

КОНЦЕНТРАЦИОННОЕ ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ И ИОНОВ НИКЕЛЯ НА ПРОРАСТАНИЕ СЕМЯН: ЭФФЕКТЫ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ НА РАННИХ СТАДИЯХ РАЗВИТИЯ ПРОРОСТКОВ ПШЕНИЦЫ

© 2024 г. А. В. Куровский¹, А. Ю. Станько^{2,*}, А. С. Коштункова²,
Ю. Е. Якимов¹, Б. Саратчандра³

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Томский политехнический университет, Томск, Россия

³Центральный племенной университет Андхра Прадеш, Визакхапатнам, Индия

*E-mail: stancko@tpu.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

После доработки 25.04.2024 г.

Принята к публикации 29.04.2024 г.

Изучено влияние никеля (30–1000 мг/л) наноразмерной (64 нм) и ионной форм на длину 48-часовых корней, девятисуточных побегов и корней на электропроводность и содержание NO_3^- в экстрактах тканей проростков пшеницы (*Triticum aestivum* L.). Концентрационно-зависимое угнетение корневой системы проростков ионами никеля характеризуется линейной зависимостью, в то время как для наночастиц характерна пороговая зависимость, на которую не оказывает воздействия размер агрегатов частиц в среде прорастания. Угнетающее действие наночастиц на корнеобразование значительно при концентрации 1000 мг/л, а эффекты последействия на ионный статус побегов отсутствуют во всем исследуемом интервале концентраций. Полученные результаты могут быть актуальны для разработки систем биотестирования токсичного воздействия наночастиц на растения.

DOI: 10.56304/S1992722324602672

ВВЕДЕНИЕ

Наночастицы (НЧ) никеля используются для создания магнитных запоминающих устройств, жидкостей, мишеней для доставки лекарств [1], катализа [2], создания газовых сенсоров [3], накопителей энергии [4], очистки промышленных стоков [5] и других применений. Благодаря высокому спросу объемы производства НЧ Ni растут, и создается все больше источников выделения потенциально опасных частиц в атмосферу [6].

Концентрация промышленных НЧ, выделяемых в природные воды, почвы и воздух, будет продолжать увеличиваться, что может привести к их накоплению в осадках, отложениях и грунтах и, соответственно, активному взаимодействию с растениями [7].

Металлические НЧ в почвенной среде могут агломерировать [8], образовывать стабильные коллоиды [9], растворяться [10, 11], подвергаться частичному окислению и деградации [12]. Поэтому влияние НЧ на растения во многом определяется их физическими и химическими свойствами, проявляемыми в конкретной окружающей среде, включая форму, состав, химию поверхности, за-

ряд, агрегационное состояние и концентрацию [13].

Известно, что Ni как микроэлемент минерального питания участвует в регуляции активности нитратредуктазы в растительных клетках [14] и входит в состав уреазы высших растений [15], регулирующей метаболизм мочевины и обеспечивающей физиологическое пробуждение и первичное корнеобразование. Относительно влияния наночастиц никеля на растения приводятся данные как об угнетении физиологических процессов [16, 17], так и о стимулирующих эффектах [18, 19], либо нейтральном действии [20].

Несмотря на наличие опубликованных работ по сравнительному исследованию токсичности НЧ и ионов, по-прежнему недостаточно данных для построения зависимостей “доза–эффект”, что может быть связано как с большим разнообразием частиц и их морфологии, так и с непониманием влияния концентрации НЧ на размер НЧ в суспензии, которые они образуют в водных средах, что особенно характерно для водорастворимых металлических НЧ [21, 22]. В работах используются методологические подходы, при которых оценивается перманентное воздействие НЧ на

Таблица 1. Состав питательного раствора Хьюитта

Макрокомпоненты раствора	Концентрация, мг-экв/л	Микрокомпоненты раствора	Концентрация, моль/л
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	8	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$\sim 10^{-6}$
KH_2PO_4	2	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\sim 10^{-6}$
$\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	2	$(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$	$\sim 10^{-6}$
KNO_3	2	MnSO_4	$\sim 10^{-5}$
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3	H_3BO_3	5×10^{-5}
NH_4NO_3	1	Хелат Fe	5×10^{-5}

растительный организм в лабораторных экспериментах. Но в реальных почвенных растворах чаще всего НЧ очень быстро агрегируют [23, 24]. Поэтому экспериментальная модель, включающая в себя стадии первичного (однократного) воздействия НЧ на растение, агрегацию НЧ (приводящую, возможно, к их инактивации) и развитие эффектов их последствие, является более адекватной реальным условиям.

