

УДК 577.17:633.11

DOI: 10.33284/2658-3135-102-2-7

Оценка влияния ультрадисперсных частиц на биометрические параметры проростков пшеницы

А.М. Короткова^{1,2}, С.В. Лебедев^{1,2}, О.В. Кван^{1,2}, К.Н. Атландерова¹

¹ Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург)

² Оренбургский государственный университет (г. Оренбург)

Аннотация. В статье представлены исследования по изучению влияния ультрадисперсных частиц никеля и меди на пшеницу мягкую (*Triticum vulgare*). При внесении ультрадисперсных частиц (УДЧ) наиболее выраженное влияние на прорастание *Triticum v.* было у УДЧ меди – происходило резкое угнетение пророста семян, вплоть до полного их подавления (концентрация 0,5 и 1 М). Введение УДЧ никеля (концентрация – от 0,1 до 1 М) снижало пророст пшеницы в 16,7 раз ($P \leq 0,05$) относительно контроля. На образование боковых корней ультрадисперсные частицы повлияли неодинаково, введение меди увеличивало образование боковых корней до $6,8 \pm 0,17$ шт., а никель снижал образование латеральных корней до $3,4 \pm 1,02$ шт.

Флуориметрическое измерение DCFH-DA показало достоверное ($P \leq 0,05$) увеличение общей суммы активной формы кислорода в корнях на 35,8 % по сравнению с отрицательным контролем после воздействия УДЧ меди.

Содержание прооксидантов в проростках пшеницы обладало видоспецифичной чувствительностью к изменениям концентрации ультрадисперсных частиц меди и никеля. УДЧ никеля способствовали стимуляции выработки O_2 , а УДЧ меди – общего значения активных форм кислорода (АФК), включающий H_2O_2 и NO.

Ключевые слова: пшеница мягкая, ультрадисперсные частицы, никель, медь, прорастание семян.

UDC 577.17:633.11

Evaluation of ultrafine particles influence on biometric parameters of wheat germs

AM Korotkova^{1,2}, SV Lebedev^{1,2}, OV Kvan^{1,2}, KN Atlanderova¹

¹ Federal Research Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia)

² Orenburg State University (Orenburg, Russia)

Summary. The article presents studies on the effect of ultrafine nickel and copper particles on soft wheat (*Triticum vulgare*). After ultrafine particles (UFP) were introduced, copper UFP had the most pronounced effect on germination of *Triticum v.*, there was a sharp inhibition of seed germination, until complete suppression (concentration of 0.5 and 1 M). Introduction of nickel UFP (concentration from 0.1 to 1 M) suppressed the germination of wheat 16.7 times in comparison with the control, respectively ($P \leq 0.05$). Also, nickel reduced the number of side roots to 3.4 ± 1.02 pcs., while the introduction of copper increased the formation of lateral roots to 6.8 ± 0.17 pcs.

Fluorimetric measurement of DCFH-DA showed a significant ($P \leq 0.05$) increase in the total concentration of reactive oxygen species in roots up to 35.8 % compared with the negative control after exposure of copper UFP.

The content of prooxidants in wheat germs had a species-specific sensitivity to changes in the content of ultrafine particles of copper and nickel. Nickel UFP has contributed to the stimulation of O_2 production, and copper UFP have a common ROS value, including H_2O_2 and NO.

Key words: soft wheat, ultrafine particles, nickel, copper, seed germination.

Введение.

Среди большого количества ультрадисперсных частиц особое место занимают УДЧ меди и никеля, они давно являются лидерами и в их производстве, и как чаще используемые в мире (Pramanik S et al., 2011).

Ультрадисперсные частицы производятся в изолированных помещениях предприятия, но их следует рассматривать как активный источник загрязнения окружающей среды. На каждом этапе осуществления технологического процесса «взрыв-охлаждение-пассивация» возникают потери при рассеивании УДЧ. В воздухе и воде расплывённые наночастицы образуют стабильные аэрозоли (Aazam ES and El-Said WA, 2014) и дендриты (Carmona ER et al., 2018), которые через различные механизмы проникают в почву и другие звенья экологических сообществ (Sekine R et al., 2017). В процессе сорбции растения активно поглощают УДЧ, тем самым при их употреблении попадают в биологические объекты (Ali S et al., 2019). В связи с тем, что наночастицы металлов имеют более высокую реакционную способность и удельную поверхность относительно микрочастиц металлов, они легко вступают в химические трансформации (Handa T et al., 2017) и быстро усваиваются растениями.

УДЧ металлов легко усваиваются и накапливаются в растениях, влияя на их дальнейшую судьбу и транспорт в окружающей среде (Watson JL et al., 2014). Хотя взаимодействие растений с УДЧ преимущественно приводит к фитотоксичности, особенно при высоких концентрациях, например, в томатах, капусте, моркови, горохе и листьях салата. В некоторых работах указывается, что воздействие УДЧМ также способствует росту растений (Singh D et al., 2018). Такие кажущиеся различия в воздействии наночастиц на растения могут быть объяснены свойствами и концентрацией металлов, видом растений, их возрастом и физиологическим расположением, временем экспозиции и т. д. (Milewska-Hendel A et al., 2019).

Ионы металлов, принадлежащие к группе, включающей Cu, Cd, Hg, Ni и Zn, вызывают токсичность в живых системах путём связывания с важными клеточными компонентами, такими как ДНК или сульфгидрильные, карбоксильные или имидазольные группы белков, тем самым модифицируя их функционирование (Su Y et al., 2019). Переходный металл никель существует в пяти состояниях окисления, которые определяют его токсичность (Manna I, 2017).

Многие нанометаллы способствуют образованию активных форм кислорода (АФК), что в целом приводит к изменению окислительно-восстановительного процесса клетки. Так, металлы переменной валентности могут выделять ионы Cu^{2+} и Cu^+ , в результате чего увеличивается количество АФК. Тем временем большое количество АФК способствует лизису клеточной стенки (Kärkönen A et al., 2015).

Многие учёные исследуют безопасность УДЧ на растениях (Tripathi DK et al., 2017). В научных статьях приведено множество экспериментов по оценке урожайности и биометрических параметров растений на применение УДЧ металлов (Rizwan M et al., 2017).

Обнаружено, что ультрадисперсные металлы, особенно двухвалентные оксиды, высвобождают «toxic» ионы и стимулируют выработку АФК (Tang Y et al., 2018).

Однако потенциальное воздействие на окружающую среду и живые организмы всё ещё плохо изучены, и необходимы подходящие методологии для идентификации взаимодействий УДЧМ с клеточными компонентами для достижения лучшего понимания и определения принципов их безопасного применения (Lei C et al., 2018).

Цель исследования.

Оценка влияния ультрадисперсных частиц на биометрические параметры проростков мягкой пшеницы (*Triticum vulgare*) после воздействия УДЧ меди и никеля.

Материалы и методы исследования

Объект исследования Семена пшеницы мягкой *Triticum vulgare* Vill. Ультрадисперсные порошки никеля, меди.

Схема эксперимента. Семена пшеницы для эксперимента предварительно обрабатывали 0,01 % калием марганцевым кислым, оставляли на 3 часа в увлажнённой марле при температуре +37 °С. Набухшие семена помещали в чашки Петри и ставили в климатическую камеру «Agilent», экспозиция – 12 часов.

Ультрадисперсные частицы диспергировали в ультразвуке в ванне «Сапфир ТТЦ», частота – 35 кГц 30 минут.

В пророщенные семена добавляли 500 мкл суспензий УДЧ металлов, концентрация препарата – 0,0125-1,0 М. Ультрадисперсные порошки никеля (ООО «Передовые порошковые технологии», г. Томск) размером $57 \pm 1,15$ нм, метод получения – электрический взрыв проводника в атмосфере. Медь (ООО «Плазмотерм», г. Москва) – $54 \pm 2,06$ нм, метод получения – термическое разложение в азотной плазме.

