

НАНОМАТЕРИАЛЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 57.082.261+620.3

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА И ОКСИДА МЕДИ В КАЧЕСТВЕ СТИМУЛЯТОРОВ РОСТА РАСТЕНИЙ ИВЫ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ КЛОНАЛЬНОГО МИКРОРАЗМНОЖЕНИЯ

© 2024 г. С. П. Чеботарева^{1,*}, О. В. Захарова^{1,2}, А. А. Гусев^{1,2}, Г. В. Григорьев¹,
П. А. Баранчиков¹, Н. С. Стрекалова¹

¹Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, Тамбов, Россия

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

*E-mail: sweta-chebotarjova@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.05.2024 г.

После доработки 30.08.2024 г.

Принята к публикации 30.08.2024 г.

В настоящее время актуальна разработка технологий, позволяющих улучшать эффективность существующих методик клонального микроразмножения. Описаны результаты исследования воздействия наночастиц (НЧ) Ag сферической формы (20–40 нм) и CuO хлопьевидной морфологии (диаметр 50 до 200 нм, толщина 10–20 нм) на растения ивы ломкой и оценка их биологических эффектов с использованием метода клонального микроразмножения. На этапе мультипликации НЧ Ag и CuO в концентрации 3 мкг/л увеличили количество выживших и стерильных микроклонов до 100%, высота побегов в среднем была на 27% выше контроля под действием НЧ Ag в концентрации 1.5 и 3 мкг/л. На этапе укоренения отмечено повышение числа укоренившихся проростков под действием Ag. В экспериментах *in vivo* проростки ивы ломкой, обрабатываемые раствором Ag в концентрации 3 мкг/л, имели наилучшие показатели устойчивости к нестерильным условиям теплицы. Количество выживших микроклонов было на 7% выше контрольных значений, число адаптированных растений – на 27%. Высота растений через три недели составила 5.3 см, тогда как в контроле данный показатель был на уровне 4.8 см. Показаны перспективы использования исследованных НЧ для стимуляции роста и развития растений ивы в условиях *in vitro* и *in vivo*.

DOI: 10.56304/S1992722324601964

ВВЕДЕНИЕ

Получение качественного посадочного материала для искусственного лесовосстановления и защитного лесоразведения в достаточном количестве является для регионов РФ актуальнейшей задачей. Ежегодное сокращение лесов влечет за собой исчезновение некоторых видов растений, животных, образование пустынь и т.п. [1]. Искусственное лесовосстановление имеет ряд преимуществ по сравнению с естественным прежде всего из-за высоких темпов восстановления [2]. Клональное микроразмножение *in vitro* активно используется в производстве здорового посадочного материала [3]. Благодаря данному методу можно получать генетически однотипный материал, свободный от фитопатогенов. Кроме того, появляется возможность получать вегетативно неразмножаемые или трудноразмножаемые растения; ускорять переход от ювенильной к репродуктивной фазе развития [1]. Методы культивирования тканей растений позволяют осуществлять тщательный мониторинг и управление ростом и раз-

витием растений, а наличие контролируемой среды *in vitro* позволяет анализировать конкретные источники вариаций и манипулировать ростом на уровне органов, тканей и клеток [4].

Несмотря на большое количество преимуществ, остается актуальной разработка технологий, позволяющих улучшать эффективность клонального микроразмножения путем увеличения скорости роста микроклонов *in vitro* и повышения выживаемости регенерантов *in vivo*.

Нанобиотехнологический подход, основанный на применении наночастиц (НЧ) и наноматериалов, является передовым способом повышения выживаемости микроклональных побегов. За счет проявления своих специфических физико-химических характеристик НЧ могут влиять на активацию защитных свойств растений, их рост и развитие, а также предотвращать инфекции растений [5–10].

В [11, 12] доказана высокая эффективность различных металлических НЧ, в том числе Ag, CuO, Zn, в отношении широкого спектра микро-

организмов. Кроме того, НЧ могут способствовать стимуляции роста *in vitro* и развитию культур клеток растений [3]. Показана положительная роль НЧ Ag, TiO₂ и ZnO в индукции каллуса, органогенезе, соматическом эмбриогенезе, соматоклональной изменчивости, генетической трансформации и продукции вторичных метаболитов [13]. Хорошо известно, что НЧ Ag обладают высокой эффективностью против целого ряда бактерий [14], грибов [15] и вирусов [16], в том числе фитопатогенных [17, 18]. Двумерные наноматериалы (например, графен и его производные) [19, 20] представляют собой сверхтонкие пластинчатые структуры, которые также могут благотворно влиять на растения благодаря своим противомикробным свойствам. Для стимулирования роста и защиты растений может быть эффективно применение оксида графена [21].

