких уровней НЧ. Также обнаруженные эффекты НЧ были сравнены с влиянием обработки супернатантом и металлами в ионной форме.

**Ключевые слова:** наночастицы; медь; железо; рост; архитектура корня; арабидопсис.

В последние годы наиболее динамично развивающейся сферой хозяйствования стала сфера нанотехнологий. Наночастицы – частицы размером от 1 до 100 нм, состоящие из углерода, металлов, оксидов металлов или органических веществ – широко применяют в медицине в качестве лекарств, биосенсоров или агентов, доставляющих лекарственные вещества внутрь клетки, в промышленности при создании покрытий и прочных материалов, в сельском хозяйстве в виде наноудобрений, в экологии для мониторинга окружающей среды и т.д. [1]. Влияние НЧ на растения может быть разнообразным и зависит от типа НЧ, их физико-химических свойств, концентрации, времени воздействия, а также вида растения [2]. В литературе описаны как позитивные, так и токсические эффекты металлических НЧ [3], однако механизм их действия до конца не ясен. Целью настоящей работы являлся анализ изменений ростовых процессов и параметров архитектуры корня *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. при воздействии НЧ оксидов меди и железа.

Объектом исследования являются корни 5-10-дневных проростков *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. экотипа Columbia-0 (Col-0). Исследование проводилось с использованием техники ростовых тестов с накопыванием стресс-растворов (однократное и пятикратное накопывание). Использовались растворы НЧ CuO и Fe<sub>3</sub>O<sub>2</sub>, супернатантов соответствующих НЧ, а также CuCl<sub>2</sub> и FeCl<sub>3</sub> в концентрациях 10, 30, 100, 300, 1000 мг/л. Проводилась фоторегистрация прироста корней и изучалась архитектура кончика корня с помощью инвертированного светового микроскопа. Измерялись следующие параметры: диаметр корня в зоне деления и в зрелой зоне, длина зоны роста растяжением.

В результате работы было показано, что в невысоких концентрациях (10 мг/л), как при продолжительном воздействии, так и однократном наночастицы CuO стимулируют рост корней арабидопсиса, тогда как более высокие дозы (30-1000 мг/л) не оказывают влияния на рост корней (рис. 1).

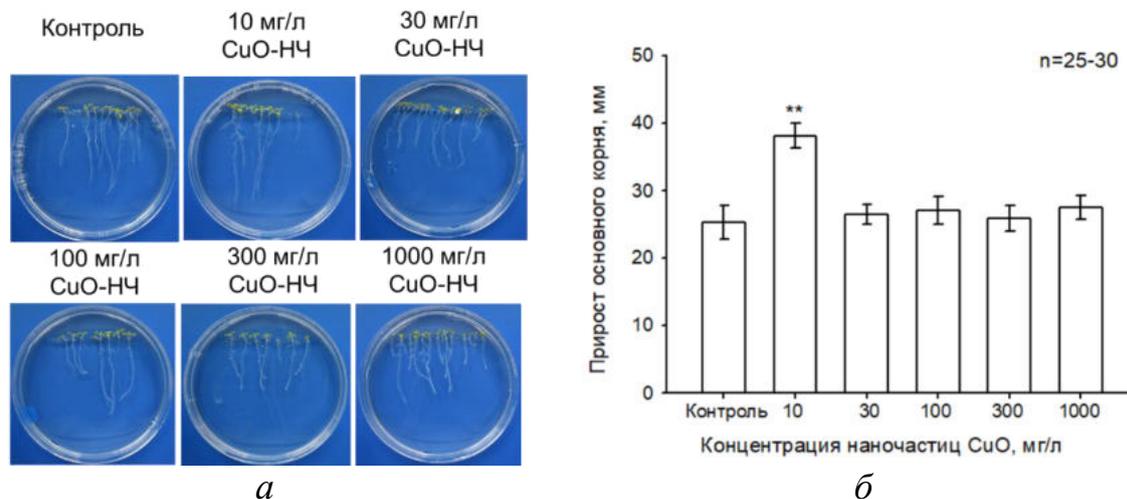


Рис. 1. Изменение роста *A. thaliana* при 5-кратной обработке НЧ оксида меди: а – фотографии 10-дневных проростков арабидопсиса; б – прирост длины основного корня

Примечание. Для расчета достоверности различий между группами производился анализ ANOVA-теста, где \*\* $p < 0,01 (X \pm Sx, n=25-30)$ .

Ионная форма меди ( $CuCl_2$ ) при продолжительном воздействии (5-кратное накопление) на корни *A. thaliana* в концентрации 10 мг/л стимулирует их рост, тогда как при однократном – ингибирует. В высоких концентрациях (30-1000 мг/л)  $CuCl_2$  ингибирует рост основного корня арабидопсиса. При анализе архитектуры корня обнаружено, что наночастицы оксида меди (II) вызывают уменьшение диаметра зрелой зоны корня в диапазоне концентраций 10-1000 мг/л при продолжительном накоплении и в диапазоне концентраций 100-1000 мг/л при однократном. Ионная форма меди ( $CuCl_2$ ) также уменьшает диаметр зрелой зоны корня в концентрациях от 10 до 1000 мг/л. CuO-НЧ приводят к уменьшению длины зоны роста растяжением при действии концентраций от 100 до 1000 мг/л.  $CuCl_2$  также ингибирует увеличение длины зоны роста растяжением в диапазоне концентраций 10-1000 мг/л, как при продолжительном, так при однократном накоплениях. При однократном воздействии наноформы оксида меди (II) в концентрациях 30-1000 мг/л происходит уменьшение диаметра зоны деления корня. Ионная форма меди ( $CuCl_2$ ) также вызывает уменьшение диаметра зоны деления при однократном воздействии в концентрациях 10-1000 мг/л. При обработке растений наночастицами

железа было установлено, что и при продолжительном воздействии, и при 1-кратном  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -НЧ в концентрациях 30-300 мг/л стимулируют рост корней (рис. 2), в то время как  $\text{FeCl}_3$  в концентрациях от 10 мг/л до 100 мг/л стимулируют рост корней *A. thaliana*, а 300 мг/л и 1000 мг/л – ингибируют.