Пробу проращивали при экспозиции 48 часов. Измеряли длину первого листа и основного корня из 10 семян.

Энергию прорастания (%) рассчитывали через 72 часа по ГОСТ 12038-84. По данным биометрических параметров рассчитывали индекс толерантности (ИТ) – отношение результативного параметра опытных растений к показателю контрольных растений, выраженное в процентах (Feng J et al., 2018). Затем для дальнейших измерений, соответствующих задачам эксперимента, из каждого варианта брали по 3 проростка.

Уровень внутриклеточного содержания активных форм кислорода определяли по значению флуоресценции (Wada S et al., 2019), гидроксильный радикал HO рассчитывали по флуоресценции 7-гидроксикумарин-3-карбоновой кислоты (7-ОН-ККК) (Yang J et al., 2017), положительным контролем служил реактив Фентона – 50 мкМ CuSO_4 и 25 мМ H_2O_2 . Генерацию супероксид-анион радикала $\text{O}_2^{\bullet-}$ в корнях проростков определяли по окислению адреналина при 347 нм (Sirota TV, 2017), при этом положительным контролем была система генерации O_2 -0,05 мМ рибофлавин (РФ) и 1 мМ тетраметилэтилендиамин (ТЕМЕД) (Kibriya G et al., 2018).

Жизнеспособность клеток (ЖС) определяли по активности редуктаз на основании протокола «Cell counting kit-8 (СКК-8)» (WST-8 patent № 2.251.850, Канада). ДНК из проростков выделяли через 48 часов по протоколу производителя «ДНК-Экстран-3» («Синтол», РФ).

Оборудование и технические средства. Ультразвуковая ванна «Сапфир ТТЦ» (Россия), климатическая камера «Agilent» (США).

Статистическая обработка. Полученные результаты обрабатывали методами вариационной статистики с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США) с обработкой данных в программе «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США). Достоверными считали результаты: $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ и $P \leq 0,001$.

Результаты исследований.

Интегральная оценка результатов тестирования ИТ по энергии прорастания и биометрическим характеристикам проростков через 48 часов воздействия УДЧ позволила зафиксировать низкую устойчивость растений к меди и никелю. При введении УДЧ Cu и Ni, энергия прорастания (E) достоверно снижалась ($P \leq 0,05$). При этом УДЧ меди показали выраженное подавление прорастания, отмечалось резкое угнетение пророста в 44 раза при концентрации 0,5 М, при концентрации 1,0 М происходило полное подавление. При внесении УДЧ никеля в концентрациях 0,1-1,0 М процент пророста был ниже в 16,7 раз ($P \leq 0,05$) относительно контроля (рис. 1).

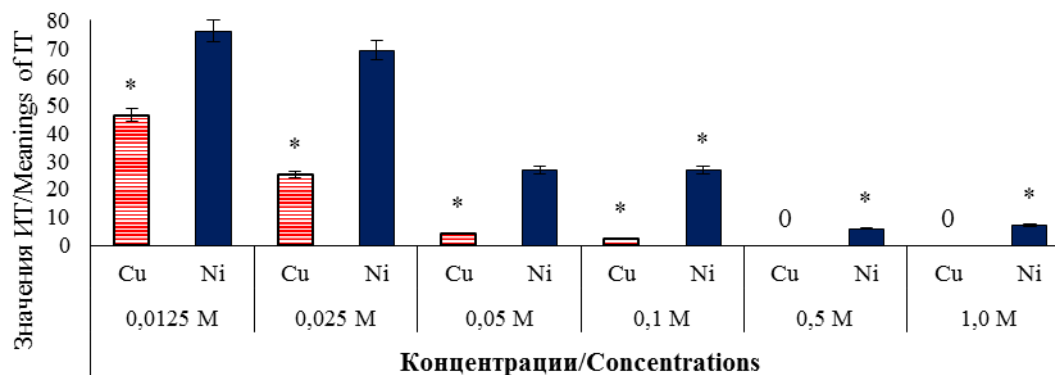


Рис. 1 – Индекс толерантности, ИТ (%) по энергии прорастания через 48 часов воздействия УДЧ
Figure 1 – Tolerance index, IT (%) in terms of germination energy after 48 hours of UDP impact

Примечание: * – $P \leq 0,05$

Note: * – $P \leq 0,05$

После 48 часов воздействия УДЧ уменьшался рост проростков прямо пропорционально концентрации, при воздействии меди уменьшение роста: листа – в 11,0 раз ($P \leq 0,05$), корня – в 19,0 раз ($P \leq 0,05$) относительно контроля. При воздействии никеля подавление роста: листа – в 7,4 раз ($P \leq 0,05$), корня – в 19 раз ($P \leq 0,05$) по отношению к контролю (рис. 2).

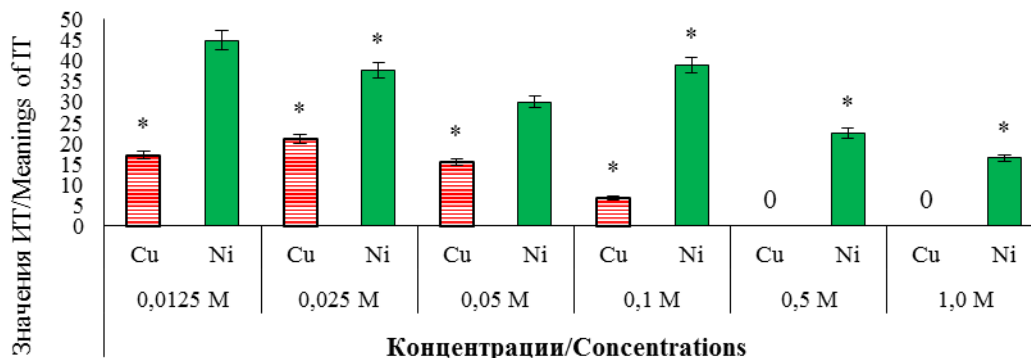


Рис. 2 – Индекс толерантности, ИТ (%) по показателю роста листа через 48 часов воздействия УДЧ
Figure 2 – Tolerance index, IT (%) in terms of leaf growth after 48 hours of UDP impact

Примечание: * – $P \leq 0,05$

Note: * – $P \leq 0.05$

УДЧ меди и никеля влияли на процесс заложения боковых корней в большей степени, чем многие металлы (Therault G et al., 2016). При воздействии никеля количество латеральных корней составляло до $3,40 \pm 1,02$ шт. относительно контроля $4,60 \pm 0,11$ шт., воздействие же меди, наоборот, увеличивало число боковых корней до $6,80 \pm 0,17$ шт. Уменьшение придаточных корней может быть следствием проявления специфического адаптивного ответа растений (Bielach A et al., 2017) (рис. 3).

