

# НАНОБИОЛОГИЯ И ГЕНЕТИКА, ОМИКСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 544.1+630\*232.5

## РОЛЬ СТАБИЛИЗАТОРОВ КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМ В ПРОЯВЛЕНИИ СТИМУЛИРУЮЩЕЙ АКТИВНОСТИ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ ПО ОТНОШЕНИЮ К РАСТЕНИЯМ ТОПОЛЯ В КУЛЬТУРЕ IN VITRO

© 2025 г. О. А. Федорова<sup>1,\*</sup>, Т. А. Гродецкая<sup>1</sup>, Н. А. Евтушенко<sup>1</sup>,  
П. М. Евлаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный лесотехнический университет им.

Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия

\*E-mail: [fed-olga78@mail.ru](mailto:fed-olga78@mail.ru)

Поступила в редакцию 31.10.2024 г.

После доработки 31.10.2024 г.

Принята к публикации 01.11.2024 г.

Обсуждаются эффекты воздействия растворов наночастиц оксида меди, стабилизированных неионными поверхностно активными веществами (Твин 20 и Тритон X100) и полигексаметиленбигуанидом (ПГМБ), на различные этапы клонального микроразмножения растений тополя 'Тополь белый × Ос.' (*Populus alba* × *Populus tremula*) в культуре *in vitro*. Использование стабилизированных наночастиц в составе среды культивирования на этапе введения в культуру *in vitro* в концентрации 5 мг/л позволяет повысить выход стерильных жизнеспособных эксплантов на 16.7–26.7% по сравнению с контрольными растениями. На стадии мультипликации положительное действие нанопрепаратов отмечено по показателю коэффициента мультипликации. Максимальное значение данного показателя (3.3) получено для наночастиц 5 мг/л, стабилизированных ПГМБ (в контроле 2.6). Для стимуляции корнеобразования микропобегов тополя среды с добавлением наночастиц оксида меди, стабилизированных Тритоном и Твином, оказались оптимальными. Экспериментально подтверждено увеличение числа укорененных побегов на 10%, числа корней на побег до 46%.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных способов сохранения и воспроизведения растительного материала ценных генотипов является метод культивирования изолированных клеток тканей и органов в условиях *in vitro*. Для сохранения растений эта технология представляет ряд преимуществ, а именно: поддержание генетической составляющей, очень высокие коэффициенты размножения, асептическая система, свободная от грибов, бактерий и вирусов (после термотерапии) и насекомых-вредителей, значительное уменьшение потребности в площади и уменьшение стоимости [1]. Данный метод позволяет в асептических условиях поддерживать длительное время растительный материал определенных генотипов без изменений. Для интенсификации процесса клонального микроразмножения используется много методов и приемов, включая нанобиотехнологические [2–4]. Например, металлы в форме наночастиц (**НЧ**) обеспечивают более высокую проникающую способность по сравнению с более крупными частицами, обладают уникальными функциональными возможностями, электрическими и оптическими свойствами, высокой стабильностью и высокой адсорбционной способностью, что делает их перспективной формой для обеспечения растений микроэлементами [5]. Кроме того, некоторые НЧ, такие как серебра и меди, обладают хорошими дезинфицирующими свойствами для эксплантов и питательных сред [6, 7].

Несмотря на большое число экспериментальных данных, результаты по воздействию НЧ металлов в зависимости от размера, концентрации, химического состава,  $\zeta$ -потенциала, стабильности и формы на растения в культуре *in vitro* весьма противоречивы. Так, в [8] побеги сахарного тростника культивировались на среде Мурасиге и Скуга с НЧ серебра в концентрациях 0, 25, 50, 100 и 200 мг/л. Отмечена стимуляция роста растений при концентрации 50 мг/л, тогда как при 200 мг/л отмечено ингибирование показателя. Анализ минеральных питательных веществ показал изменения в содержании макро- и

микроэлементов под влиянием НЧ серебра. Более того, изучаемые НЧ индуцировали выработку активных форм кислорода (АФК) и увеличили общее содержание фенолов с дозозависимым эффектом. В [9] установлено влияние НЧ Zn и ZnO на снижение уровня контаминирования эксплантов, а также на некоторые регенерационные процессы. Не было отмечено выраженного отрицательного воздействия на регенерацию эксплантатов даже при 200 мг/л НЧ в питательной среде. Используемые концентрации НЧ скорее всего были ниже пороговых значений и не показали никакого отрицательного воздействия на регенерацию побегов банана. Однако доза 100 мг/л была предпочтительнее, поскольку она показала наилучшие эффекты на увеличение регенерации проростков с хорошо сформированными корневыми системами.

Что касается НЧ меди, для них многочисленные исследования проводились, в том числе, в условиях *in vitro*. В [10] отмечено, что хлорсодержащие агенты для стерилизации, такие как хлориды ртути(II) и кальция(II) могут быть эффективно заменены на наночастицы меди при введении в культуру бегонии. Применение НЧ, в том числе на основе меди, может оказывать влияние на синтез важных для фармакопеи вторичных метаболитов. В условиях *in vitro* НЧ CuO стимулировали образование фенолов и гликозидов у вигны [11]. У эксплантов стевии помимо синтеза гликозидов и антиоксидантных ферментов НЧ CuO стимулировали увеличение биомассы, длины и числа корней [12]. В наших ранних работах отмечено, что количество стерильных и жизнеспособных эксплантов березы пушистой увеличивалось при применении НЧ CuO на стадиях введения эксплантов в культуру *in vitro*, а также отмечена стимуляция ризогенеза и роста эксплантов на стадии мультипликации [13].

В данной работе проводилась оценка влияния различных стабилизаторов (Твин 20, Тритон X100, полигексаметиленбигуанид (ПГМБ)) на эффективность НЧ оксида меди на разных этапах клонального микроразмножения растений гибрида 'Тополь белый × Ос.' с целью

совершенствования технологии получения посадочного материалы древесных пород растений.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

*НЧ и суспензии НЧ.* Для получения нанопрепаратов использовались НЧ CuO, приобретенные у компании Sigma-Aldrich, США. Размер частиц, согласно данным производителя составляет 75–100 нм. Анализ морфологии и элементного состава наночастиц проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения Merlin (Carl Zeiss, Германия) с энергодисперсионным анализатором «10mm<sup>2</sup> SDD Detector - X-Act».