Цель настоящей работы — определение концентрационного влияния НЧ и ионов никеля на корнеобразование при прорастании семян пшеницы, а также оценка последствие на морфометрические и физиологические показатели проростков на ранней стадии развития.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали НЧ Ni, полученные с помощью электрического взрыва никелевой проволоки в среде аргона [25] (ООО “Передовые порошковые технологии”, Томск, Россия). Фазовый состав НЧ определяли с помощью рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония, CuK_α -излучение, диапазон 2θ 10–70°). Морфологию определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss, Германия, углеродная подложка, ускоряющее напряжение 0.1–20 кВ). Для построения распределений частиц по размерам и расчета среднеарифметического размера (анализ не менее 100 частиц) использовали программу ImageJ [26]. Удельную поверхность определяли с помощью метода низкотемпературной адсорбции азота при –196°С по теории Брунауэра–Эммета–Тейлера (БЭТ) на анализаторе SorbiPrep (МЕТА, Россия). Перед измерением проводили десорбцию газов при 120°С в течение 45 мин. Полученное значение удельной поверхности использовали для вычисления условного среднеповерхностного размера частиц [11].

Коллоидные свойства НЧ Ni изучали с помощью лазерного анализатора Zetasizer Nano (Malvern, США, He–Ne-лазер, мощность 4 мВт, длина

волны лазера 633 нм) при $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$. Величину ζ -потенциала рассчитывали из значений электрофоретической подвижности частиц, измеряя скорость направленного движения частиц в электрическом поле. Распределение частиц по размерам получали с применением метода динамического рассеяния света (ДРС). Измерения проводили в углу обнаружения 173°, позиции в кювете автоматически определялись программным обеспечением Zetasizer Software. Измерения проводили не менее трех раз. Количественное распределение частиц использовали для расчета среднего размера частиц (d_{cp}) по формуле

$$d_{\text{cp}} = \sum d \frac{q(\%)}{100(\%)}, \quad (1)$$

где d — размер частиц в дисперсии, q — процентное содержание частиц с размером d .

Основой для приготовления суспензий НЧ и растворов являлся питательный раствор Хьюитта — универсальная и общепризнанная питательная среда для гидропонных систем и проведения физиологических экспериментов на растениях в условиях водной культуры (табл. 1, [27]). Растворы готовили с использованием дистиллированной воды (рН 6.5 ± 0.6 , проводимость 0.2 мкС), полученной на аквадистилляторе ДЭ-4 ТЗМОИ (Тюмень Медико, Россия) при $25 \pm 2^\circ\text{C}$. Для взвешивания частиц и веществ использовали аналитические весы ALC-110d4 (Acculab, Россия, точность ± 0.0001 г).

Для выявления специфических эффектов НЧ Ni их воздействие на биологический объект сравнивали с воздействием хлорида никеля ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, х.ч., ГОСТ 4038-79, CAS 7791-20-0). Концентрация никеля в суспензиях НЧ и растворах соли составляла 30–1000 мг/л. Контролем в экспериментах на растениях служил раствор Хьюитта с нулевой концентрацией НЧ Ni и хлорида никеля. Для оптимального диспергирования и придания максимальной гомогенности суспензии подвергали ультразвуковой обработке в течение часа в ультразвуковой ванне ГРАД 28-35 (Grade Technology, Россия, 50 Вт). Эту же процедуру проводили для

растворов солей и контроля. Суспензии использовали для анализа в течение 10 мин после их приготовления. Всю посуду стерилизовали в течение 24 ч в 2%-ном растворе азотной кислоты и промывали не менее трех раз в проточной воде.

В качестве тест-объекта использовали семена пшеницы яровой сорта Ирень (*Triticum aestivum* L.), предоставленные агрофирмой “ИП Орищенко” (Томский район, Россия, урожай 2017 г., вегетационный период — 70–80 дней, масса 1000 зерен — 32–40 г [28]). Семена хранили в продуваемых воздухом емкостях при $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ при влажности $40 \pm 5\%$.

В стеклянные чашки Петри диаметром 90 мм закладывали по 25 семян пшеницы на фильтровальную бумагу, смоченную питательным раствором (7 мл). Закрытые чашки Петри заворачивали в полиэтиленовую пленку (для предотвращения испарения влаги), помещали в суховоздушный термостат и инкубировали в течение 48 ч при $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$.

Затем из каждой чашки Петри отбирали по 10 близких по размеру проростков (исключение составляли образцы с концентрациями суспензий НЧ Ni 300 и 1000 мг/л, из которых брали на второй этап семена в стадии набухания и проклевывания, так как настоящих проростков там после проращивания в течение 48 ч еще не было) и помещали их в специальные вегетационные сосуды, состоящие из внешнего и внутреннего стакана с 10 отверстиями по периметру на дне. Большой стакан заполняли раствором Хьюитта так, чтобы отверстия во внутреннем стакане по периметру были заполнены раствором, но дно внутреннего стакана оставалось сухим. Между отверстиями поочередно выкладывали проростки пшеницы. На этом этапе проростки росли и развивались уже только на питательном растворе Хьюитта. Таким образом отслеживалось последствие изучаемых факторов. Подготовленные сосуды накрывали крышками и устанавливали в малогабаритную открытую частично гомеостатируемую фитокамеру. Малогабаритная фитокамера представляла собой металлическую площадку на лабораторном столе размером 1 м^2 , по периметру которой были установлены шесть эбонитовых светильников со светодиодными лампами мощностью 15 Вт (световой поток одной лампы — 1350 лм, общий световой поток установки — 8100 лм, цветовая температура ламп — 3000 К). Светоустановка снабжена механическим счетчиком времени, обеспечивающим постоянство режима день/ночь — 16/8 ч. Температура в помещении с установленной фитокамерой поддерживалась в пределах $20\text{--}22^\circ\text{C}$ посредством регулирования системы климат-контроля. Через двое суток убирали крышки и наращивали длину сосуда с помощью опорных пластиковых колпаков, служащих опорой для про-