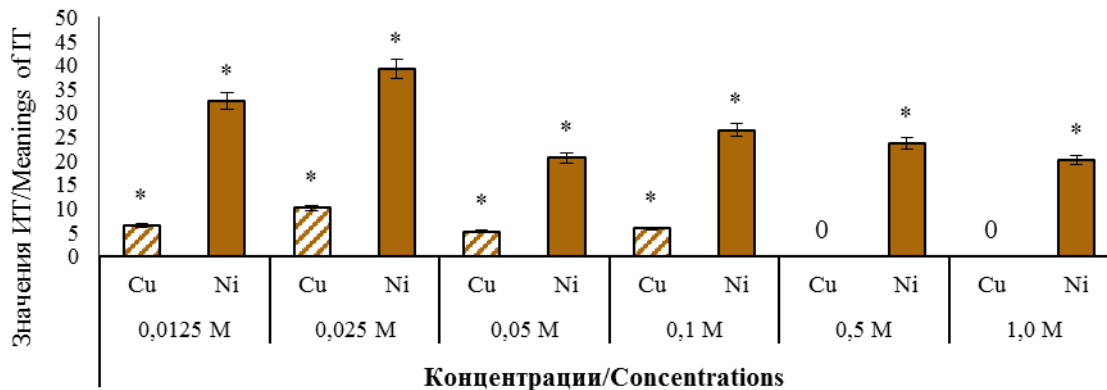


Рис. 3 – Индекс толерантности, ИТ (%) по показателю роста корня через 48 часов воздействия УДЧ
Figure 3 – Tolerance index, IT (%) in terms of root growth after 48 hours of UDP impact

Примечание: * – $P \leq 0,05$

Note: * – $P \leq 0.05$

Воздействие на пшеницу УДЧ характеризовалось развитием более компактной корневой системы по сравнению с интактными образцами. Сходные результаты были получены и у других авторов (Guigues S et al., 2017; Spielman-Sun E et al., 2018).

Исходя из характеристик роста пшеницы, получили значение ИТ, оно было меньше для корней, чем для листьев. Это представляется вполне закономерным, поскольку корень является первичной «целью» для препаратов. Изменение роста корней пшеницы после внесения Cu и Ni вызвало интерес к дальнейшим исследованиям «prooxidant effects». Флуориметрическое измерение DCFH-DA показало, что при воздействии УДЧ меди происходило достоверное повышение значения активной формы кислорода до 35,80 % ($P < 0,05$) относительно контроля. В основном в опытных группах значение АФК снижалось по сравнению с контролем на 39,0 %, это подтверждается при микроскопии апекса корня (рис. 4).

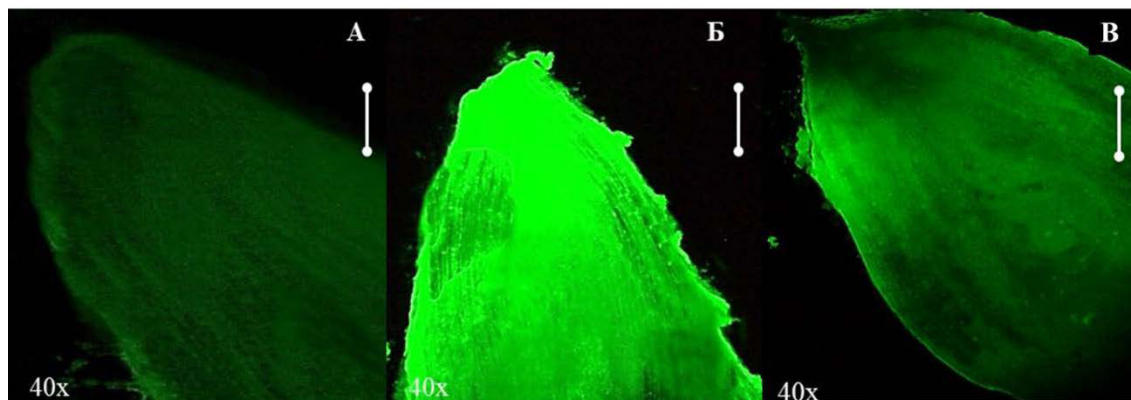


Рис. 4 – Флуоресценция DCF, А – контроль, Б – внесение Cu, В – внесение Ni
Figure 4 – Fluorescence DCF, A – control, B – Cu introduction, C – Ni introduction

Воздействие УДЧ металлов на выработку радикалов $\text{HO}\cdot$ в корневой части *T. vulgare* заключалось в увеличении интенсивности флуоресцентного сигнала 7-ОН-ККК. Так, наиболее выраженная статистически значимая по сравнению с контролем ($P \leq 0,05$) аккумуляция $\text{HO}\cdot$ замечена при введении меди в дозировке 0,05 М до 8,5 % и 0,10 М – до 13,6 %. Степень радикалов было ниже на 8,7-12,0 % относительно обработанных растений реагентом Фентона. Введение никеля незначительно повлияло на уровень радикалов – менее 3,0 %.

Кроме того, обнаружено, что интенсивность образования O_2 стремительно развивалась после воздействия никеля от 52,0 до 68,0 % по отношению к отрицательному контролю. Экспозиция с медью увеличивала выработку O_2 в незначительной степени – 12,5 % ($P \leq 0,05$), что подтверждается другими исследованиями (Nair PMG, 2014). Значение данного показателя было в 2 раза меньше, чем у растений, выращенных в генерационной системе O_2 , это хорошо видно при спектре 347 нм (рис. 5).

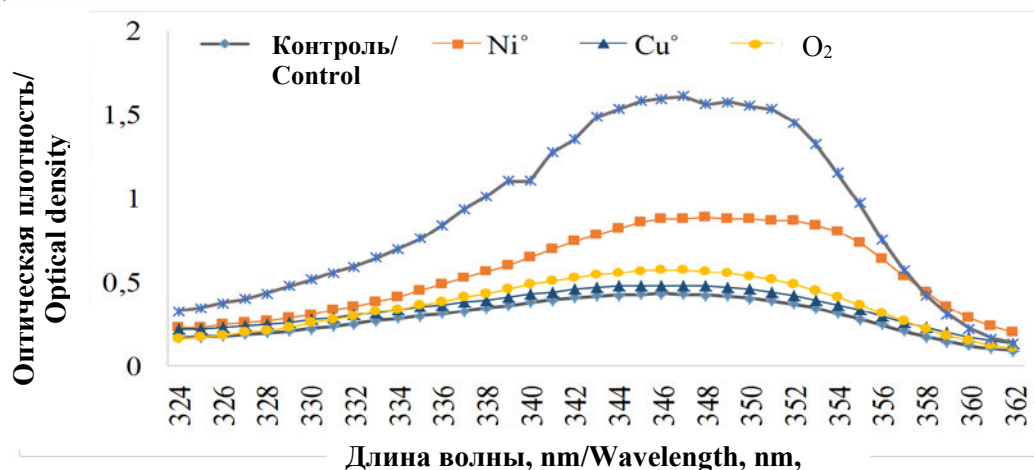


Рис. 5 – Спектры поглощения продуктов окисления адреналина в корнях проростков при воздействии Cu (0,10 М), Ni (0,10 М), контроль – H_2O , O_2 – система генерации (экспозиция 48 часов)

Figure 5 – The absorption spectra of the products of adrenaline oxidation in the roots of seedlings when exposed Cu (0.10 M), Ni (0.10 M), control – H_2O , O_2 – generation system (exposure 48 hours) control

В ходе эксперимента мы также наблюдали значительный флуоресцентный сигнал 7-ОНССА гидроксильного радикала после воздействия меди (рис. 6). По сравнению с контролем наиболее важное значение накопления HO радикала в корнях было при внесении меди в дозировке 0,05 М и 0,10 М, это больше на 8,5 % и 13,6 % ($P \leq 0,05$) относительно контроля, но ниже на 8,7 % и 12 %, чем после применения реагента Фентона. Присутствие в среде никеля не оказало значительного влияния на образование радикалов HO .