Диспергирование и агрегация НЧ в водных растворах являются важными факторами для их безопасного и эффективного применения в различных приложениях. Говоря про биологическое использование, обязательным требованием является гидрофильность и стабильность НЧ в биологических средах. Для получения стабильных нанопрепаратов были использованы различные стабилизаторы: неионогенные ПАВ - Твин 20 (VWR International Ltd, США) и Тритон X-100 (Sigma-Aldrich, США), а также катионный ПАВ - ПГМБ (20% раствор, Arch Chemicals, Inc., США), который обычно используют в качестве биоцидного дезинфектанта.

В ходе работы готовили концентрированные препараты НЧ, содержащие 0.1, 1 и 5 мг CuO в 10 мл 0.005% раствора стабилизатора, а также растворы без стабилизатора, которые впоследствии вносили в состав питательной среды, заменяя 10 мл воды в прописи на 10 мл препарата. Таким образом, в составе питательной среды использовались концентрации 0.1, 1 и 5 мг/л. Для анализа возможного влияния ПАВ на микропобеги гибрида '*Тополь белый* × *Ос.*' отдельно тестировали растворы Твин 20, Тритон X-100 и ПГМБ, заменяя 10 мл воды в питательной среде на 10 мл 0.005 % раствора стабилизатора.

Анализ стабильности полученных препаратов проводили путем измерения зета-потенциала на приборе ZetasizerNanoZS (Malvern, Великобритания).

*Клональное микроразмножение.* В качестве эксплантов при введении в культуру использовали апикальные и пазушные меристемы молодых побегов гибрида 'Тополь белый × Ос.' . Побеги промывали проточной водой с ПАВ и разрезали на сегменты 3-5 см, после чего и стерилизовали в течение 35 мин в растворе, состоящем из 200 мл дистиллированной воды и 200 мкл 5%-ного раствора гипохлорита натрия (средства «Белизна», Россия) с последующей однократной промывкой в дистиллированной воде. Основная стерилизация побегов проводилась в ламинар-боксе в растворе, включающем 15 мл 5%-ного раствора гипохлорита натрия и 85 мл стерильной дистиллированной воды, в течение 15 мин. Промывка проводилась также стерильной водой. Стерильные побеги разрезали в асептических условиях на сегменты величиной 1.5–2 см с одной пазушной почкой – экспланты, которые впоследствии были высажены на агаризованную питательную среду Мурасиге и Скуга [14] с добавлением препаратов НЧ оксида меди. В качестве контроля использовали среду без добавления наночастиц. Условия климатического режима: 16-часовой фотопериод при освещенности 2–3 клк, температуре 24–26°C. На протяжении трех недель фиксировали число стерильных эксплантов и эксплантов, сформировавших основной побег.

Оценку влияния растворов НЧ, стабилизированных ПАВами и ПГМБ, на регенерационные процессы, а также коэффициент размножения микропобегов проводили на среде Мурасиге и Скуга с добавлением препаратов, а также регуляторов роста – 300 мкг/л бензиламинопурина (**БАП**) (≥99%, Sigma-Aldrich, США) и 200 мкг/л индолил-3-уксусной кислоты (**ИУК**) (≥99%, Sigma-Aldrich, США). По истечении 3 недель оценивали прирост основного побега, а также коэффициент мультипликации. Коэффициент мультипликации рассчитывали как среднее количество микропобегов, полученных с одного конгломерата.

Процесс укоренения микроклонов под влиянием растворов НЧ проводили на среде Мурасиге и Скуга, дополненной 300 мкл/л индолил-3-масляной кислотой (**ИМК**) (≥99%, Sigma-Aldrich, США). Учитывали число

укоренившихся микрорастений через 21 день наблюдений, а также количество корней на одно растений.

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием программы Microsoft Excel 2010 (пакет «Описательная статистика») с применением однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) при 5%-ном уровне значимости.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Характеризация НЧ и их растворов.* Электронно-микроскопическое исследование показало, что порошок CuO состоит из агрегатов палочковидных структур размером 12×70 нм. Как видно из рис. 1, в состав образца входит только медь и кислород, т.е. отсутствуют какие-либо примеси.

Анализ стабильности дисперсных систем НЧ показал, что все полученные дисперсии наночастиц обладали достаточно высокой стабильностью (рис. 2).

Как видно из рис. 2, показатель  $\zeta$ -потенциала для всех дисперсий с ПАВ составил более 30 мВ, что свидетельствует о стабильности полученных растворов. Значение  $\zeta$ -потенциала равное 30 мВ (по модулю) принято рассматривать как характерное значение, для условного разделения низко-заряженных поверхностей и высоко-заряженных поверхностей [15, 16]. Максимальные показатели отмечены в вариантах с Твин 20 (средние значения около -35 мВ) и ПГМБ (средние значения около -33 мВ). В водных коллоидных системах значения дзета-потенциала немного снижались с повышением концентрации НЧ – с -30 до -28 мВ.

*Клональное микроразмножение.* При клональном микроразмножении выделяют следующие стадии: I стадия – введение в культуру *in vitro* экспланта; II стадия – мультипликация эксплантов (микропобегов); III стадия – укоренение растений и пересадка в почву. По сравнению с травянистыми растениями микроразмножение древесных пород имеет трудности, связанные с I и III этапами [17].

Результаты оценки влияния дисперсий НЧ, полученных с использованием различных ПАВ, ПГМБ и без них, на стерильность эксплантов на стадии введения в культуру показало повышение показателя с увеличением концентрации наночастиц в среде (рис. 3). Максимальный выход стерильных эксплантов наблюдался в варианте без стабилизаторов – 76.7% при 5 мг/л CuO, тогда как в контроле показатель составил 40.0 % (рис. 3а). В случае с Твином и Тритоном, показатели практически не отличались (рис. 3б, 3в) и число стерильных проростков при максимальной концентрации CuO составило около 60.0 и 57.6% соответственно. Использование ПГМБ в качестве стабилизатора позволяло получить 66.7 % неинфицированных морфогенных эксплантов (рис. 3г).