В то же время отмечается токсическое действие НЧ на растения. Воздействие НЧ Ag может снизить прорастание семян, замедлить рост проростков. Путь фитотоксичности частично изучен. Накопление Ag в корнях/листьях запускает защитный механизм на клеточном и тканевом уровнях, который изменяет метаболизм, антиоксидантную активность и связанную с этим протеомную экспрессию. Ответная реакция организма на воздействие НЧ Ag включает генерацию активных форм кислорода (АФК), изменение активности супероксиддисмутазы, уровня H₂O₂, содержания общего хлорофилла, пролина, каротиноидов и др. Указанные выше процессы приводят к аномальным морфологическим изменениям, подавлению фотосинтеза и другим эффектам [22]. Применение углеродных нанотрубок (УНТ) вызвало увеличение биомассы корней растений томата. Кроме того, УНТ индуцировали увеличение содержания хлорофиллов, неферментативных антиоксидантов (аскорбиновой кислоты, глутатиона, фенолов и флавоноидов) и активности ферментов [23]. Однако согласно [24] УНТ оказали негативное влияние на биомассу побегов и корней рассады томатов. Токсическое действие было более выраженным по мере увеличения концентрации наноматериала (до 1000 мг/л). Отметим, что исследования по оценке влияния НЧ на лесные древесные культуры при микроклонировании представлены в довольно малом объеме.

В [25] показано, что на этапе введения эксплантов березы пушистой в культуру *in vitro* и при переносе микрорастений в теплицы НЧ CuO и Ag способствовали снижению общей инфекционной нагрузки, повышению адаптационного потенциала и улучшению основных показателей роста и развития растений березы пушистой. Однако на этапе мультипликации и укоренения наблюдались снижение жизнеспособности и ухудшение внешнего вида березы пушистой под

действием НЧ CuO и Ag [25]. В [26] также показано разнонаправленное действие НЧ CuO на микрорклоны гибрида тополь×осина. Отмечено, что НЧ проявляют сильную стерилизующую активность, повышают выживаемость регенерантов и усиливают ризогенез в растениях. Однако на этапе мультипликации наблюдалось уменьшение высоты побегов, толщины листовой пластинки и диаметра стебля [26]. Фитопатогенное действие НЧ CuO и Ag отмечено в отношении клонов тополя *in vitro*, где НЧ проявляли ингибирующее действие на развитие *Alternaria alternata* [27].

Также были проведены исследования по использованию углеродных наноматериалов в клональном микроразмножении [21, 26, 28]. Показано, что раствор оксида графена в концентрации 1.5 мкг/л оказывал благоприятное влияние на развитие листьев и адаптируемость березы пушистой при переносе регенерантов в нестерильные тепличные условия. На этом же этапе отмечено, что суспензия наноматериала стимулировала прирост высоты растений гибрида тополь белый × осина, но также увеличивала количество увядших листьев. При повышении концентрации наноматериала до 3 мкг/л наблюдалось снижение выживаемости, высоты и адаптированности растений березы пушистой и гибрида тополь белый × осина. Перспективно использование и других двумерных наноматериалов в клональном микроразмножении. Отмечено, что наноленты TiS₃ эффективны в качестве стерилизующего, стимулирующего агента на начальной стадии роста, а также агента, активирующего ризогенез, на стадии укоренения у микрорклонов гибрида тополь×осина и березы пушистой [29].

Подобное разнонаправленное действие НЧ на тест-объекты объясняется тем, что токсичность НЧ и оказываемый ими эффект на живые организмы зависят от ряда факторов, среди которых наиболее важными являются размер частиц, кристаллическая структура, а также свойства поверхности [30].

Ива ломкая играет значимую роль в лесных экосистемах как вид, способствующий лесовосстановлению, улучшению почвенных свойств, поддержанию биоразнообразия и обеспечиванию питательного и медоносного ресурса для животных и насекомых. При этом исследований, показывающих влияние НЧ на иву ломкую в культуре тканей, еще не проводилось. Таким образом, цель данного исследования — изучение влияния НЧ Ag и CuO на рост и развитие проростков ивы ломкой в условиях *in vitro*, а также при переносе их в нестерильные условия теплицы на этапе адаптации.

МЕТОДЫ

Используемые в работе НЧ CuO были получены методом химического осаждения из раствора $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (ч.д.а.) (Sigma-Aldrich, США) [31]. НЧ Ag получены методом электрического взрыва металлических проводников (ООО “Передовые порошковые технологии”, Томск, Россия).

Перед началом работы был проведен анализ морфологии и размеров частиц при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе Merlin (Carl Zeiss, Германия). Элементный анализ НЧ осуществляли методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL NeoScope JCM-7000 SEM (Nikon Metrology, Германия).

Перед внесением НЧ в питательную среду готовили их водные дисперсии. Для этого при помощи аналитических весов ViBRA HT (Shinko Denshi, Япония) отвешивали навеску нанопорошка 0.3 г и всыпали ее в предварительно приготовленную емкость объемом 150 мл, содержащую 100 мл стерильной дистиллированной воды. Емкость плотно закрывали завинчивающейся крышкой и обрабатывали ультразвуком (мощность ультразвука — 180 Вт, объем ванны — 4 л) (ВБС-41Н, Вилитек, Москва, Россия) в течение 10 мин. Полученную суспензию анализировали на стабильность путем измерения ζ -потенциала на приборе ZetasizerNanoZS (Malvern, Великобритания).

Для проведения исследований использовали питательную среду Мурасиге—Скуга (МС) (Podlupná 2007). Итоговая концентрация НЧ в питательных средах составила 1.5, 3, 15 мкг/л. Введение НЧ в экспериментальные среды осуществляли на этапе мультипликации, укоренения и адаптации.