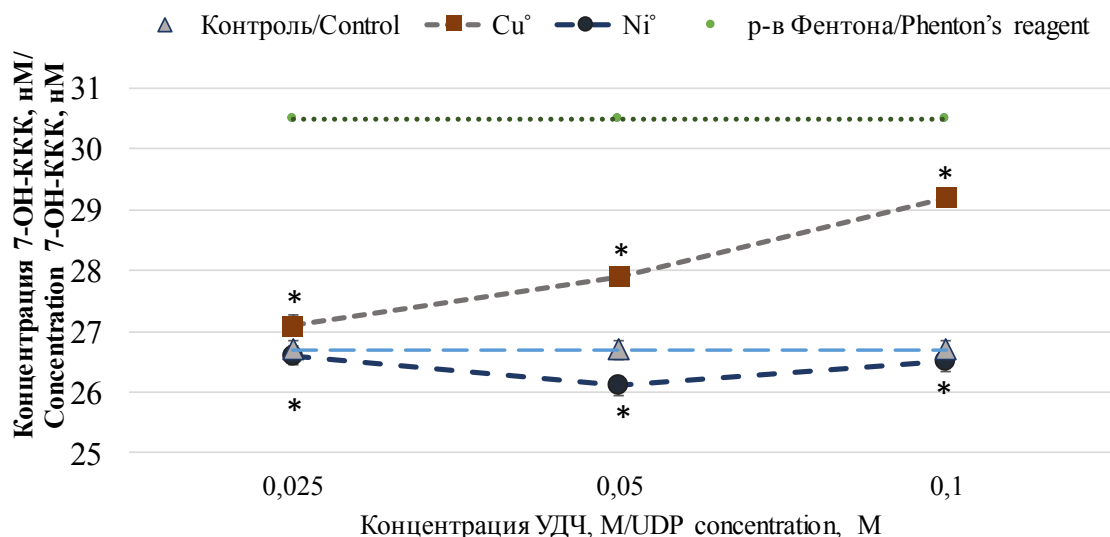


Рис. 6 – Уровень гидроксильных радикалов HO в клетках корневой системы проростков пшеницы при введении УДЧ Cu и Ni (экспозиция 48 часов)

Figure 6 – The level of hydroxyl radicals HO in the cells of root system of wheat seedlings with the UDP introduction of Cu and Ni (exposure 48 hours)

Примечание: достоверно при * – $P \leq 0,05$

Note: significant with * – $P \leq 0.05$

По результатам видно, что интенсивность образования O_2 возрастает при воздействии никеля на проростки пшеницы на 52,0-68,0 % по отношению к контролю (рис. 7). Инкубирование образцов с медью незначительно влияли на скорость выработки O_2 , всего на 12,5 %, этот показатель был 2 раза ниже, нежели у растений, выращенных в системе генерации O_2 .

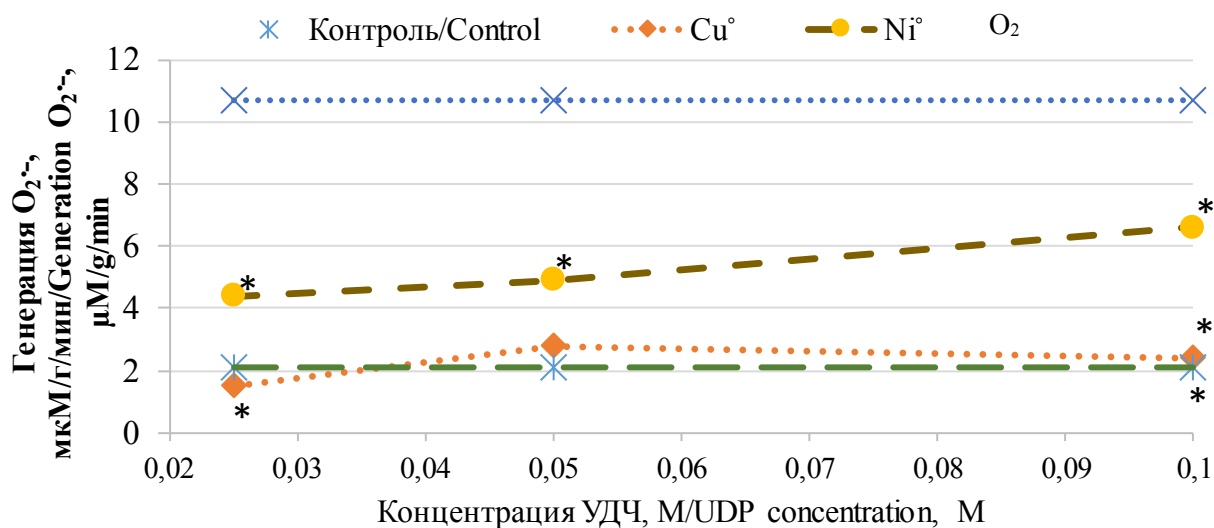


Рис. 7 – Скорость генерации супероксидного аниона O_2^- обусловленным окислением адреналина в экстракте проростков при введении УДЧ Cu и Ni (экспозиция 48 часов)

Figure 7 – The rate of superoxide anion O_2^- generation due to adrenaline oxidation in the extract of seedlings with the UDP introduction of Cu and Ni (exposure 48 hours)

Примечание: достоверно при * – $P \leq 0,05$

Note: significant with * – $P \leq 0.05$

Подводя итоги исследования концентрации прооксидантов в проростках, выявлено, что воздействия УДЧ меди и никеля на *T. Vulgare* обладали видоспецифической чувствительностью к изменению дозы препаратов. Так, УДЧ Ni способствовали стимуляции выработки O_2 , а УДЧ Cu – общего значения АФК, включающий H_2O_2 и NO.

Результаты анализа служат доказательством существования селективности в активации реакций различных антиоксидантных систем растений, определяемых свойствами ультрадисперсных частиц.

Но изменение уровня АФК при воздействии УДЧ можно объяснить неспецифической реакцией растений, поскольку такие изменения сходны со стрессом, ввиду этого полученные данные нуждаются в дальнейших исследованиях. Главной «мишенью» для действия УДЧ металлов оказалась корневая система, это и выявило интерес к обнаружению механизмов фитотоксичности, с акцентом на изучение повреждения клеток в этой конкретной части растения. Изменение окислительно-восстановительного баланса могут привести к изменению пролиферативных процессов клеток (AlQuraidi AO et al., 2019).

Далее мы изучили жизнеспособность клеток растений (ЖС) по уровню выделения формазана из соли тетразолия (WST). Результаты WST-теста выявили зависимость жизнеспособность клеток в корневой системе проростков от концентрации и времени экспозиции УДЧ (рис. 8). УДЧ меди оказались наиболее токсичными, они вызывали нестабильное и быстрое снижение выхода формазана после одного часа воздействия, а 24-часовая экспозиция приводила к угнетению ЖС на 89,0 % относительно контрольной. Угнетение ферментативной активности редуктаз, вероятно, стало ответом на действия металла. Напротив, введение УДЧ никеля приводило медленному снижению формазана, при экспозиции 24 часа – на 56,0 % по отношению к контролю.

При воздействии УДЧ металлов на корневую систему при экспозиции 48 часов наблюдался цитотоксический эффект в дозировках 0,05 М и 0,10 М ($P \leq 0,05$).