ростков пшеницы, предотвращая распад пучка проросших побегов пшеницы [29].

Таким образом, время культивирования семян до формирования проростков в чашках Петри составило двое суток, последующее культивирование проростков в фитокамере — 7 сут, суммарное время культивирования от замачивания семян до забора растительной биомассы на анализ — 9 сут.

После каждого этапа культивирования (вторые и девятые сутки) были проведены измерения длины побегов и корней для каждого проростка пшеницы методом компьютерной морфометрии с использованием цифровой фотографии проростков, выложенных на темную ткань, и обработки посредством программы ImageJ. Для калибровки изображений использовали линейку с точностью 0.5 мм. В научных исследованиях ImageJ широко используется для компьютерной морфометрии в области физиологии и экотоксикологии растений [30–32].

После культивирования отделяли корни и побеги, высушивали в сушильном шкафу при 105°C в течение 12 ч и использовали для приготовления водных экстрактов. Навеску побегов ($\sim 0.5\text{ г}$) растирали пестиком в фарфоровой ступке и разводили в 200 раз (по сухой массе) дистиллированной водой. Далее переливали в бутылки из темного стекла, закрывали крышкой, встряхивали в течение 1 ч на шейкере при 150 об./мин и оставляли в помещении при комнатной температуре для экстракции. Спустя сутки в экстрактах определяли статус минерального питания проростков пшеницы путем измерения электропроводности вытяжек и содержания в тканях ионов NO_3^- .

Концентрацию ионов NO_3^- в водных экстрактах определяли потенциометрическим методом [33] с помощью ионометра ИПЛ-103 (Мульти-тест, Россия), снабженного ионоселективными электродами ЭЛИС-121NO3 (для измерения NO_3^-) и электродом сравнения ЭВЛ-1 МЗ.1 (НПП “Семико”, Россия). Предел обнаружения ионов NO_3^- составлял 10^{-4} моль/л. Электропроводность измеряли с помощью портативного кондуктометра Dist-3 (HANNA Instruments, США). Относительная ошибка измерений не превышала 2%.

Все биологические эксперименты повторяли 8–10 раз исходя из минимальных требований к объему выборок, анализируемых методами параметрической статистики. Анализ на нормальность всех исследуемых выборок, проведенный по модифицированному критерию Шапиро–Уилка [34], не противоречил применению методов параметрической статистики. Статистическая обработка включала в себя вычисление средних арифметических для всех показателей: стандартных отклонений, стандартных ошибок средних ариф-

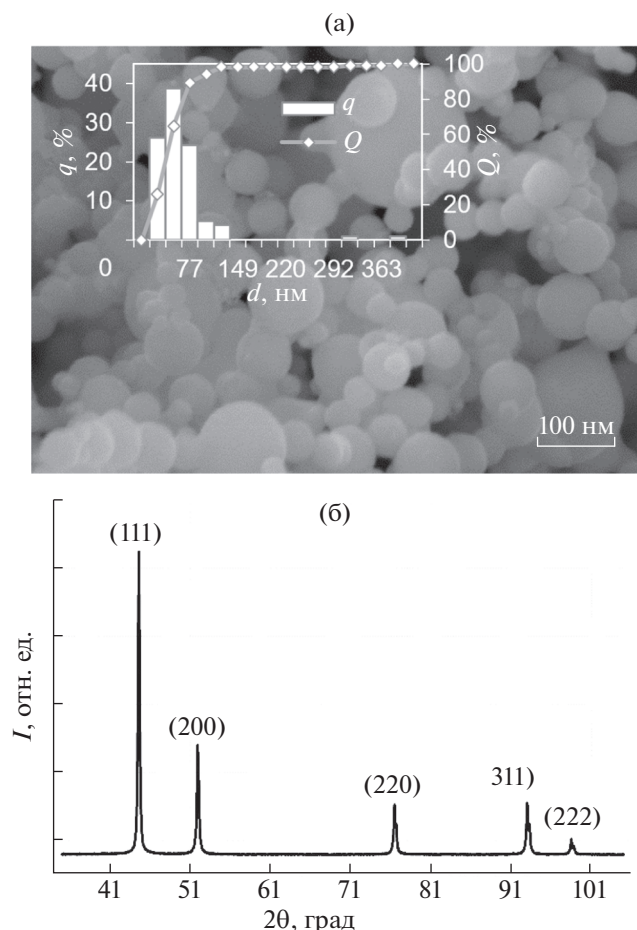


Рис. 1. СЭМ-изображение НЧ Ni, на вставке – распределение частиц по их размерам ($q, \%$ – накопительная частота, $Q, \%$ – кумулятивная частота) (а), рентгенограмма НЧ Ni (б).