Анализ влияния стабилизаторов на способность подавлять эпифитную микрофлору растений показал, что их добавление хоть и несколько повышало стабильность растворов (увеличение значений  $\zeta$ -потенциала), при этом снижалось число стерильных эксплантов по сравнению с растворами без стабилизаторов. Вероятно, это связано со стерическими препятствиями – стабилизаторы создают вокруг каждой НЧ сферический барьер, что снижает их активность. В то же время в литературных источниках имеется достаточно обширный материал, который свидетельствует об антимикробных свойствах самих стабилизаторов [18]. Раствор НЧ, стабилизированный поверхностно-активным веществом, всегда содержит как минимум два компонента, обладающих биологической активностью: сами НЧ в оболочке из этого вещества и стабилизатор в свободном состоянии. Из сказанного выше вытекает, что при исследовании действия на клетки стабилизированных растворов НЧ необходимо ставить контрольный опыт на собственную токсичность водного раствора этих стабилизаторов. В исследовании стабилизаторы не оказали достоверного противомикробного влияния в анализируемых концентрациях.

*II стадия – мультипликация эксплантов (микроробегов).* Эффективность прохождения данной стадии с использованием дисперсий НЧ, полученных с

использованием различных стабилизаторов и без них, судили по двум показателям: приросту побегов и коэффициенту мультипликации .

Не установлено положительной динамики увеличении прироста побегов при добавлении в среду как растворов НЧ, так и их комбинаций со стабилизаторами (рис. 4). В данном случае наиболее очевидно проявление явления снятия апикального доминирования под влиянием цитокининов (БАП) и усиление их действия под влиянием вносимых НЧ и их комбинаций со стабилизаторами. Так, в контрольном варианте прирост побегов тополя составлял 95.5%, при использовании НЧ оксида меди без стабилизатора средний показатель для 3х используемых концентраций - 56.4% (Рис. 4а). Для стабилизированных нанопрепаратов усредненный показатель по 3 используемым концентрациям - 69.4 35.4, и 57.2% для Твина (Рис. 4б), Тритона (Рис. 4в) и ПГМБ (Рис. 4г), соответственно. Самый низкий показатель прироста основного побега отмечен для дисперсий наночастиц, стабилизированных Тритоном.

Не установлено единой тенденции изменения прироста побегов тополя от концентрации наночастиц для различных стабилизаторов. Так, в случае использования Тритона и ПГМБ установлено уменьшение высоты побега с увеличением концентрации наночастиц, а для Твина обнаружена обратная зависимость. Данный факт свидетельствует о сложном сочетанном действии на растения как самих наночастиц, так и их стабилизаторов. Согласно литературным данным [19], для наночастиц металлов наблюдается колебательный характер дозовой зависимости величины наблюдаемых показателей, что обусловлено волновым характером распространения пространственных перестроек проницаемости мембран и надмолекулярных структур под влиянием энергетического воздействия наночастиц, повышающих концентрацию протонов.

При исследовании влияния нанопрепаратов на коэффициент мультипликации отмечено их положительное действие на данный показатель (Рис. 5). Установлено, что в вариантах с использованием НЧ оксида меди

происходит более активное развитие боковых побегов, что повышает коэффициент. При этом, максимальное его значение - 3.3 было получено для НЧ 5 мг/л, стабилизированных ПГМБ (в контроле 2.6) (Рис 5г). Для НЧ оксида меди, стабилизированных Тритоном, максимальное значение коэффициента (3.1) отмечено при концентрации наночастиц 0.1 мг/л (Рис. 5в). Для Твина исследуемый показатель отметил свой максимум (3.2) при 1 мг/л наночастиц (Рис. 5б). При сравнении среднего значения коэффициента мультипликации по каждому из стабилизаторов установлено, что максимальных значений (3.1) показатель достигает при использовании НЧ, стабилизированных ПГМБ, наименьших на Тритоне – 2.8. Сравнительный анализ данных по коэффициенту мультипликации в вариантах с использованием дисперсий НЧ без стабилизаторов показал снижение среднего значения данного показателя на 7.1-10.7% по сравнению с вариантами, где применялись стабилизаторы.

Таким образом, на стадии мультипликации положительное действие стабилизированных нанопрепаратов оксида меди отмечено только по показателю коэффициента мультипликации. Снижение прироста главного побега, снятие так называемого апикального доминирования, и активация роста боковых побегов, вероятно, связаны с повышением проницаемости мембраны растительной клетки под влиянием растворов НЧ. В исследованиях ученых [20] приводятся данные об изменении рН среды за счет высокой восстановительной способности НЧ, что повышает проницаемость мембран растительных клеток для аккумуляции биологически активных веществ, в частности фитогормонов.

*III стадия – укоренение растений.* Важным этапом в технологии клонального микроразмножения растений является укоренение микропобегов. Основная задача на этапе ризогенеза древесных культур заключается в получении наибольшего количества укоренённых микропобегов с хорошо развитой корневой системой. Сильная корневая система необходима для обеспечения растений водой и минеральными веществами, для закрепления растения, помогает нивелировать стрессовые факторы окружающей среды, такие как ранения, изменения водного режима, дефицит питательных веществ и

другие. Ризогенез является важным этапом в клональном размножении и с экологической точки зрения, обеспечивая селективное преимущество растениям при таком типе размножения [21]. Положительный результат проведения стадии укоренения в значительной степени определяется правильным выбором питательной среды, а также ее компонентов. Как показали результаты проведенных экспериментов, в контроле без добавления каких-либо составляющих, процент укорененных побегов составлял 90% (Рис. 6). Успешное прохождение этапа ризогенеза при использовании нанопрепаратов на основе оксида меди, в качестве возможных стимуляторов корнеобразования, стабилизированных Твином и Тритоном, наблюдалось при всех изучаемых концентрациях (Рис. 6б, 6в). При этом максимальное число укорененных побегов в случае использования Тритона в качестве стабилизатора доходило до 100%, а при использовании Твина в концентрациях 0.1 и 5 мг/л - до 96.7%. При использовании НЧ, стабилизированных ПГМБ, положительное влияние на ризогенез наблюдалось только при добавлении в состав среды наночастиц в концентрации 1 мг/л (Рис. 6г) – показатель укорененных эксплантов составлял 100%. При внесении в состав питательной среды НЧ без стабилизаторов показатель числа укорененных побегов (Рис. 6а) имел более низкие значения – 93.3-90.0%, чем в вариантах с использованием стабилизаторов.