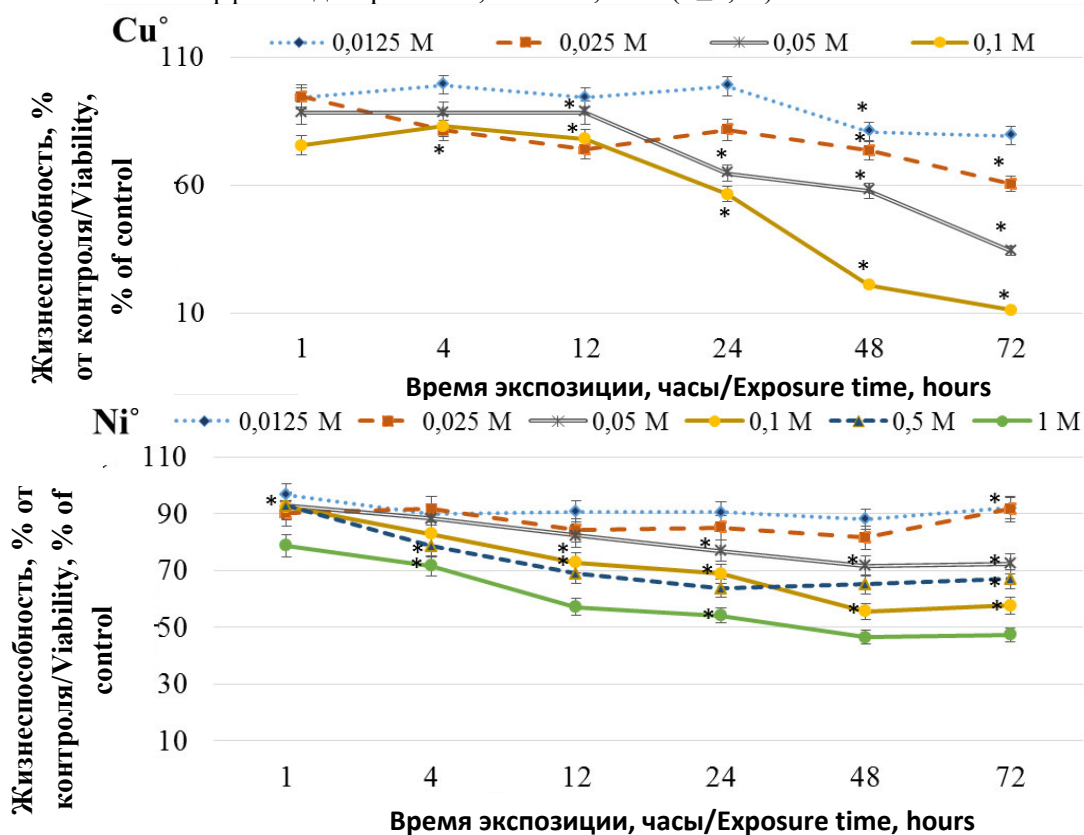


Рис. 8 – Жизнеспособность клеток корней проростков при действии УДЧ Cu и Ni: по выходу формазана
Figure 8 – Viability of the cells in seedlings root when exposed UDP of Cu and Ni: on the yield of formazan

Примечание: достоверно относительно контроля * – $P \leq 0,05$

Note: significant relatively with control * – $P \leq 0.05$

Обсуждение полученных результатов.

Ультрадисперсные частицы меди и никеля давно привлекают внимание как одни из основных загрязнителей благодаря широкому использованию в металлургической и электронной промышленности. Более ранние исследования показали, что УДЧ NiO индуцирует цитотоксичность на культивируемых клеточных линиях человека путём стимуляции ROS-опосредованных апоптотических путей (Alinejad-Mofrad E et al., 2019), что требует обширных исследований и оценки безопасности этой группы соединений.

Известно, что концентрация играет ключевую роль в определении токсического потенциала любого соединения, которое может проявляться как наличие цитотоксического или генотоксического (Woźniak A et al., 2017). Поскольку каждая из частиц индуцировала значительную цитотоксичность при самых высоких концентрациях, эти результаты показывают, что Cu- и Ni-содержащие частицы могут действовать через специфические концентрационные механизмы. Металлические УДЧ демонстрируют разнообразные характеристики в водных суспензиях, обусловленных комбинированными эффектами структуры, поверхностного заряда, формы и размера наночастиц (Schubert J et al., 2019), а также взаимодействия внешних условий, таких как pH, ионная сила раствора и т. д. (Потапов А.И. и др., 2013). Как правило, наночастицы предрасположены к образованию агрегатов в водной среде, в основном из-за повышенного взаимодействия уровня частиц (Park EJ et al., 2017), отрицательно влияя на их площадь поверхности и потенциал растворения (Короткова А.М. и др., 2015).

Так, в случае применения УДЧ меди и никеля наблюдалось снижение всхожести семян, параметров роста и количества хлорофиллов в листьях проростков. Изменение окислительно-восстановительного баланса наблюдалось в корнях проростков, что проявлялось в виде увеличения общего пула АФК и радикалов NO и O₂. Защитные механизмы антиоксидантов после действия УДЧ в дозе 0,10 М стали менее эффективными, вследствие чего происходило снижение ЖС клеток. Вполне вероятно, что УДЧ Ni, адсорбированные на поверхности корня, вызывали накопление O₂, происходило уменьшение энергетических ресурсов клетки, что приводило к апоптозу, это было подтверждено малым увеличением активности каспазоподобных протеаз.

Однако в исследовании Oukarroum с коллегами (2015) на примере ряски *Lemna gibba* L. обнаружено, что токсичность NiO вызвана выделением ионов и АФК в клетках, особенно при высокой концентрации (1000 мг/л), что не совпадает с нашими выводами. В то же время УДЧ Cu, как металл с переменной валентностью, вероятно, изолировал ионы Cu²⁺ и Cu⁺ и приводил к увеличению пула АФК. Тем самым большое количество АФК превышало адаптационные возможности растений, что содействовало механическому повреждению мембраны и клетки (Alarifi S et al., 2017), это привело к окислительному стрессу и развитию некроза. Из-за окислительных свойств предполагается, что УДЧ Cu имеют более высокий токсический эффект, чем Ni. Недавно установлено, что нано-CuO в разведениях от 2,5 до 1000 мг/л приводит к зависимому от дозы снижению количества тилакоидов на грану, скорости фотосинтеза и содержания фотосинтетических пигментов, а также увеличению содержания аскорбат пероксидазы и супероксиддисмутазы (Costa da MVJ and Sharma PK, 2016). Ранее уже отмечалось ингибирование длины корня растений после экспозиции с НЧ CuO в концентрации более 10 мг/кг, что одновременно проявлялось в увеличении количества корневых волосков и сокращении зон деления и удлинения корня (Wright M et al., 2016).

Таким образом, результаты экспериментов доказывают, что изменения фотосинтетической активности и повышенные уровни АФК в корнях растений *T. vulgare* после воздействия меди и никеля могут быть сопоставлены с цитогенной токсичностью этих металлов. Настоящие результаты согласуются с ранее опубликованными сообщениями (Mushinskiy AA et al., 2018), что 24-часовое воздействие может привести к повреждению клеток за счёт генерации АФК. Также показана способность наноразмерных частиц Ni и NiO вырабатывать АФК на разных модельных системах *in vitro* (Karlsson HL et al., 2014). Подобный механизм был предложен более ранними исследователями как возможный механизм фитотоксичности, вызванный другими УДЧ металлов. Выработка АФК внутри клетки поражала митохондрии, когда липиды, присутствующие в клеточных мембранах, взаимодействуют со свободными радикалами, что приводило к образованию перекисей липидов (Liu CG, 2019).

Выводы.

Обнаружено уменьшение устойчивости проростков пшеницы мягкой после воздействия УДЧ меди и никеля, что проявляется снижением энергии прорастания семян и ростовых показателей.

Установлено избирательное накопление перекиси водорода и гидроксильных радикалов в корнях проростков под действием УДЧ Cu и гидроксильных радикалов – после обработки растений Ni.

Снижение жизнеспособности клеток корней проростков наблюдалось в большей степени при действии УДЧ меди, что вызывало угнетение выхода формазана до 89,0 % по отношению к контролю.