В качестве тест-объекта использовали иву ломкую (*Salix fragilis*). Для введения в культуру *in vitro* использовали черенки растений с верхушечными и пазушными почками. Черенки обрабатывали поверхностно-активным веществом (Tween-20), промывали дистиллированной водой. Подготовленные образцы разрезали на сегменты и обрабатывали 5%-ным гипохлоритом натрия (NaOCl), а затем промывали дистиллированной водой. Стерильные побеги разрезали в условиях ламинарного бокса на экспланты длиной 1.5–2 см, каждый с одной пазушной почкой, и переносили в питательную среду МС.

Условия культивирования: температура $24 \pm 2^\circ\text{C}$, 16-часовой фотопериод с интенсивностью освещения 5000 лк, относительная влажность воздуха — 70%.

Для этапа мультипликации сформировавшиеся микропобеги отделяли и пересаживали на питательную среду Woody plant medium (WPM) (Lloyd and McCown 1980), дополненную гормонами 0.2 мг/л БАП + 0.1 мг/л ИУК + 0.3 мг/л ГК и НЧ в концентрациях 1.5, 3, 15 мкг/л.

На этапе укоренения микропроростки высаживали на питательную среду 1/2 WPM, содержащую нанопрепараты в концентрации 3 мкг/л, так как при данной концентрации установлены наилучшие результаты влияния НЧ на проростки на стадии мультипликации.

При пересадке в нестерильные условия отбирали образцы с четырьмя—пятью листьями и корневой системой, имеющей длину не менее 2 см. Субстрат для пересадки состоял из торфа с нейтральным pH и перлита 3 : 1. Обработку осуществляли растворами НЧ в концентрации 3 мкг/л. Контролем выступали дистиллированная вода и ростовой стимулятор Эпин (АНО “НЭСТ М”, Москва, Россия).

Статистическая обработка экспериментальных данных включала в себя оценку среднего арифметического (M), среднеквадратичного отклонения (S). Достоверность различий между качественными показателями сравниваемых групп проводили с использованием критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеризация наночастиц

Проведенное электронно-микроскопическое исследование показало, что в ходе синтеза были получены частицы CuO хлопьевидной структуры, диаметр хлопьев составлял от 50 до 200 нм при толщине 10–20 нм (рис. 1а). Средний диаметр НЧ Ag — 20–40 нм (рис. 1б).

Элементный анализ НЧ CuO показал, что исследуемый порошок является оксидом меди без каких-либо примесей (рис. 2а). Для НЧ Ag также показана высокая чистота образца (рис. 2б).

ζ -потенциал НЧ CuO в растворе составил — 36.6 мВ, что свидетельствует о достаточно высокой стабильности водной дисперсии (рис. 3а). В случае с Ag показатель составил — 42.2 мВ (рис. 3б).

Клональное микроразмножение

Этап мультипликации. Через 2 мес культивирования получили микроклоны без каких-либо аномалий морфологии, которые высадили в питательные среды, содержащие только НЧ, и среды, содержащие НЧ и гормоны. На этапе мультипликации отмечено положительное влияние НЧ на микроклоны ивы ломкой (рис. 4). Так, при добавлении НЧ в концентрации 3 мкг/л была до-

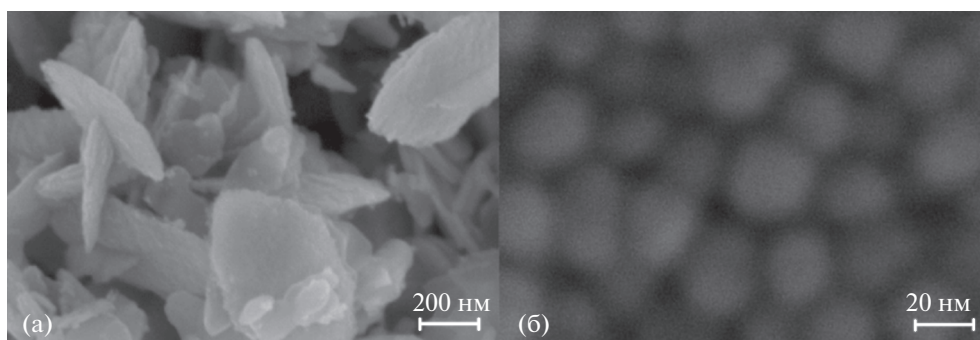


Рис. 1. СЭМ-изображения образца НЧ CuO (а) и Ag (б).