Анализ числа корней на один побег на средах, дополненных нанопрепаратами, показал превышение данного показателя у опытных вариантов по сравнению с контролем (Рис. 7). Наибольшее значение – 3.5 корней отмечено при внесении нанопрепаратов оксида меди 0.1 мг/л, стабилизированных Тритоном (Рис. 7в). В контроле данный показатель составлял 2.2. При исследовании влияния концентрации НЧ на число корней установлено, что максимальное значение данный показатель достигал при 0.1 мг/л – среднее значение по всем исследуемым вариантам – 3.1, более низкое – 2.9 при концентрации 1 и 5 мг/л. Оценка влияния стабилизатора показала, что наибольшее число корней у побегов тополя характерно для НЧ,

стабилизированных Тритоном и Твином – 3.3 (Рис. 7б), наименьшее – для ПГМГ (2.7) (Рис. 7г). В вариантах с НЧ без стабилизатора отмечено более низкое среднее значение данного показателя (2.8), чем при использовании стабилизаторов Тритон (3.2) и Твин (3.2).

Таким образом, для стимулирования корнеобразования микропобегов тополя среды с добавлением НЧ оксида меди, стабилизированных Тритоном и Твином, оказались оптимальными. Экспериментально подтверждено увеличение числа укорененных побегов на 10%, числа корней на побег до 46%. Положительное действие НЧ оксида меди, как стабилизированных, так и без стабилизаторов на процесс укоренения микропобегов тополя в культуре *in vitro* является, по-видимому, результатом усиления действия ауксинов, вносимых в состав питательной среды за счет повышения проницаемости растительной клетки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты проведенных исследований позволили установить положительное влияние нанопрепаратов оксида меди, стабилизированных неионными ПАВами, а также полигексаметиленбигуанидом, в концентрации 5 мг/л в составе среды культивирования на этапе введения в культуру *in vitro* тополя 'Тополь белый × Ос.'. Модификация питательных сред позволяет повысить выход стерильных жизнеспособных эксплантов на 6.7 – 26.7 % по сравнению с контрольными растениями. Отмечено усиление действия фитогормонов (цитокининов, ауксинов) на стадиях мультипликации и ризогенеза. Положительное действие нанопрепаратов отмечено по показателю коэффициента мультипликации - максимальное его значение 3,3 было получено для наночастиц 5 мг/л, стабилизированных ПГМБ (в контроле 2.6). Отмечена высокая степень укореняемости побегов (93.3 - 100%) в вариантах с использованием наночастиц, стабилизированных Тритоном и Твином. Анализ числа корней на один побег на средах, дополненных нанопрепаратами, показал превышение данного показателя у всех опытных вариантов по сравнению с контролем на

18-59%. Наибольшее значение – 3.5 корней отмечено при внесении нанопрепаратов оксида меди 0.1 мг/л, стабилизированных Тритоном. В контроле данный показатель составлял 2.2.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы статьи выражают благодарность директору НОЦ Экологии и биотехнологий, к. б. н., доценту Захаровой О. В., проректору по научной работе Тамбовского государственного университета им. Г. Р. Державина, д. б. н., профессору, Гусеву А. А. за предоставление дисперсий наночастиц, их характеристику, а также помощь в обсуждении полученных результатов и их анализ.

Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1023013000020-6-4.1.2 «Отбор хозяйственно ценных и устойчивых к изменению климата древесных культур, отличающихся высокой биологической продуктивностью и потенциалом секвестрации углерода с учетом региональных почвенно-климатическим особенностей для реализации лесоклиматических проектов (FZUR-2023-0002)».

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ, Федорова О. А.

**Рис. 1.** СЭМ-изображение и элементный состав образца CuO.

**Рис. 2.**  $\zeta$ -потенциал препаратов CuO.

**Рис. 3.** Влияние суспензий НЧ CuO на стерильность эксплантов на стадии введения в культуру: а – суспензии без добавления ПАВ; б – суспензии с добавлением Твин 20; в) суспензии с добавлением Тритон X100; г) суспензии с добавлением ПГМБ

**Рис. 4.** Влияние суспензий НЧ CuO на прирост основного побега: а) суспензии без добавления ПАВ; б) суспензии с добавлением Твин 20; в) суспензии с добавлением Тритон X100; г) суспензии с добавлением ПГМБ

**Рис. 5.** Влияние суспензий НЧ CuO на коэффициент мультипликации: а) суспензии без добавления ПАВ; б) суспензии с добавлением Твин 20; в) суспензии с добавлением Тритон X100; г) суспензии с добавлением ПГМБ

**Рис. 6.** Влияние суспензий НЧ CuO на укоренение: а) суспензии без добавления ПАВ; б) суспензии с добавлением Твин 20; в) суспензии с добавлением Тритон X100; г) суспензии с добавлением ПГМБ

**Рис. 7.** Влияние суспензий НЧ CuO на число корней: а) суспензии без добавления ПАВ; б) суспензии с добавлением Твин 20; в) суспензии с добавлением Тритон X100; г) суспензии с добавлением ПГМБ