Литература

1. Безопасность наночастиц и наноматериалов для окружающей и производственной среды / А.И. Потапов, В.Н. Ракитский, А.В. Тулакин, Л.А. Луценко, А.В. Ильницкая, А.М. Егорова, Л.Л. Гвоздева // Гигиена и санитария. 2013. Т. 92. № 3. С. 8-14. [Potapov AI, Rakitskiy VN, Tulakin AV, Lutsenko LA, Il'nitskaya AV, Egorova AM, Gvozdeva LL. Safety of nanoparticles and nanomaterials for environmental and occupational space. Hygiene and sanitation. 2013;92(3):8-14. (In Russ)].
2. Короткова А.М., Лебедев С.В., Русакова Е.А. ДНК-повреждающие эффекты наночастиц Ni и NiO в растениях вида *Triticum vulgare* // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 10(185). С. 24-26. [Korotkova AM, Lebedev SV, Rusakova EA. DNA-damaging effects of nanoparticles Ni⁰ and NiO for example a plant species *Triticum vulgare*. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015;10(185):24-26. (In Russ)].
3. Aazam ES, El-Said WA. Synthesis of copper/nickel nanoparticles using newly synthesized Schiff-base metals complexes and their cytotoxicity/catalytic activities. *Bioorganic Chemistry*. 2014;57:5-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2014.07.004>
4. Alarifi S, Ali D, Alkahtani S. Oxidative stress-induced DNA damage by manganese dioxide nanoparticles in human neuronal cells. *BioMed Research International*. 2017;2017:5478790:10 p. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/5478790>
5. Ali S, Rizwan M, Hussain A, Zia Ur Rehman M, Ali B, Yousaf B, Wijaya L, Alyemeni MN, Ahmad P. Silicon nanoparticles enhanced the growth and reduced the cadmium accumulation in grains of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*. 2019;140:1-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.04.041>
6. Alinejad-Mofrad E, Malaekheh-Nikouei B, Gholami L, Mousavi SH, Sadeghnia HR, Mohajeri M, Darroudi M, Oskuee RK. Evaluation and comparison of cytotoxicity, genotoxicity, and apoptotic effects of poly-l-lysine/plasmid DNA micro- and nanoparticles. *Human & Experimental Toxicology*. 2019. doi: <https://doi.org/10.1177/0960327119846924>
7. AlQuraidi AO, Mosa KA, Ramamoorthy K. Phytotoxic and genotoxic effects of copper nanoparticles in coriander (*Coriandrum sativum*-Apiaceae). *Plants*. 2019;8(1):19: 12 p. doi: <https://doi.org/10.3390/plants8010019>
8. Bielach A, Hrtyan M, Tognetti VB. Plants under Stress: Involvement of Auxin and Cytokinin. *International Journal of Molecular Sciences*. 2017;18(7): 1427:29 p. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms18071427>
9. Carmona ER, García-Rodríguez A, Marcos R. Genotoxicity of copper and nickel nanoparticles in somatic cells of *Drosophila melanogaster*. *Journal of Toxicology*. 2018;2018:7278036:8 p. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/7278036>
10. Costa da MVJ, Sharma PK. Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*. 2016;54(1):110-119. doi: <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0167-5>
11. Feng J, Lin Y, Yang Y, Shen Q, Huang J, Wang S, Zhu X, Li Z. Tolerance and bioaccumulation of combined copper, zinc, and cadmium in *Sesuvium portulacastrum*. *Marine pollution bulletin*. 2018;131(Part A):416-421. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.049>

12. Guigues S, Bravin MN, Garnier C, Doelsch E. Does specific parameterization of WHAM improve the prediction of copper competitive binding and toxicity on plant roots? *Chemosphere*. 2017;170:225-232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.017>
13. Handa T, Hirai T, Izumi N, Shun-ichi E, Shin-ichi T, Nagano K, Higashisaka K, Yoshioka Y, Tsutsumi Y. Identifying a size-specific hazard of silica nanoparticles after intravenous administration and its relationship to the other hazards that have negative correlations with the particle size in mice. *Nanotechnology*. 2017;28(13):135101. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6528/aa5d7c>
14. Kärkönen A, Kuchitsu K. Reactive oxygen species in cell wall metabolism and development in plants. *Phytochemistry*. 2015;112:22-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.09.016>
15. Karlsson HL, Gliga AR, Calléja F MGR, Gonçalves C SAG, Wallinder IO, Vrieling H, Fadeel B, Hendriks G. Mechanism-based genotoxicity screening of metal oxide nanoparticles using the ToxTracker panel of reporter cell lines. *Particle and Fibre Toxicology*. 2014;11:41:14 p. doi: <https://doi.org/10.1186/s12989-014-0041-9>
16. Kibriya G, Bagdi AK, Hajra A. Visible light induced tetramethylethylenediamine assisted formylation of imidazopyridines. *Organic and Biomolecular Chemistry*. 2018;16(18):3473-3478. doi: <http://dx.doi.org/10.1039/c8ob00532j>
17. Lei C, Sun Y, Tsang DCW, Lin D. Environmental transformations and ecological effects of iron-based nanoparticles. *Environmental Pollution*. 2018;232:10-30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.052>
18. Liu CG, Sun C, Jiang MX, Zhang LL, Sun MJ. Calculations of NO reduction with CO over a Cu₁/PMA single-atom catalyst: a study of surface oxygen species, active sites, and the reaction mechanism. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019;21(19):9975-9986. doi: <https://doi.org/10.1039/C9CP01092K>
19. Manna I, Bandyopadhyay M. Engineered nickel oxide nanoparticle causes substantial physicochemical perturbation in plants. *Frontiers in Chemistry*. 2017;5:Article 92:16 p. doi: <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00092>
20. Milewska-Hendel A, Zubko M, Stróż D, Kurczyńska EU. Effect of nanoparticles surface charge on the *Arabidopsis thaliana* (L.) roots development and their movement into the root cells and protoplasts. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(7):1650:22 p. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms20071650>
21. Mushinskiy AA, Aminova EV, Korotkova AM. Evaluation of tolerance of tubers *Solanum tuberosum* to silica nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(34):34559-34569. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3268-4>
22. Nair PMG, Chung IM. Impact of copper oxide nanoparticles exposure on *Arabidopsis thaliana* growth, root system development, root lignification, and molecular level changes. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int*. 2014;21(22):12709-12722. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3210-3>
23. Oukarroum A, Barhoumi L, Samadani M, Dewez D. Toxic effects of Nickel oxide bulk and nanoparticles on the aquatic plant *Lemna gibba* L. *Hindawi Publishing Corporation BioMed Research International*. 2015;2015:Article ID 501326:7 p. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/501326>
24. Park EJ, Jeong U, Yoon C, Kim Y. Comparison of distribution and toxicity of different types of zinc-based nanoparticles. *Environ Toxicol*. 2017;32(4):1363-1374. doi: <https://doi.org/10.1002/tox.22330>
25. Pramanik S, Pal S, Bysakh S, De G. Cu_xNi_{1-x} alloy nanoparticles embedded SiO₂ films: synthesis and structure. *Journal of Nanoparticles Research*. 2011;13(1):321-329. doi: <https://doi.org/10.1007/s11051-010-0033-0>
26. Rizwan M, Ali S., Qayyum MF, Ok YS, Adrees M, Ibrahim M, Zia-Ur-Rehman M, Farid M, Abbas F. Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: A critical review. *J Hazard Mater*. 2017;322(Part A):2-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.061>
27. Schubert J, Radeke C, Fery A, Chanana M. The role of pH, metal ions and their hydroxides in charge reversal of protein-coated nanoparticles. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019;21:11011-11018. doi: <https://doi.org/10.1039/C8CP05946B>