метических, 95% доверительных интервалов для средних и критерия Стьюдента для независимых выборок. Звездочками отмечены отличия от контроля при $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно данным СЭМ НЧ Ni имеют условно сферическую форму (рис. 1а) и размеры в диапазоне 17–399 нм (рис. 1б). Среднеарифметический размер (64 ± 47 нм) несколько меньше, чем среднеповерхностный диаметр, рассчитанный из БЭТ-данных (102 нм, удельная поверхность – $6.61 \text{ м}^2/\text{г}$), что связано с агломерацией НЧ Ni в сухом виде.

Согласно данным РФА НЧ включают в состав Ni, для него характерны дифракционные пики при 44.4° , 51.8° , 76.3° , 92.9° и 98.4° , с которыми соотносятся межплоскостные расстояния (111), (200), (220), (311) и (222) [35].

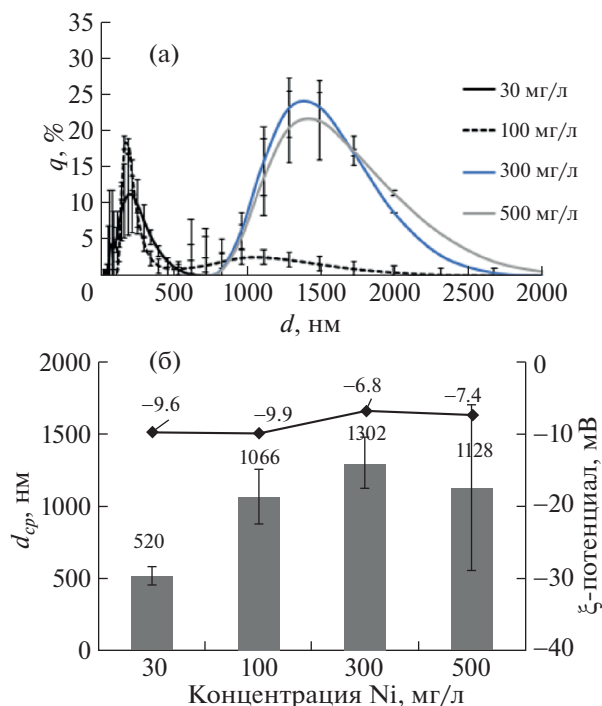


Рис. 2. ДРС-распределение частиц по размерам (d, nm), полученное для суспензий НЧ Ni различной концентрации в среде Хьюитта (а), зависимость среднего размера $d_{\text{ср}}$ (столбцы) и ζ -потенциала (линия с точками) НЧ Ni от их концентрации (б).

Коллоидные свойства НЧ Ni в среде прорастания количественно описываются распределением частиц по размерам (рис. 2а), средним размером частиц ($d_{\text{ср}}, \text{nm}$) и ζ -потенциалом (рис. 2б). При концентрации НЧ Ni 30 мг/л на кривой распределения частиц по размерам наблюдаются два пика, характерных для 68 (4%) и 190 нм (12%). При концентрации 100 мг/л появляются крупные агрегаты: на ДРС-распределении – два пика при 164 (18%) и 955 нм (3%). При концентрации >100 мг/л распределение имеет мономодальный характер (1484 нм), высота пика составляет 24 и 22% при концентрации НЧ Ni 300 и 500 мг/л соответственно (рис. 2а). Усредненные данные подтверждают, что увеличение концентрации НЧ Ni от 30 до 300 мг/л приводит к увеличению размера агрегатов от 520 до 1300 нм, а в более концентрированных суспензиях размер не меняется (рис. 2б). При этом образующиеся суспензии характеризуются низкой коллоидной стабильностью, слабо зависящей от концентрации Ni: в среднем ζ -потенциал составляет -8.5 мВ (рис. 2б). Низкое значение заряда свидетельствует о том, что в среде прорастания семян НЧ Ni могут продолжать агломерировать.