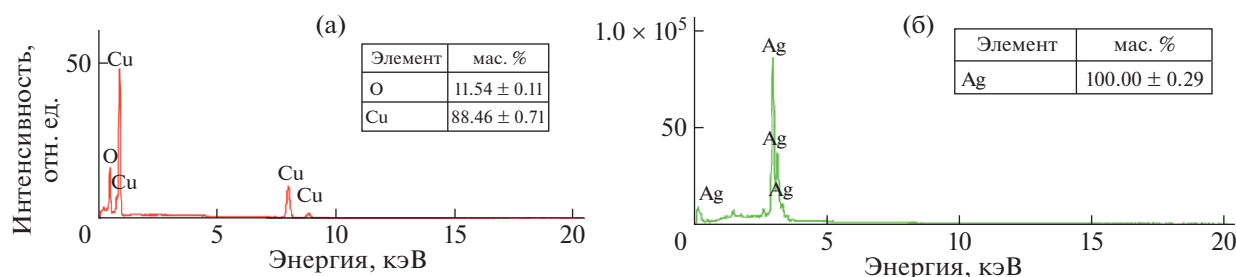
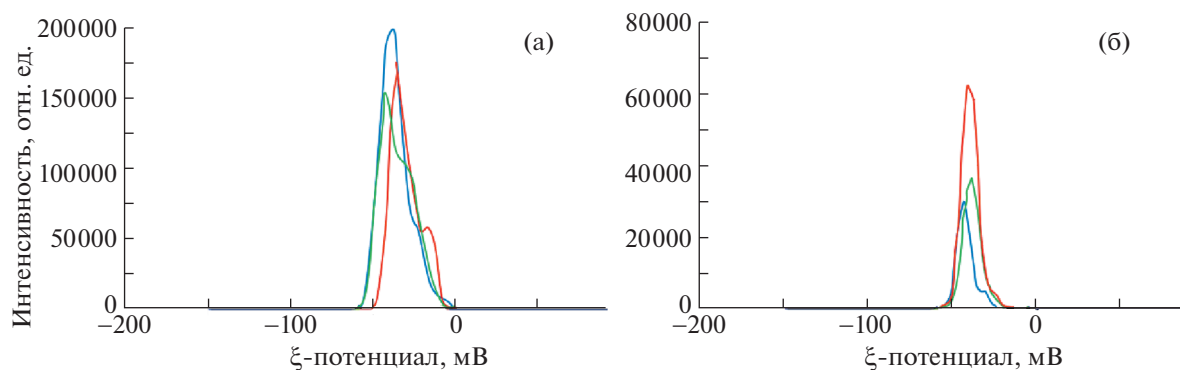


Рис. 2. Элементный анализ НЧ CuO (а) и Ag (б).


 Рис. 3. Показатель ζ -потенциала суспензий НЧ CuO (а) и Ag (б).

стигнута 100%-ная выживаемость стерильных микроклонов. При концентрации НЧ CuO и Ag 1.5 и 3 мкг/л соответственно выявлено увеличение высоты побегов на 27% относительно контрольной группы, количество листьев также выросло. Однако при увеличении концентрации НЧ до 15 мкг/л происходило подавление исследуемых показателей. Отмечено уменьшение числа выживших микроклонов на 16% и высоты побегов на 64%, дополнительные побеги отсутствовали. В то же время при максимальной концентра-

ции всех НЧ отмечена 100%-ная стерильность микроклонов.

С помощью дополнительного внесения гормональных компонентов удалось увеличить количество образующихся дополнительных побегов до 3 шт. Выживаемость микроклонов составила 90–100% (рис. 5).

Этап укоренения. На этапе ризогенеза из всех вариантов с НЧ только совместное использование частиц Ag и ауксина позволило повысить количество микроклонов с наличием корней до 60% (рис. 6). Добавление только ауксина способство-

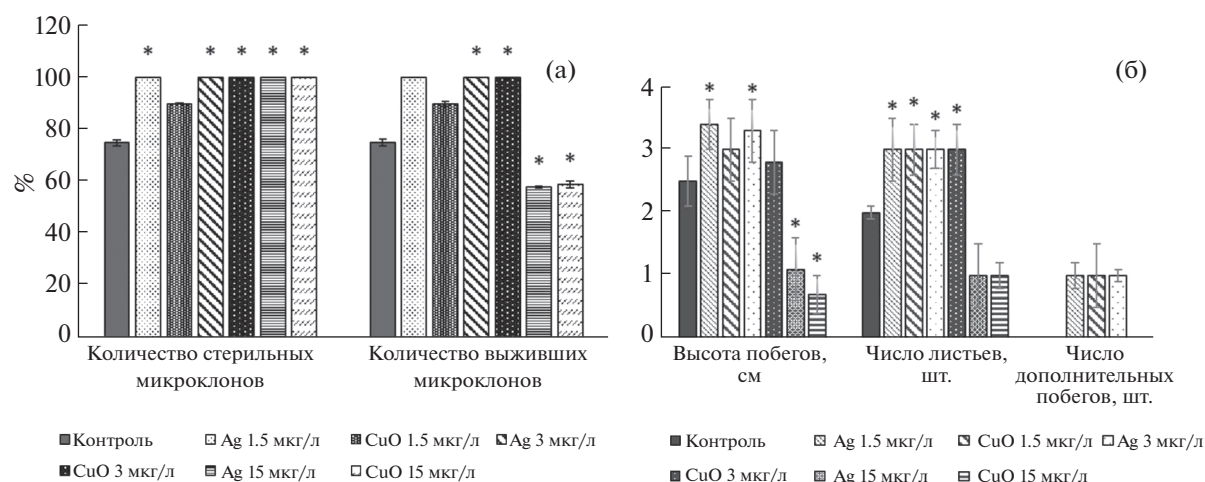


Рис. 4. Биоморфологические показатели микроклонов ивы ломкой на стадии мультипликации. Здесь и далее * — достоверные различия с контролем.