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Monteuuis O.* // Micropropagation and production of forest trees / Eds. Park Y.-S., Bonga J. M., Moon H.-K., Vegetative Propagation of Forest Trees/National Institute of Forest Science (NIFoS). Seoul, Korea. 2016, P. 32.
2. *Singh Y., Kumar U., Panigrahi S. et al.* // Plant Physiol. Bioch. 2023. V. 203. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108004>
3. *Kim D.H., Gopal J., Sivanesan I.* // RSC Adv. 2017. V. 7. P. 36492. <https://doi.org/10.1039/C7RA07025J>
4. *Álvarez S.P., Tapia M.A.M., Vega M.E.G. et al.* // Nanotechnology and Plant Tissue Culture / In: Prasad, R. (eds) Plant Nanobionics. Nanotechnology in the Life Sciences. Springer, Cham. 2019. P. 333. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12496-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12496-0_12)
5. *Hayat S., Pichtel J., Faizan M., Fariduddin Q.* // Sustainable Agriculture Reviews 41: Nanotechnology for Plant Growth and Development. Springer Nature Switzerland AG. 2020. 216 p.
6. *Tung H.T., Bao H.G., Buu N.Q., et al.* The use of silver nanoparticles as a disinfectant and media additive in plant micropropagation / Eds. Nhut, D.T., Tung, H.T., Yeung, E.C.T. Plant Tissue Culture: New Techniques and Application in Horticultural Species of Tropical Region : Springer: Singapore, 2022. DOI: 10.1007/978-981-16-6498-4\_14
7. *Aleksandrowicz-Trzcinska M., Szaniawski A., Studnicki M., et al.* // Forest. 2018. V. 11. P. 690-697. DOI: 10.3832/ifor2855-01.).
8. *Bello-Bello J.J., Chávez-Santoscoy R.A., Lecona-Guzman C.A., et al.*// Dose-Response. 2017. V.15. P. 1-9. doi: 10.1177/1559325817744945
9. *Helaly M., El-Metwally M., El-Hoseiny H., et al.* // Aust. J. Crop Sci. 2014. V.8. No.4. P.612-624.

10. *Bao H. G., Tung H. T., Van H. T. et al.* // Plant Cell Tiss. Org. 2022. V. 151. No. 2. P. 385-399.
11. *Iqbal Z., Javad S., Naz S. et al.* // Front. Plant Sci. 2022. V. 13. P. 1-10.
12. *Ahmad M. A., Javed R., Adeel M, et al* // Molecules. 2020. V.25. <https://doi.org/10.3390/molecules25061356>
13. *Grodetskaya T. A., Evlakov P. M., Fedorova O. A., et al.* // Nanomaterials. – 2022. V. 12. No. 5. P. 864.
14. *Murashige T., Skoog F.* //Physiologia Plantarum. 1962. Vol. 15. P. 73 – 497.
15. *Liu J., Tu L., Cheng M. et al.* // J Drug Deliv. Sci. Technol. 2020. V. 56. DOI:10.1016/j.jddst.2020.101607
16. *M. Krstić, Đ. Medarević, J. Đuriš, et al.* // Lipid Nanocarriers for Drug Targeting / Eds. William Andrew Publishing, Norwich NY. 2018. P. 473-508.
17. *Murashige T.* // Annu. Rev. Plant Physiol. 1974. V.25. P.135–166
18. *Falk N.A.* // J. Surfactants Deterg. 2019 V. 22. No.5. P.1119-1127. doi: 10.1002/jsde.12293.
19. *Полищук С. Д., Чурилов Г. И., Чурилов Д. Г. др.* // Вестник РГАТУ. 2019. №4 (44). С. 45-53. DOI 10.36508/RSATU.2019.32.87.008
20. *Churilov G., Ngo Q.B., Nguyen H. C.* Physiological and Biochemical Effects of Nanocrystalline Metals on maize plant // Proceeding of 4th International Workshop on Advanced Materials and NanoScience, 2013. Nov 12-14. PP. 282 – 285
21. *Bannoud F., Bellini C.* // Front. Plant Sci. 2021. V. 12. P. 1-22. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.668837>

РИСУНКИ

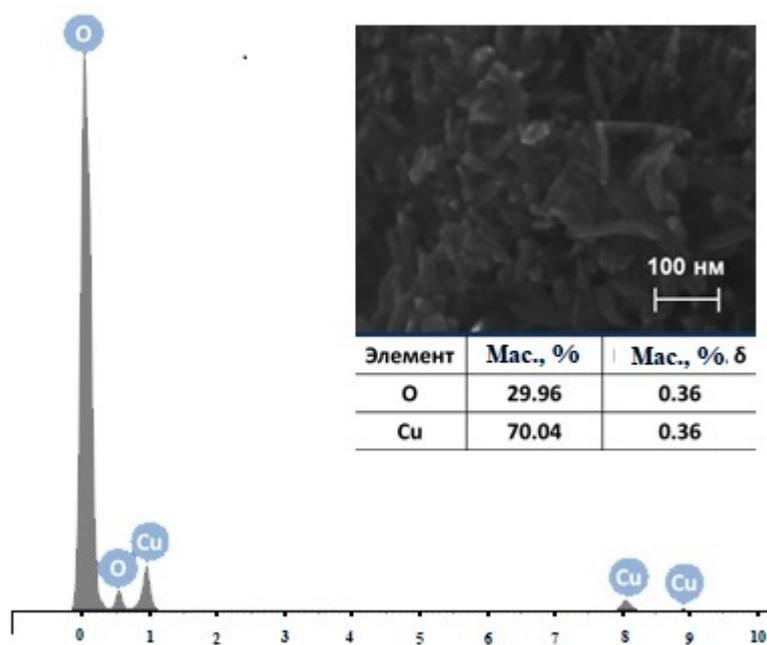


Рис. 1, Федорова и др.