Добавление НЧ Ni в среду прорастания в концентрациях 30–300 мг/л не оказало статистически значимого влияния на длину 48-часовых кор-

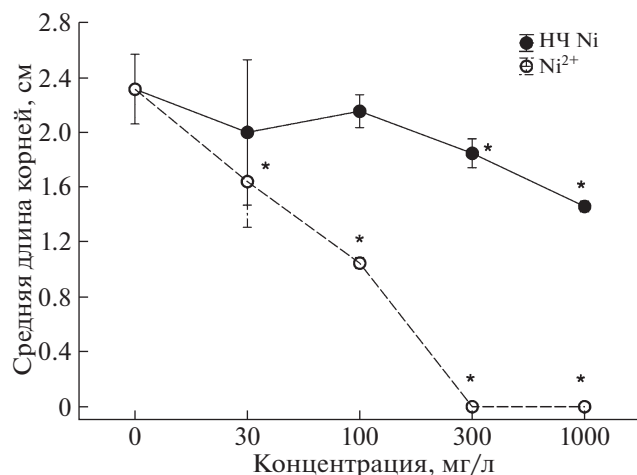


Рис. 3. Зависимость длины образующихся двухсуточных корней пшеницы сорта Ирень от концентрации суспензии НЧ Ni и ионов Ni²⁺ в растворе NiCl₂.

ней (рис. 3), длину девятисуточных корней (рис. 4а) и побегов (рис. 4б). Однако при концентрации НЧ 1000 мг/л длина 48-часового корня уменьшилась на 37% (рис. 3) по сравнению с контролем, а длины девятисуточных корней и побегов — на 35 (рис. 4а) и 10% (рис. 4б) соответственно, что подтверждает данные об ингибирующем действии суспензии НЧ Ni с содержанием ≥ 725 мг/л в экспериментах с семенами пшеницы (*Triticum vulgare* L.) [16].

Экспозиция семян в среде с добавлением Ni²⁺ привела к явному угнетению корнеобразования: по сравнению с контролем средняя длина 48-часовых корней уменьшилась на 30 и 55% при концентрации ионов 30 и 100 мг/л соответственно. Семена, замоченные в растворах Ni²⁺ с содержанием 300 и 1000 мг/л, набухли, но не проросли, поэтому на диаграмме для этих концентраций показаны нулевые значения для длины корней (рис. 3). Последствие добавления Ni²⁺ в среду прорастания семян выражалось в достоверном снижении длины побегов и корней при возрастании концентрации Ni²⁺ в питательном растворе: так, при концентрации Ni²⁺ 30, 100 и 300 мг/л уменьшение длины девятисуточных побегов по сравнению с контролем составило 8, 13 и 68% соответственно, снижение длины девятисуточных корней — 15.32 и 76%. При концентрации Ni²⁺ 1000 мг/л прорастание семян полностью подавлялось (рис. 3), и побеги не образовывались (рис. 4).

Одним из главных физиологических показателей, связанных с продукционными процессами у растений, является содержание в тканях главных элементов питания, в частности нитратного азота. Нитрат-ионы вносят существенный вклад в суммарное содержание ионов в растительных

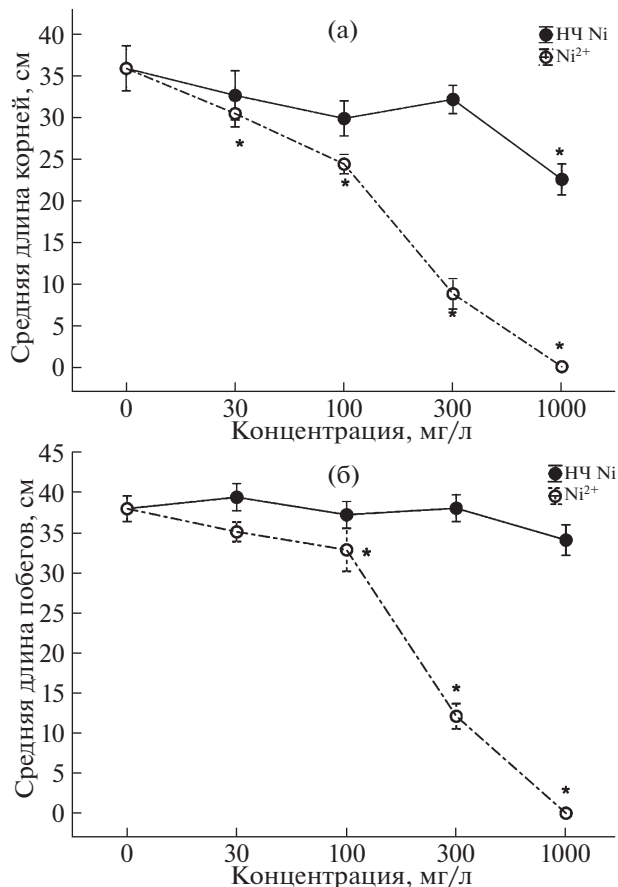


Рис. 4. Эффекты последствия суспензий НЧ Ni и растворов NiCl₂ в широком концентрационном диапазоне на суммарную длину образующихся корней (а) и побегов (б) пшеницы сорта Ирень.