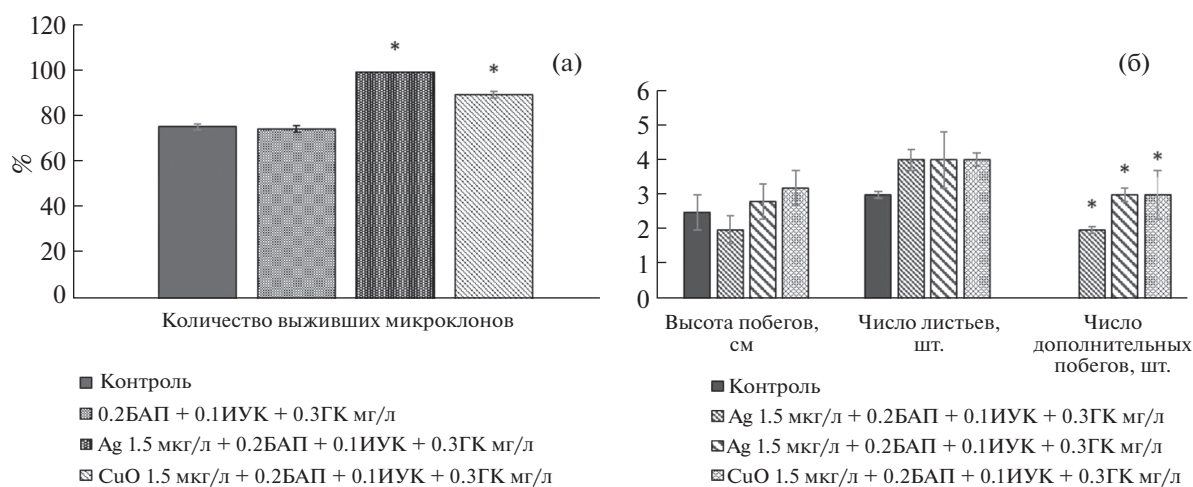


Рис. 5. Биоморфологические показатели микроклонов ивы ломкой на стадии мультипликации при добавлении гормональных компонентов.

вало стимулированию ризогенеза через три недели культивирования у 50% микроклонов. Высота побегов увеличилась в среднем на 59%, как при одиночном действии ауксина, так и при совместном с НЧ Ag.

Этап адаптации. На этапе адаптации самые лучшие результаты получили при внекорневой обработке раствором Ag (рис. 7). Количество выживших микроклонов составило 87%, что на 7% выше контрольных значений, высота растений через 3 нед составила 5.3 см, число адаптированных полностью растений — 72%.

Самые низкие показатели были получены при добавлении НЧ CuO. Вероятно, такой результат может быть объяснен токсическим воздействием

меди в качестве тяжелого металла или специфической фитотоксичностью НЧ CuO [32].

Таким образом, анализ результатов использования НЧ при переводе растений в тепличные условия свидетельствует о возможности повышения приживаемости древесных растений и снижения инфекционной нагрузки за счет введения в технологический процесс растворов НЧ Ag.

В целом согласно полученным результатам металлургические НЧ благоприятно влияют на регенеранты ивы ломкой на различных этапах культивирования. НЧ CuO и Ag повышают выживаемость регенерантов, усиливают ризогенез и улучшают основные показатели роста и развития ивы ломкой.

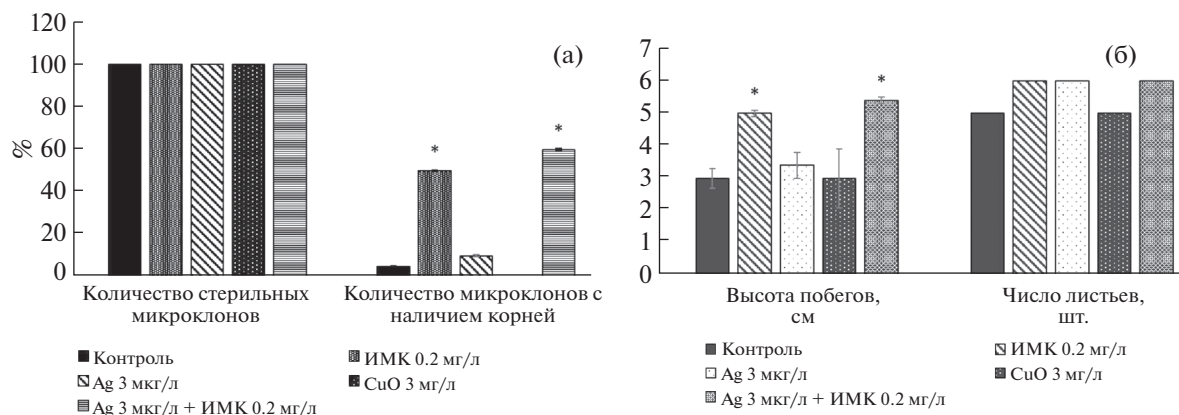


Рис. 6. Характеристики, связанные с биоморфологией, микроклонов ивы ломкой на этапе укоренения.