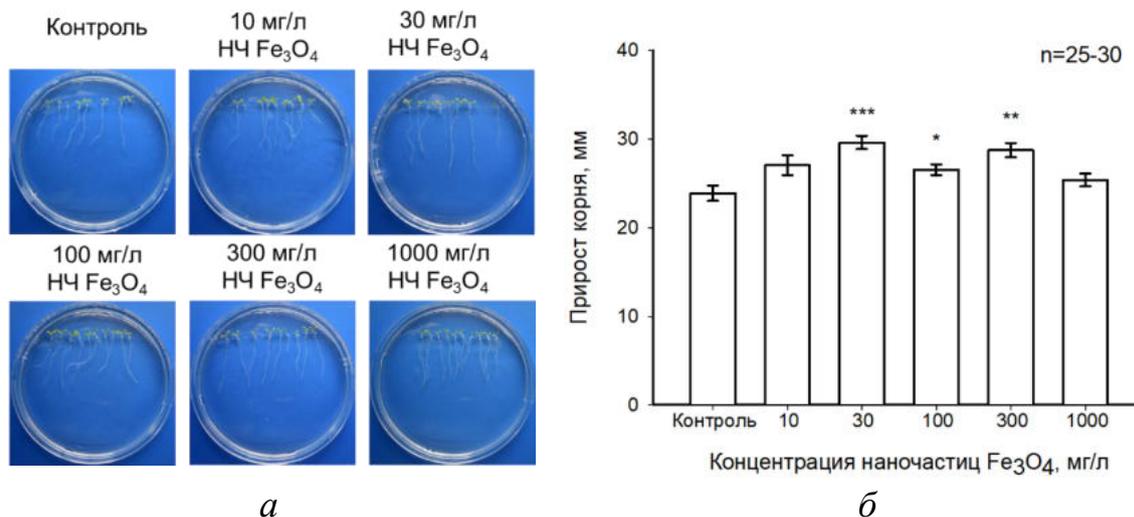


Рис. 2. Изменение роста *A. thaliana* при 5-кратной обработке НЧ оксида железа: а – фотографии 10-дневных проростков арабидопсиса; б – прирост длины основного корня

Примечание. Для расчета достоверности различий между группами производился анализ ANOVA-теста, где где \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$  (n=25-30).

При изучении архитектуры корня было отмечено, что наиболее чувствительной к воздействию наночастиц железа оказалась зрелая зона корня. Диаметр корня в данной зоне при однократной обработке всеми протестированными концентрациями  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -НЧ увеличился. Также увеличились диаметр корня в зоне деления и длина зоны роста растяжением при обработке наночастицами  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в концентрациях 100 мг/л, 300 мг/л и 1000 мг/л. При добавлении  $\text{Fe}^{3+}$  ( $\text{FeCl}_3$ ) такого эффекта не наблюдается.

Также было показано, что после 5-дневного накопления наночастиц железа диаметр корня арабидопсиса в зрелой зоне, а также длина зоны роста растяжением не менялись. Наиболее чувствительной оказалась зона деления корня. Диаметр корня в данной зоне при обработке концентрациями 30 мг/л, 100 мг/л, 300 мг/л и 1000 мг/л уменьшился на 20-30%. После 5-дневного накопления железа в ионной форме на корни арабидопсиса в концентрации 1000 мг/л произошло уменьшение диаметра корня в зрелой зоне на 16%, в зоне деления обработка концентрациями хлорида железа в диапазоне от 10 мг/л до 1000 мг/л вызывала уменьшение диаметра корня на 30-50%. Также было отмечено увеличение длины зоны роста растяжением на 41% при обработке ионами железа в концентрации

100 мг/л и уменьшение при воздействии ионов железа в концентрациях 300 мг/л и 1000 мг/л на 29% и 36% соответственно.

Таким образом, нами было показано что в ионной форме медь и железо демонстрируют большой ингибирующий эффект на ростовые процессы у арабидопсиса по сравнению с наноформой данных металлов. Более того, низкие уровни НЧ оксидов металлов (10 мг/л для CuO-НЧ и 100-300 мг/л для Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-НЧ) оказывают стимулирующее действие на рост и архитектуру корня, что может иметь практическое значение для разработки наноудобрений (корнестимулирующих препаратов).

### **Библиографические ссылки**

1. *Feigl G.* The impact of copper oxide nanoparticles on plant growth: a comprehensive review // *J. Plant Interactions.* 2023. Vol. 18. P. 224-308.

2. CuO and ZnO nanoparticles: phytotoxicity, metal speciation, and induction of oxidative stress in sand-grown wheat / C.O. Dimkpa [et al.] // *J. Nanopart. Res.* 2012. Vol. 14. P. 1–15.

3. Unraveling the plethora of toxicological implications of nanoparticles on living organisms and recent insights into different remediation strategies: A comprehensive review / R. Sharna [et al.] // *Sci. Total Environm.* 2024. Vol. 906. P.167697-167709.