тканях, а значит — в их электропроводность. Установлено, что независимо от концентрации НЧ Ni их добавление в среду прорастания на этапе замачивания семян не приводит к статистически значимому отклонению в электропроводности (рис. 5а) и концентрации NO₃⁻ (рис. 5б), в то время как замачивание в растворе Ni²⁺ приводило к значимому снижению параметров, которые уменьшались с увеличением содержания Ni²⁺: например при концентрации Ni²⁺ 30, 100 и 300 мг/л электропроводность в тканях побегов уменьшилась на 15, 30 и 45% соответственно по сравнению с контролем (рис. 5а).

Таким образом, при концентрации 30 мг/л различия в эффектах последствий никеля в наноразмерной и ионной форме статистически незначимы: например длина девятидневного корня и побега отличается на 4–9 (рис. 4а) и 8–15% (рис. 4б) соответственно при замачивании в среде с НЧ или ионами Ni²⁺. Однако при содержании Ni²⁺ ≥ 100 мг/л происходит подавление морфометрических параметров проростков на 76–100%

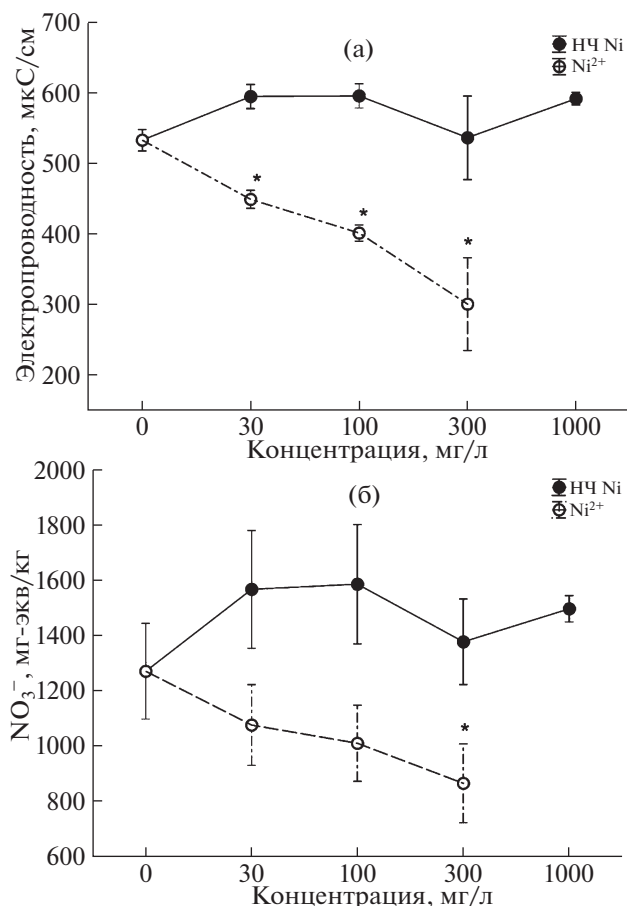


Рис. 5. Эффекты последействия суспензий НЧ Ni и растворов NiCl₂ в широком концентрационном диапазоне на электропроводность (а) и содержание NO₃⁻ (б) в тканях побегов пшеницы сорта Ирень.

для корней и на 13–68% для побегов. При этом чем выше содержание никеля, тем более выражено подавляющее действие ионов по сравнению с НЧ. Например, различия в длине образовавшихся девятидневных побегов у проростков составили 11, 68 и 100% при концентрации Ni²⁺ 100, 300 и 1000 мг/л соответственно (рис. 4б).

Ингибирующее действие концентрационного влияния Ni²⁺ на корни двухсуточных проростков пшеницы (рис. 3) описывается экспоненциальным уравнением

$$y = 0.77 \cdot e^{-0.008x}, \quad (2)$$

где y — длина корней, x — концентрация Ni²⁺ в растворе.

Это еще раз подтверждает, что токсичность соединений никеля увеличивается с ростом их содержания. Известно, что НЧ Ni растворяются в биологических жидкостях, и степень их растворения при суточной экспозиции может достигать 84 мас. % [11]. Поэтому можно предположить, что чем выше содержание НЧ в системе, тем больше растворимого никеля будет в среде прорастания и тем явнее будет его ингибирующее действие. Однако обнаружено, что в отличие от ионов присутствие НЧ Ni с концентрацией 30–300 мг/л в среде прорастания не влияет на морфологическое развитие корня. По-видимому, усиленная агрегация, характерная для суспензий НЧ Ni (рис. 2), приводит к значительному уменьшению поверхности, участвующей в растворении, а образовавшийся никель переходит в нерастворимые формы в водных солевых растворах, как было показано на примере НЧ Si размером 50 нм [36]. О низкой степени растворимости НЧ свидетельствует незначительное изменение (6%) электропроводности раствора Хьюитта при добавлении НЧ Ni по сравнению с контролем, в то время как после добавления Ni²⁺ электропроводность увеличилась в 2 раза (табл. 2). Можно сказать, что исследуемые НЧ Ni являются химически инертными, а их низкая коллоидная устойчивость приводит к образованию крупных агрегатов, не способных преодолевать мембранные барьеры корневых клеток и попадать в растения.