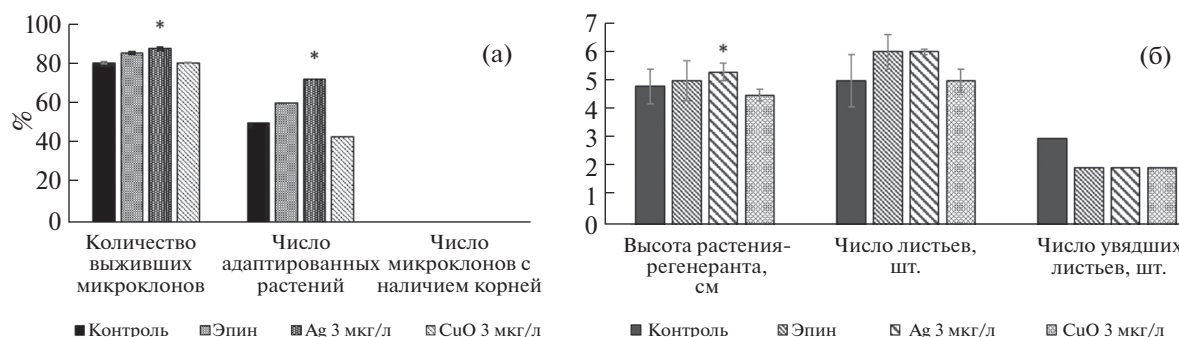


Рис. 7. Биоморфологические показатели микроклонов ивы ломкой на этапе адаптации *in vivo*.

ОБСУЖДЕНИЕ

Метод клонального микроразмножения позволяет получить большое количество однородных растений, а также здоровый посадочный материал. В настоящее время остается важной задачей разработка технологий, которые способствовали бы повышению эффективности существующих методов клонального микроразмножения. НЧ имеют уникальные свойства, которые делают их потенциальным агентом для применения в различных областях, в частности для стимуляции роста и защиты древесных растений, полученных методом клонального микроразмножения. Основной целью данной работы было изучение влияния НЧ CuO и Ag на растения ивы ломкой в культуре тканей на этапах мультипликации, укоренения и адаптации.

При изучении влияния металлических НЧ на микроклоны растений были описаны неоднозначные результаты [26–29]. Установлено, что техногенные НЧ могут иметь как положительное, так и отрицательное влияние на изучаемые параметры различных культур. Отметим, что металлические НЧ могут улучшать рост и развитие растений, приводить к увеличению сопротивляемости

растений вредителям и болезням. Добавление НЧ Ag в питательную среду на этапе мультипликации и укоренения привело к снижению зараженности фитопатогенами, а также стимулированию формирования корневой системы и значительному росту вегетативной части побегов тополя сереющего [33]. Аналогичный эффект отмечен в [34]. В настоящей работе использование НЧ Ag показало наилучшие результаты на всех этапах клонального микроразмножения. Возможно, наблюдаемые эффекты связаны со снижением фитопатогенной нагрузки и изменением антиоксидантного статуса под действием НЧ [35]. Во многих работах отмечено положительное влияние НЧ Ag на растительные тест-объекты [36, 37].

НЧ CuO также могут оказывать благоприятное влияние на древесные растения, полученные методом клонального микроразмножения. Исследования показывают, что НЧ CuO могут обладать антимикробными свойствами и способствовать защите растений от патогенных микроорганизмов, таких как бактерии, грибки и вирусы [34, 38]. Кроме того, НЧ CuO могут стимулировать рост растений, как наблюдалось в настоящей работе. В целом сообщается, что положительные эффек-

ты воздействия НЧ CuO на растительные тест-объекты связаны с тем, что данные частицы являются важными микроэлементами и действуют как комплекс, стимулирующий рост растений. Воздействие НЧ может изменить клеточную сигнализацию на молекулярном уровне, что приводит к стимулированию роста клеток и развитию культур [39].

Положительный эффект воздействия НЧ Ag на иву ломкую на стадии адаптации свидетельствует о повышении адаптационных свойств микрорастений под действием растворов НЧ, что согласуется с литературными данными. По мнению многих исследователей, использование НЧ снижает воздействие стрессовых факторов, к которым относится перенос растений в теплицы. При этом НЧ могут обладать пролонгированным действием, воздействовать на биологические объекты на клеточном уровне, повышая эффективность процессов, происходящих в растениях [40].

Известны работы, в которых описываются отрицательные эффекты воздействия металлических НЧ на культуру растительных тканей [25, 26]. В настоящей работе под действием НЧ Ag и CuO в максимальной концентрации наблюдалось значительное уменьшение высоты побегов и количества выживших микроклонов на этапе мультипликации. Исследования показывают, что НЧ Ag могут проникать в клетки растений и накапливаться в их тканях, что может привести к нарушению физиологических процессов и ослаблению роста растений. Одним из возможных негативных эффектов является угнетение роста и развития растений, а также уменьшение продуктивности. НЧ Ag могут вызвать и стрессовые реакции у растений, такие как изменения в уровне фотосинтеза, активности ферментов [42, 42]. НЧ CuO, в свою очередь, также могут привести к нарушению физиологических процессов и роста растений. НЧ могут накапливаться и в самом растении, что может оказать отрицательное воздействие на его развитие [43, 44]. Генерацию АФК можно рассматривать как один из возможных механизмов токсического действия НЧ, что приводит к окислительному стрессу [45].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены результаты исследования биологических эффектов воздействия НЧ Ag и CuO на растения ивы ломкой с использованием метода клонального микроразмножения.