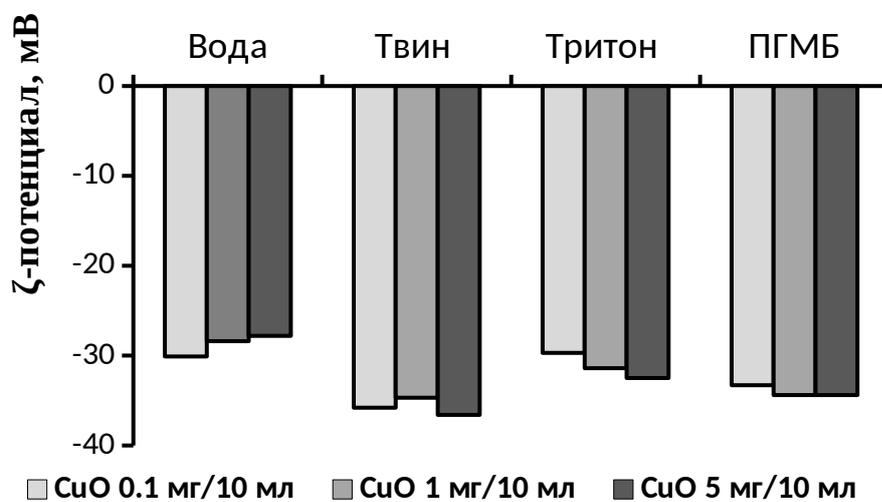
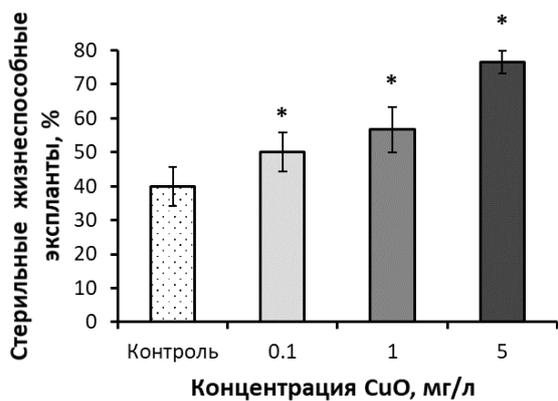
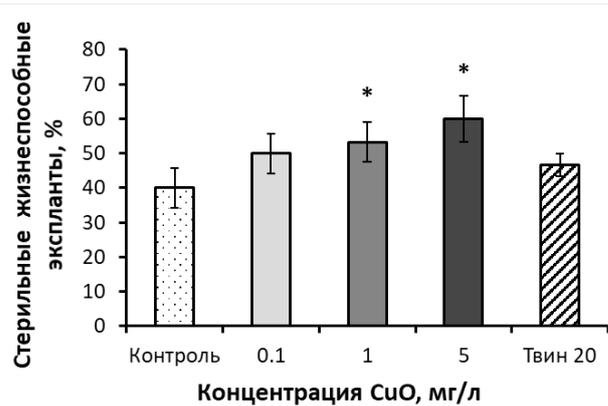


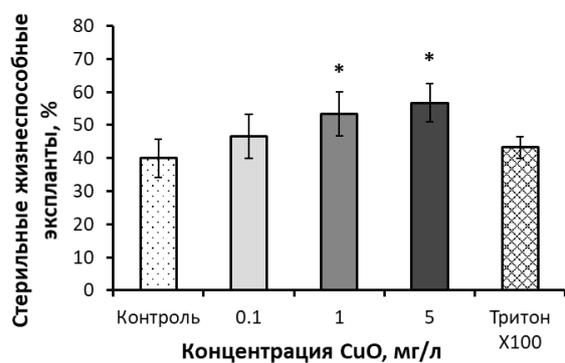
Рис. 2, Федорова и др.



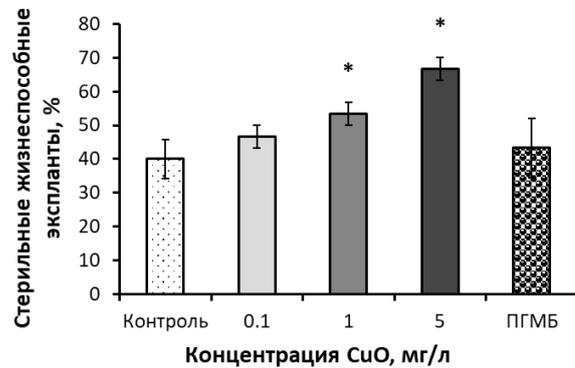
(a)



(б)

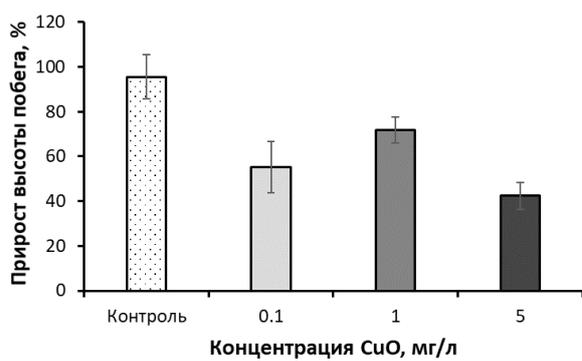


(в)

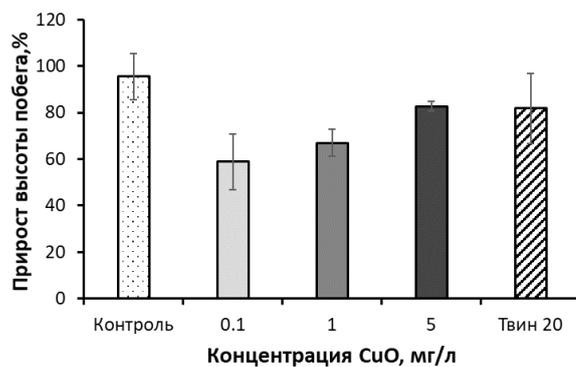


(г)