Увеличение концентрации НЧ от 30 до 300 мг/л привело к росту их размера, но не повлияло на биологические свойства. Однако при дальнейшем увеличении концентрации от 300 до 1000 мг/л средний размер агрегатов не меняется (~1200 нм, рис. 2б), но происходит усиление токсичности. С учетом полученных данных можно сделать вывод, что не коллоидные свойства, характерные для НЧ Ni в указанном диапазоне концентраций, а концентрация частиц оказывает влияние на их биологические свойства. При этом если для Ni²⁺ зависимость “доза–эффект”, связывающая получаемую дозу вещества с распространенностью того или иного неблагоприятного эффекта, имеет линейный характер (как для большинства химических веществ), то для НЧ Ni характерна пороговая зависимость [37]. При этом ингибирующее действие хлорида никеля на исследуемые морфологические показатели, вероятно, связано

Таблица 2. Изменение электропроводности среды раствора Хьюитта после добавления НЧ Ni и Ni²⁺

Раствор/суспензия	Раствор Хьюитта	НЧ Ni	Ni ²⁺
Электропроводность, мС см ⁻¹	1621.2 ± 164.7	1731 ± 213.08	3531 ± 360.6

Примечание. Время выдерживания — четыре дня, концентрация никеля 500 мг/л.

именно с влиянием ионов никеля, так как к хлорид-аниону разные сорта пшеницы показывают толерантность даже при концентрациях, на порядок больших, чем концентрации, используемые в [38]. Отсутствие влияния твердых НЧ на развитие корней проростков пшеницы можно объяснить как слабым зарядом НЧ, так и присутствием крупных агрегатов частиц по сравнению с ионами, что, вероятно, препятствует проникновению НЧ Ni в клетки корней проростков пшеницы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано влияние концентрации Ni (30–1000 мг/л) в наноразмерной (64 нм) и ионной (Ni^{2+}) форме при их добавлении в среду прорастания семян на этапе их замачивания на морфометрические (длину двухсуточных корней и девятисуточных побегов и корней) и физиологические свойства (электропроводность и содержание NO_3^- в экстрактах тканей) проростков пшеницы сорта Ирень *Triticum aestivum* L.

Установлено, что концентрационное влияние ионов Ni^{2+} на угнетение корневой системы проростков характеризуется линейной зависимостью, в то время как для НЧ характерна пороговая зависимость, на которую не влияет размер агрегатов частиц в среде прорастания. Так, подавляющее действие НЧ Ni на развитие корней статистически заметно при концентрации 1000 мг/л, а эффекты последствия на свойства экстрактов побегов отсутствуют во всем интервале исследуемых концентраций. При этом влияние НЧ Ni на растения ограничивается их малой растворимостью и низкой коллоидной устойчивостью в среде прорастания.

Обнаружено, что в широком диапазоне концентраций НЧ Ni не оказывали значимых эффектов на исследуемые показатели проростков пшеницы, в то время как ионы Ni^{2+} проявляли угнетающее воздействие на растения начиная с наименьшей концентрации. Для НЧ показана взаимосвязь биологических свойств со степенью агрегации и поверхностным зарядом в среде прорастания.

Полученные результаты могут быть актуальны для разработки систем биотестирования токсичного воздействия НЧ металлов на растения и поиска адекватных растительных тест-объектов. Выявленные концентрационные зависимости полезны для фундаментальных исследований, посвященных изучению закономерностей взаимодействия металлических НЧ с живыми организмами, в частности с растениями.

Авторы выражают благодарность Ю.В. Папиной за помощь в проведении экспериментов на лазерном дифрактометре в НИТУ «МИСИ».