28. Sekine R, Marzouk ER, Khaksar M, Scheckel KG, Stegemeier JP, Lowry GV, Donner E, Lombi E. Aging of dissolved copper and copper-based nanoparticles in five different soils: Short-term Kinetics vs. Long-term Fate. *Journal of Environmental Quality*. 2017;46(6):1198-1205. doi: 10.2134/jeq2016.12.0485
29. Singh D, Kumar A. Investigating long-term effect of nanoparticles on growth of *Raphanus sativus* plants: a trans-generational study. *Ecotoxicology*. 2018;27(1):23-31. doi: <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1867-3>
30. Sirota TV. Standardization and regulation of the rate of the superoxide-generating reaction of adrenaline autoxidation used for evaluation of pro/antioxidant properties of various materials. *Biochemistry (Moscow), Supplement Series B: Biomedical Chemistry*. 2017;11(2):128-133. doi: <https://doi.org/10.1134/S1990750817020068>
31. Spielman-Sun E, Lombi E, Donner E, Avellan A, Etschmann B, Howard D, Lowry GV. Temporal evolution of copper distribution and speciation in roots of *Triticum aestivum* exposed to CuO, Cu(OH)₂, and CuS nanoparticles. *Environ Sci Technol*. 2018;52(17):9777-9784. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02111>
32. Su Y, Wu D, Xia H, Zhang C, Shi J, Wilkinson KJ, Xie B. Metallic nanoparticles induced antibiotic resistance genes attenuation of leachate culturable microbiota: The combined roles of growth inhibition, ion dissolution and oxidative stress. *Environmental International*. 2019;128:407-416. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.007>
33. Tang Y, Xin H, Yang S, Guo M, Malkoske T, Yin D, Xia S. Environmental risks of ZnO nanoparticle exposure on *Microcystis aeruginosa*: Toxic effects and environmental feedback. *Aquatic Toxicology*. 2018;204:19-26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2018.08.010>
34. Theriault G, Nkongolo K. Nickel and Copper Toxicity and Plant Response Mechanisms in White Birch (*Betula papyrifera*). *Bull Environ Contam Toxicol*. 2016;97(2):171-176. doi: <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1842-3>
35. Tripathi DK., Shweta, Singh S, Singh S, Pandey R, Singh VP, Sharma NC, Prasad SM, Dubey NK, Chauhan DK. An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2017;110:2-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.030>
36. Wada S, Cui S, Yoshida S. Reactive Oxygen Species (ROS) Generation Is Indispensable for Haustorium Formation of the Root Parasitic Plant *Striga hermonthica*. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:328: 12 p. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00328>
37. Watson JL, Fang T, Dimkpa CO, Britt DW, McLean JE, Jacobson A, Anderson AJ. The phytotoxicity of ZnO nanoparticles on wheat varies with soil properties. *Biometals*. 2015;28(1):101-112. doi: <https://doi.org/10.1007/s10534-014-9806-8>
38. Woźniak A, Malankowska A, Nowaczyk G, Grześkowiak BF, TuŚnio K, Słomski R, Zaleska-Medynska A, Jurga S. Size and shape-dependent cytotoxicity profile of gold nanoparticles for biomedical applications. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2017;28:92:11 p. doi: <https://doi.org/10.1007/s10856-017-5902-y>
39. Wright M, Adams J, Yang K, McManus P, Jacobson A, Gade A, McLean J, Britt D, Anderson A. A root-colonizing pseudomonad lessens stress responses in wheat imposed by CuO nanoparticles. *PLoS One*. 2016;11(10):19 p. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164635>
40. Yang J, Shi S, Gong W, Du L, Sun J, Song S. The characterization of plant species using first-derivative fluorescence spectra. *Luminescence*. 2017;32(3):348-352. doi: <https://doi.org/10.1002/bio.3185>

References

1. Potapov AI, Rakitskiy VN, Tulakin AV, Lutsenko LA, Il'nitskaya AV, Egorova AM, Gvozdeva LL. Safety of nanoparticles and nanomaterials for environmental and occupational space. *Hygiene and sanitation*. 2013;92(3):8-14.

2. Korotkova AM, Lebedev SV, Rusakova EA. DNA-damaging effects of nanoparticles Ni⁰ and NiO for example a plant species *Triticum vulgare*. VESTNIK Orenburg State University. 2015;10(185):24-26.
3. Aazam ES, El-Said WA. Synthesis of copper/nickel nanoparticles using newly synthesized Schiff-base metals complexes and their cytotoxicity/catalytic activities. Bioorganic Chemistry. 2014;57:5-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2014.07.004>
4. Alarifi S, Ali D, Alkahtani S. Oxidative stress-induced DNA damage by manganese dioxide nanoparticles in human neuronal cells. BioMed Research International. 2017;2017:5478790:10 p. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/5478790>
5. Ali S, Rizwan M, Hussain A, Zia Ur Rehman M, Ali B, Yousaf B, Wijaya L, Alyemeni MN, Ahmad P. Silicon nanoparticles enhanced the growth and reduced the cadmium accumulation in grains of wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Physiology and Biochemistry. 2019;140:1-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.04.041>
6. Alinejad-Mofrad E, Malaekheh-Nikouei B, Gholami L, Mousavi SH, Sadeghnia HR, Mohajeri M, Darroudi M, Oskuee RK. Evaluation and comparison of cytotoxicity, genotoxicity, and apoptotic effects of poly-l-lysine/plasmid DNA micro- and nanoparticles. Human & Experimental Toxicology. 2019. doi: <https://doi.org/10.1177/0960327119846924>
7. AlQuraidi AO, Mosa KA, Ramamoorthy K. Phytotoxic and genotoxic effects of copper nanoparticles in coriander (*Coriandrum sativum*-Apiaceae). Plants. 2019;8(1):19: 12 p. doi: <https://doi.org/10.3390/plants8010019>
8. Bielach A, Hrtyan M, Tognetti VB. Plants under Stress: Involvement of Auxin and Cytokinin. International Journal of Molecular Sciences. 2017;18(7): 1427:29 p. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms18071427>
9. Carmona ER, García-Rodríguez A, Marcos R. Genotoxicity of copper and nickel nanoparticles in somatic cells of *Drosophila melanogaster*. Journal of Toxicology. 2018;2018:7278036:8 p. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/7278036>
10. Costa da MVJ, Sharma PK. Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. Photosynthetica. 2016;54(1):110-119. doi: <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0167-5>
11. Feng J, Lin Y, Yang Y, Shen Q, Huang J, Wang S, Zhu X, Li Z. Tolerance and bioaccumulation of combined copper, zinc, and cadmium in *Sesuvium portulacastrum*. Marine pollution bulletin. 2018;131(Part A):416-421. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.049>
12. Guigues S, Bravin MN, Garnier C, Doelsch E. Does specific parameterization of WHAM improve the prediction of copper competitive binding and toxicity on plant roots? Chemosphere. 2017;170:225-232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.017>
13. Handa T, Hirai T, Izumi N, Shun-ichi E, Shin-ichi T, Nagano K, Higashisaka K, Yoshioka Y, Tsutsumi Y. Identifying a size-specific hazard of silica nanoparticles after intravenous administration and its relationship to the other hazards that have negative correlations with the particle size in mice. Nanotechnology. 2017;28(13):135101. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6528/aa5d7c>
14. Kärkönen A, Kuchitsu K. Reactive oxygen species in cell wall metabolism and development in plants. Phytochemistry. 2015;112:22-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.09.016>
15. Karlsson HL, Gliga AR, Calléja F MGR, Gonçalves C SAG, Wallinder IO, Vrieling H, Fadeel B, Hendriks G. Mechanism-based genotoxicity screening of metal oxide nanoparticles using the ToxTracker panel of reporter cell lines. Particle and Fibre Toxicology. 2014;11:41:14 p. doi: <https://doi.org/10.1186/s12989-014-0041-9>
16. Kibriya G, Bagdi AK, Hajra A. Visible light induced tetramethylethylenediamine assisted formylation of imidazopyridines. Organic and Biomolecular Chemistry. 2018;16(18):3473-3478. doi: <http://dx.doi.org/10.1039/c8ob00532j>
17. Lei C, Sun Y, Tsang DCW, Lin D. Environmental transformations and ecological effects of iron-based nanoparticles. Environmental Pollution. 2018;232:10-30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.052>