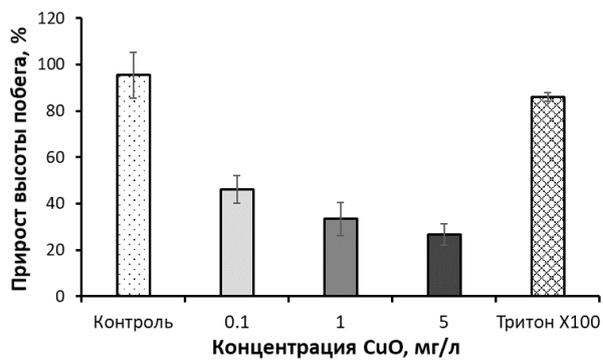
**Рис. 3, Федорова и др.**



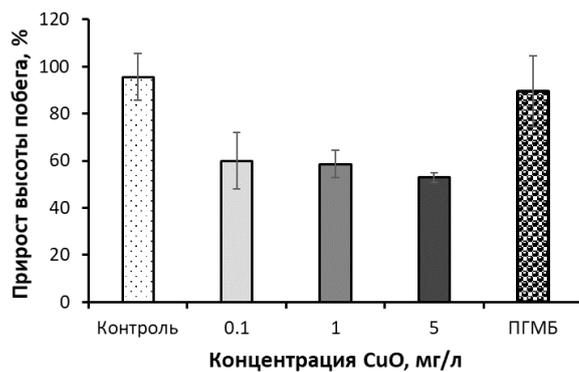
(a)



(a)

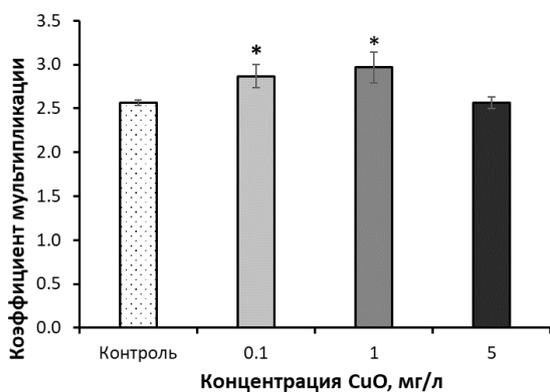


(В)

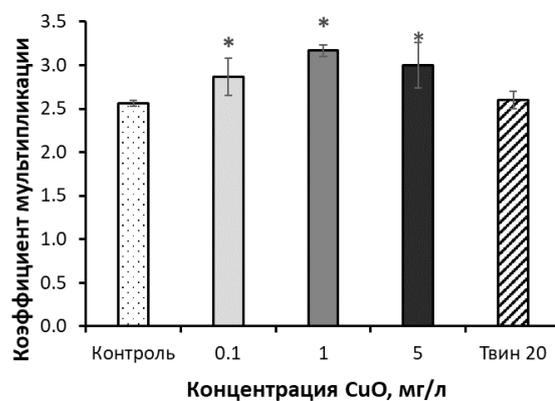


(Г)

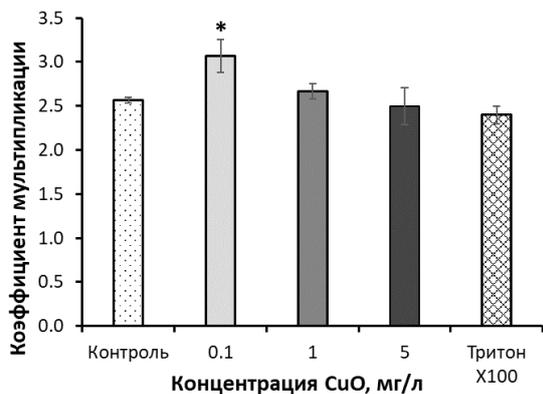
Рис. 4, Федорова и др.



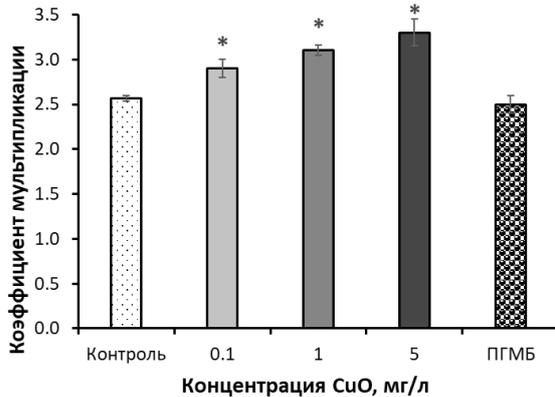
(а)



(б)

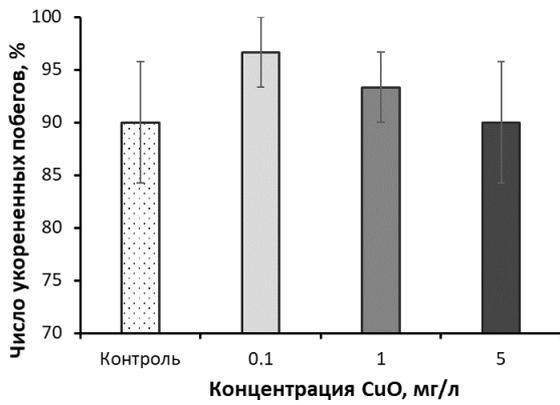


(в)

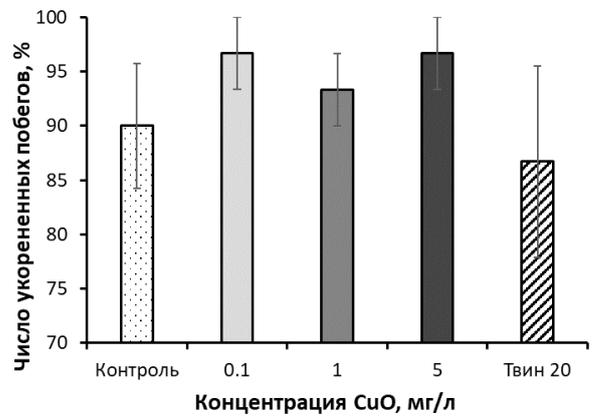


(г)

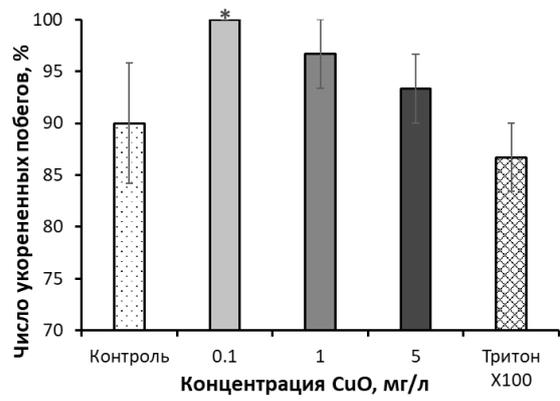
Рис. 5, Федорова и др.