Методом СЭМ установлено, что частицы CuO имели хлопьевидную морфологию (диаметр — 50–200 нм, толщина — 10–20 нм), НЧ Ag обладали сферической формой (20–40 нм). ζ -потенциал НЧ CuO в растворе составил — 36.6 мВ, Ag — 42.2 мВ.

На этапе мультипликации НЧ Ag и CuO в средней концентрации увеличили количество выживших и стерильных микроклонов до 100%. Высота побегов под действием НЧ Ag в концентрации 1.5 и 3 мкг/л в среднем была выше на 27% относительно контроля. Число листьев возросло при всех концентрациях НЧ, кроме максимальной. Также при концентрации НЧ 15 мкг/л отмечено значительное снижение выживших микроклонов и высоты побегов. С помощью дополнительного внесения гормональных компонентов в среды с концентрацией НЧ Ag и CuO 1.5 мкг/л удалось увеличить количество образующихся дополнительных побегов до 3 шт.

На этапе укоренения отмечено повышение числа укоренившихся проростков под действием Ag. При переносе регенерантов в тепличные условия под действием НЧ Ag в концентрации 3 мкг/л наблюдалось увеличение количества выживших микроклонов на 7% относительно контрольных значений, адаптированных растений — на 27%. НЧ CuO не оказали значимого влияния на рассматриваемые показатели.

Проведенные исследования продемонстрировали возможность использования НЧ Ag и CuO в биотехнологическом процессе клонального микроразмножения ивы ломкой при введении эксплантов в культуру *in vitro*, а также при переводе растений в тепличные условия. При этом наилучшие результаты достигнуты при обработке регенерантов НЧ Ag в концентрации 3 мкг/л.

Результаты данной работы могут быть использованы в климатических технологиях, так как древесные культуры, полученные методом клонального микроразмножения, могут способствовать углеродному секвестрированию. Древесные культуры также могут быть источниками активных веществ, используемых в медицинских и косметических препаратах, а использование НЧ может повысить эффективность их экстракции.

В будущем возможно провести исследования по изучению взаимодействия НЧ с растительными клетками: механизмы поглощения НЧ и их влияние на физиологические процессы в клетках древесных культур. Дополнительно можно провести оценку влияния различных НЧ на несколько видов древесных культур для определения оптимальных комбинаций для каждого конкретного вида. Также актуальными будут разработка методов получения НЧ на основе природных экстрактов и изучение их влияния на развитие растений как более безопасный вариант.