Анализ удельной поверхности, РФА и культивацию проростков проводили с применением оборудования ЦКП НОИЦ «Нанотехнологии и наноматериалы» Томского политехнического университета. СЭМ-анализ проводили в НОИЦ «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lv Y., Shahri E.E., Mahmoudi A. et al. // Inorg. Chem. Commun. 2023. V. 152. P. 110650. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110650>
2. Yi S., Babadagli T., Li H.A. // Proc. Int. Petroleum Technology Conf. Bangkok, Thailand, November 2016. <https://doi.org/10.2523/IPTC-18876-MS>
3. Srinivasa Ch., Kumar E.R., Tirupanyam B.V. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2020. V. 502. P. 166534. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166534>
4. Zhu D., Xia C., Yang Z. et al. // Electrochim. Acta. 2020. V. 334. P. 135591. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135591>
5. Zhang G., Li J., Zhang G., Zhao L. // Adv. Mater. Sci. Eng. 2015. P. 973648. <https://doi.org/10.1155/2015/973648>
6. Hewitt R.E., Chappell H.F., Powell J.J. // Curr. Opin. Toxicol. 2020. V. 19. P. 93. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2020.01.006>
7. Shrivastava M., Srivastava A., Gandhi S. et al. // Environ. Nanotechnol. Monit. Manag. 2019. V. 11. P. 100218. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100218>
8. Zehlike L., Peters A., Ellerbrock R.H. et al. // Sci. Total Environ. 2019. V. 688. P. 288. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.020>
9. Fatehah M.O., Aziz H.A., Stoll S. // J. Colloid Sci. Biotechnol. 2014. V. 3. P. 75. <https://doi.org/10.1166/jcsb.2014.1072>
10. Waalewijn-Kool P.L., Ortiz M.D., van Straalen N.M., van Gestel C.A.M. // Environ. Pollut. 2013. V. 178. P. 59. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.003>
11. Abzhanova D., Godymchuk A., Gusev A., Kuznetsov D. // Eur. J. Nanom. 2016. V. 8. P. 203. <https://doi.org/10.1515/ejnm-2016-0021>
12. Han B., Zhang M., Zhao D. // Environ. Pollut. 2017. V. 223. P. 238. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.018>
13. Turan N.B., Erkan H.S., Engin G.O., Bilgili M.S. // Process Saf. Environ. 2019. V. 130. P. 238. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.08.014>
14. Битюцкий Н.П. Минеральное питание растений. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2014. 548 с.
15. Shahzad B., Tanveer M., Rehman A. et al. // Plant Physiol. Biochem. 2018. V. 132. P. 641. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.10.014>
16. Короткова А.М., Лебедев С.В. // Агробиология. 2017. Т. 1. С. 72.

17. *Tombuloglu H., Slimani Y., Tombuloglu G.* // Environ. Nanotechnol. Monit. Manag. 2019. V. 11. P. 10223. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100223>
18. *Chahardoli A., Karimi N., Ma X., Qalekhani F.* // Sci. Rep. 2020. V. 10. P. 3847. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60841-6>
19. *Miri A., Shakib E.S., Ebrahimi O. et al.* // Orient. J. Chem. 2017. V. 33. P. 1297. <https://doi.org/10.13005/ojc/330329>
20. *Зоти́кова А.П., Астафу́рова Т.П.* // Агробиология. 2018. Т. 53. № 3. С. 578.
21. *Misra S.K., Dybowska A., Berhanu D. et al.* // Sci. Total Environ. 2012. V. 438. P. 225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.066>
22. *Odzak N., Kistler D., Behra R., Sigg L.* // Environ. Pollut. 2014. V. 191. P. 132. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.04.010>
23. *Hadioui M., Merdzan V., Wilkinson K.J.* // Environ. Sci. Technol. 2015. V. 49. P. 6141. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00681>
24. *Qiu Y., Mu Z., Wang N. et al.* // Sci. Total Environ. 2020. V. 731. P. 139215. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139215>
25. *Kim W., Park J., Suh C. et al.* // Mater. Lett. 2007. V. 61. P. 4259. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.01.106>
26. ImageJ // RSB Home Page. Electronic data. S. 1., 2019. <https://imagej.nih.gov/ij>
27. *Hewitt E.J.* Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. Buks: Commonwealth Agricultural Bureaux, 1966. 547 p.
28. *Petrochenko K., Kurovsky A., Godymchuk A. et al.* // Bulg. J. Agric. Sci. 2019. V. 25. P. 646.
29. *Изерская Л.А., Куровский А.В., Горина Н.В. и др.* Гуминовые вещества в водах бассейна реки Улу-Юл. Эколого-физиологическое влияние на растения. Вып. 1: коллективная монография. Томск: ЦНТИ, 2019. 102 с.
30. *Bellino A., Lofrano G., Carotenuto M. et al.* // Ecotoxic. Environ. Safe. 2018. V. 148. P. 35. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.006>
31. *Zhu D., Mei Y., Shi Y. et al.* // J. Plant Physiol. 2016. V. 204. P. 92. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.07.015>
32. *Danquah A., de Zélicourt A., Boudsocq M. et al.* // Plant J. 2015. V. 82. P. 232. <https://doi.org/10.1111/tpj.12808>
33. *Moore E.V.* // Ion-selective electrodes / Ed. Durst R.A. Washington: National Bureau of Standards (U.S.) Special Publication, 1969. P. 215.
34. *Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б.* // Метрология. 2005. № 2. С. 3.
35. *Srimara P., Chevaprak T., Kumnorkaew P. et al.* // Mater. Today-Proc. 2020. V. 23. P. 720. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.264>
36. *Godymchuk A.Yu., Savelev G.G., Gorbatenko D.V.* // Russ. J. Gen. Chem. 2010. V. 80. P. 881. <https://doi.org/10.1134/S1070363210050026>
37. *Лыцков В.Н., Мурзин Н.В.* Проблемы безопасности нанотехнологий. М.: МИФИ, 2007. 70 с.
38. *Bhutta W.M., Hanif M.* // Communications in Soil Sci. and Plant Analysis. 2008. V. 39. P. 2785. <https://doi.org/10.1080/00103620802432683>