18. Liu CG, Sun C, Jiang MX, Zhang LL, Sun MJ. Calculations of NO reduction with CO over a Cu₁/PMA single-atom catalyst: a study of surface oxygen species, active sites, and the reaction mechanism. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019;21(19):9975-9986. doi: <https://doi.org/10.1039/C9CP01092K>
19. Manna I, Bandyopadhyay M. Engineered nickel oxide nanoparticle causes substantial physicochemical perturbation in plants. *Frontiers in Chemistry*. 2017;5:Article 92:16 p. doi: <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00092>
20. Milewska-Hendel A, Zubko M, Stróż D, Kurczyńska EU. Effect of nanoparticles surface charge on the *Arabidopsis thaliana* (L.) roots development and their movement into the root cells and protoplasts. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(7):1650:22 p. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms20071650>
21. Mushinskiy AA, Aminova EV, Korotkova AM. Evaluation of tolerance of tubers *Solanum tuberosum* to silica nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(34):34559-34569. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3268-4>
22. Nair PMG, Chung IM. Impact of copper oxide nanoparticles exposure on *Arabidopsis thaliana* growth, root system development, root lignification, and molecular level changes. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int*. 2014;21(22):12709-12722. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3210-3>
23. Oukarroum A, Barhoumi L, Samadani M, Dewez D. Toxic effects of Nickel oxide bulk and nanoparticles on the aquatic plant *Lemna gibba* L. *Hindawi Publishing Corporation BioMed Research International*. 2015;2015:Article ID 501326:7 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/501326>
24. Park EJ, Jeong U, Yoon C, Kim Y. Comparison of distribution and toxicity of different types of zinc-based nanoparticles. *Environ Toxicol*. 2017;32(4):1363-1374. doi: <https://doi.org/10.1002/tox.22330>
25. Pramanik S, Pal S, Bysakh S, De G. Cu_xNi_{1-x} alloy nanoparticles embedded SiO₂ films: synthesis and structure. *Journal of Nanoparticles Research*. 2011;13(1):321-329. doi: <https://doi.org/10.1007/s11051-010-0033-0>
26. Rizwan M, Ali S., Qayyum MF, Ok YS, Adrees M, Ibrahim M, Zia-Ur-Rehman M, Farid M, Abbas F. Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: A critical review. *J Hazard Mater*. 2017;322(Part A):2-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.061>
27. Schubert J, Radeke C, Fery A, Chanana M. The role of pH, metal ions and their hydroxides in charge reversal of protein-coated nanoparticles. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019;21:11011-11018. doi: <https://doi.org/10.1039/C8CP05946B>
28. Sekine R, Marzouk ER, Khaksar M, Scheckel KG, Stegemeier JP, Lowry GV, Donner E, Lombi E. Aging of dissolved copper and copper-based nanoparticles in five different soils: Short-term Kinetics vs. Long-term Fate. *Journal of Environmental Quality*. 2017;46(6):1198-1205. doi: [10.2134/jeq2016.12.0485](https://doi.org/10.2134/jeq2016.12.0485)
29. Singh D, Kumar A. Investigating long-term effect of nanoparticles on growth of *Raphanus sativus* plants: a trans-generational study. *Ecotoxicology*. 2018;27(1):23-31. doi: <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1867-3>
30. Sirota TV. Standardization and regulation of the rate of the superoxide-generating reaction of adrenaline autoxidation used for evaluation of pro/antioxidant properties of various materials. *Biochemistry (Moscow), Supplement Series B: Biomedical Chemistry*. 2017;11(2):128-133. doi: <https://doi.org/10.1134/S1990750817020068>
31. Spielman-Sun E, Lombi E, Donner E, Avellan A, Etschmann B, Howard D, Lowry GV. Temporal evolution of copper distribution and speciation in roots of *Triticum aestivum* exposed to CuO, Cu(OH)₂, and CuS nanoparticles. *Environ Sci Technol*. 2018;52(17):9777-9784. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02111>
32. Su Y, Wu D, Xia H, Zhang C, Shi J, Wilkinson KJ, Xie B. Metallic nanoparticles induced antibiotic resistance genes attenuation of leachate culturable microbiota: The combined roles of growth

inhibition, ion dissolution and oxidative stress. Environmental International. 2019;128;407-416. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.007>

33. Tang Y, Xin H, Yang S, Guo M, Malkoske T, Yin D, Xia S. Environmental risks of ZnO nanoparticle exposure on *Microcystis aeruginosa*: Toxic effects and environmental feedback. Aquatic Toxicology. 2018;204:19-26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2018.08.010>

34. Theriault G, Nkongolo K. Nickel and Copper Toxicity and Plant Response Mechanisms in White Birch (*Betula papyrifera*). Bull Environ Contam Toxicol. 2016;97(2):171-176. doi: <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1842-3>

35. Tripathi DK., Shweta, Singh S, Singh S, Pandey R, Singh VP, Sharma NC, Prasad SM, Dubey NK, Chauhan DK. An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. Plant Physiology and Biochemistry. 2017;110:2-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.030>

36. Wada S, Cui S, Yoshida S. Reactive Oxygen Species (ROS) Generation Is Indispensable for Haustorium Formation of the Root Parasitic Plant *Striga hermonthica*. Frontiers in Plant Science. 2019;10:328: 12 p. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00328>

37. Watson JL, Fang T, Dimkpa CO, Britt DW, McLean JE, Jacobson A, Anderson AJ. The phytotoxicity of ZnO nanoparticles on wheat varies with soil properties. Biometals. 2015;28(1):101-112. doi: <https://doi.org/10.1007/s10534-014-9806-8>

38. Woźniak A, Malankowska A, Nowaczyk G, Grześkowiak BF, Tuśnio K, Słomski R, Zaleska-Medynska A, Jurga S. Size and shape-dependent cytotoxicity profile of gold nanoparticles for biomedical applications. Journal of Materials Science: Materials in Medicine. 2017;28:92:11 p. doi: <https://doi.org/10.1007/s10856-017-5902-y>

39. Wright M, Adams J, Yang K, McManus P, Jacobson A, Gade A, McLean J, Britt D, Anderson A. A root-colonizing pseudomonad lessens stress responses in wheat imposed by CuO nanoparticles. PLoS One. 2016;11(10):19 p. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164635>

40. Yang J, Shi S, Gong W, Du L, Sun J, Song S. The characterization of plant species using first-derivative fluorescence spectra. Luminescence. 2017;32(3):348-352. doi: <https://doi.org/10.1002/bio.3185>

Короткова Анастасия Михайловна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, г. Оренбург, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29; научный сотрудник Института биоэлементологии, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, e-mail: anastasiaporgv@mail.ru

Лебедев Святослав Валерьевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, г. Оренбург, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29; профессор кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, сот.: 8-912-345-87-38, e-mail: lsv74@list.ru

Кван Ольга Вилорьевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, г. Оренбург, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29; научный сотрудник экспериментально-биологической клиники Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, тел.: 8-912-345-87-38, e-mail: kwan111@yandex.ru

Атландерова Ксения Николаевна, аспирант, специалист Испытательного центра ЦКП, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 89228134865, e-mail: atlander-kn@mail.ru

Поступила в редакцию 7 июня 2019 г.; принята после решения редколлегии 17 июня 2019 г.; опубликована 28 июня 2019 г. / Received: 7 June 2019; Accepted: 17 June 2019; Published: 28 June 2019