Описанные выше исследования могут значительно продвинуть понимание применения НЧ в данной области и способствовать развитию более эффективных и устойчивых методов размножения древесных культур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-16-20039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесникова Е.О. // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5. С. 88.
2. Samantaray D.D., Mohapatra S., Mishra B.B. // Microbial Bioremediation of Industrial Effluents. 2014. P. 325.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800021-2.00014-5>
3. Zakharova O., Vasyukova I., Strekalova N., Gusev A. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 392. P. 012024.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012024>
4. Bairu M.W., Aremu A.O., Van Staden J. // Plant Growth Regul. 2011. V. 63. P. 147.
5. Ruttkay-Nedecky B., Kryštofová O., Nejdil L., Adam V. // J. Nanobiotechnol. 2017. V. 15.
<https://doi.org/10.1186/s12951-017-0268-3>
6. Bandyopadhyay S., peralta-videa J., Gardea-Torresdey J. // Environ. Eng. Sci. 2013. V. 30. № 3. P. 118.
<https://doi.org/10.1089/ees.2012.0325>
7. Nadiminti P.P., Dong Y.D., Sayer C. et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2013. V. 5. № 5. P. 1818.
<https://doi.org/10.1021/am303208t>
8. Sekhon B. // Nanotechnol. Sci. Appl. 2014. V. 7. P. 31.
<https://doi.org/10.2147/NSA.S39406>
9. Fraceto L., Grillo R., Medeiros G. et al. // Front. Environ. Sci. 2016. V. 4.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>
10. Pérez-de-Luque A., Hermosin M. // Bio-nanotechnology: A revolution in food, biomedical and health sciences. 2013. P. 383.
11. Hajipour M.J., Fromm K.M., Ashkarran A.A. et al. // Trends Biotechnol. 2012. V. 30. P. 499.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.06.004>
12. Sarmast M.K., Salehi H. // Mol. Biotechnol. 2016. V. 58. P. 441.
<https://doi.org/10.1007/s12033-016-9943-0>
13. Kim D.H., Gopal J., Sivanesan I. // RSC Adv. 2017. V. 7. P. 36492.
<https://doi.org/10.1039/C7RA07025J>
14. Rai M., Deshmukh S., Ingle A., Gade A. // J. Appl. Microbiol. 2012. V. 112. P. 841.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2012.05253.x>
15. Wang L., He D., Gao S. et al. // Int. J. Nanomedicine. 2016. V. 11. P. 1899.
<https://doi.org/10.2147/IJN.S98339>
16. Shafiee Ardestani M., Fordoei A., Abdoli A. et al. // J. Mater. Sci. Mater. Med. 2015. V. 26. № 5. P. 5510.
<https://doi.org/10.1007/s10856-015-5510-7>
17. Zakharova O., Gusev A., Zharebin P. et al. // BioNanoSci. 2017. V. 7. P. 692.
<https://doi.org/10.1007/s12668-017-0406-2>
18. Koduru J.R., Kailasa S.K., Bhamore J.R. et al. // Adv. Colloid Interface Sci. 2018. V. 256. P. 326.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.03.001>
19. Akhavan O., Ghaderi E. // ACS Nano. 2010. V. 4. № 10. P. 5731.
<https://doi.org/10.1021/nn101390x>
20. Chen J., Peng H., Wang X. et al. // Nanoscale. 2014. V. 6. № 3. P. 1879.
<https://doi.org/10.1039/c3nr04941h>
21. Стрекалова Н.С., Захарова О.В., Баранчиков П.А., Гусев А.А. // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11. № 2. С. 48.
<https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/5>
22. Budhani S., Egboluche N.P., Arslan Z. et al. // J. Environ. Sci. Health C. Environ. Carcinog. Ecotoxicol. Rev. 2019. V. 37. P. 330.
<https://doi.org/10.1080/10590501.2019.1676600>
23. González-García Y., López-Vargas E.R., Cadenas-Pliego G. et al. // Int. J. Mol. Sci. 2019. V. 20.
<https://doi.org/10.3390/ijms20235858>
24. López-Vargas E.R., González-García Y., Pérez-Álvarez M. et al. // Agron. 2020. V. 10. P. 639.
25. Евлаков П.М., Федорова О.А., Гродецкая Т.А., Захарова О.В. и др. // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15. № 4. С. 505.
<https://doi.org/10.1134/S1992722320040032>
26. Zakharova O., Kolesnikova E., Kolesnikov E. et al. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 595. P. 012001.
27. Гродецкая Т.А., Федорова О.А., Евлаков П.М. и др. // Российские нанотехнологии. 2021. Т. 16. № 2. С. 244.
<https://doi.org/10.1134/S1992722321020060>
28. Стрекалова Н.С., Захарова О.В., Баранчиков П.А., Гусев А.А. // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11. № 2. С. 35.
29. Zakharova O.V., Gusev A.A., Muratov D.S. et al. // Forests. 2021. V. 12. P. 713.
<https://doi.org/10.3390/f12060713>
30. Zhang Z., Zhao L., Ma Y. et al. // J. Nanobiotechnol. 2022. V. 20. P. 146.
<https://doi.org/10.1186/s12951-022-01326-8>
31. Luna I., Hilary L., Chowdhury A.M.S. et al. // OALib. 2015. V. 2. P. 1.
<https://doi.org/10.4236/oalib.1101409>
32. Rajput V., Minkina T., Fedorenko A. et al. // Sci. Total Environ. 2018. V. 645. P. 1103.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.211>
33. Vasyukova I.A., Gusev A.A., Zakharova O.V. et al. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. V. 875. № 1.
34. Fedorova O., Grodetetskaya T.A., Evtushenko N. et al. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. V. 875. № 1.
35. Pallavi, Mehta C.M., Srivastava R. et al. // 3 Biotech. 2016. V. 6. P. 254.
<https://doi.org/10.1007/s13205-016-0567-7>
36. Abdi G., Salehi H., Khosh-Khui M. // Acta Physiol. Plant. 2008. V. 30. P. 709.
<https://doi.org/10.1007/s11738-008-0169-z>

37. *Safavi K., Mortezaeinezhad F.* // Res. Crop. 2012. V. 13. P. 254.
38. *Grodetskaya T.A., Evlakov P.M., Fedorova O.A. et al.* // Nanomaterials. 2022. V. 12. № 5. P. 864.
39. *Priyanka N., Geetha N., Ghorbanpour M., Venkatachalam P.* // Adv. Phytonanotechnol. 2019. P. 183.
40. *Sarmast M., Salehi H.* // Mol. Biotech. 2016. V. 58. P. 441.
41. *Yan A., Zhong C.* // Int. J. Mol. Sci. 2019. V. 20. № 5. P. 1003.
42. *Tripathi D.K., Tripathi A., Shweta et al.* // Front. Microbiol. 2017. V. 8. P. 07.
43. *Fatima A., Singh S., Prasad S.M.* // Sustainable Agriculture Reviews 41: Nanotechnology for Plant Growth and Development. 2020. P. 143.
44. *Panakkal H., Gupta I., Bhagat R., Ingle A.P.* // Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection: Recent Advances and Impacts. 2021. P. 259.
45. *Rastogi A., Zivcak M., Sytar O. et al.* // Front. Chem. 2017. V. 5. P. 78.