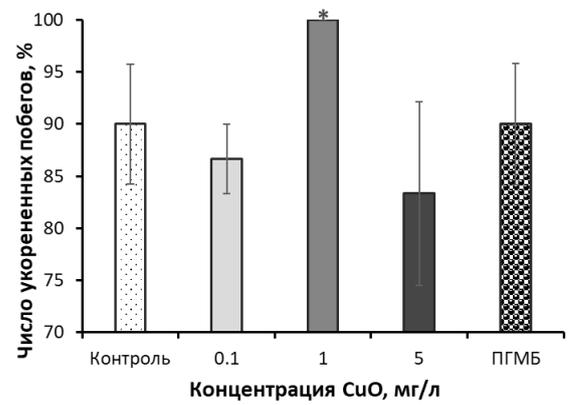
(а)



(б)

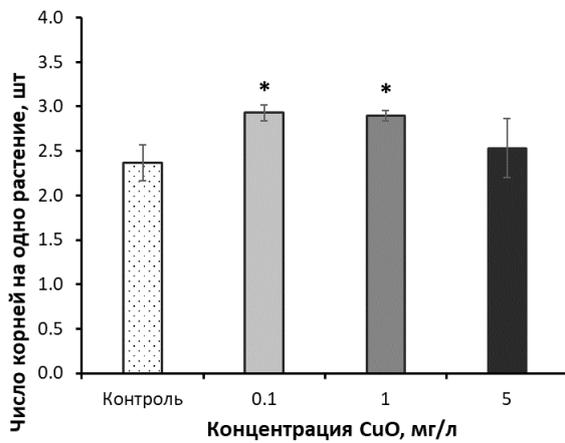


(в)

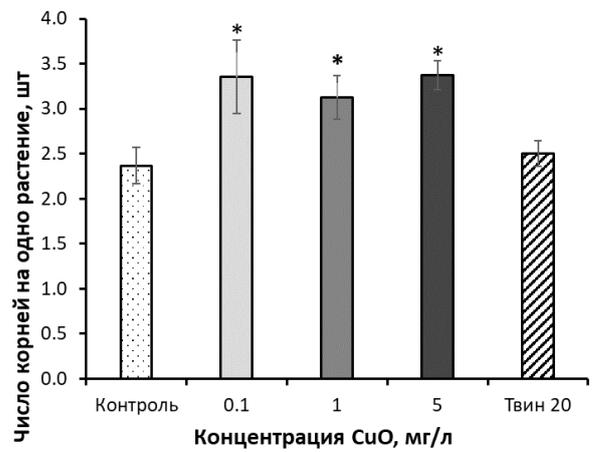


(г)

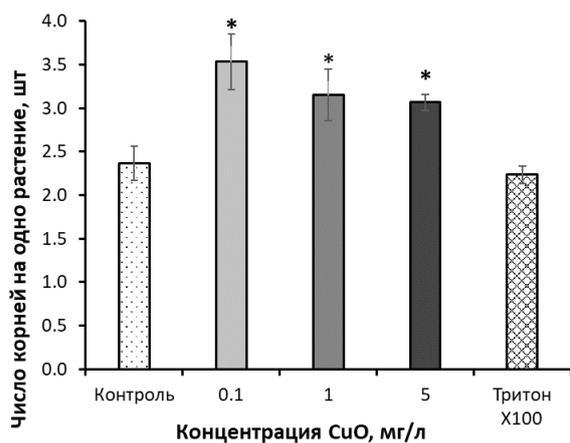
Рис. 6, Федорова и др.



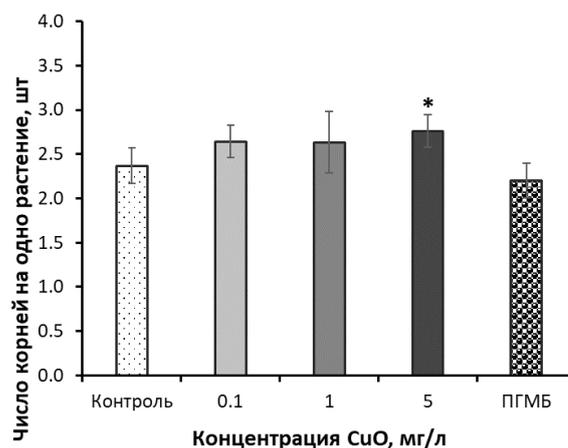
(а)



(б)



(В)



(Г)

**Рис. 7, Федорова и др.**

**Страница для переводчика**

**О. А. Fedorova\*, Т. А. Grodetzkaya, N. A. Evtushenko,**

**Р. М. Evlakov**

**THE ROLE OF COLLOIDAL SYSTEM STABILIZERS IN THE  
MANIFESTATION OF STIMULATING ACTIVITY OF COPPER OXIDE  
NANOPARTICLES TOWARDS POPLAR PLANTS IN VITRO CULTURE**

*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F.  
Morozov, 8, Timiryazeva street, Voronezh, Russia, 394087*

Nanoparticles, clonal micropropagation, poplar, copper oxide, Tween 20, Triton X100, PHMB, explant, nutrient medium, bud, shoot, root, morphogenetic capacity, BAP (6-benzylaminopurine), IAA (indole-3-acetic acid), IBA (indole-3-butyric acid), viability.

*The authors of the article express their gratitude to the Director of the Scientific and Educational Center of Ecology and Biotechnology, PhD, Associate Professor Zakharova O. V., Vice-Rector for Research of the Tambov State University named after G. R. Derzhavin, Doctor of Biological Sciences, Professor, Gusev A. A. for providing the nanoparticle dispersions, their characteristics, as well as assistance in discussing the results obtained and their analysis.*

*The study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 1023013000020-6-4.1.2 “Selection of economically valuable and climate-resistant tree crops characterized by high biological productivity and carbon sequestration potential, taking into account regional soil and climatic features for the implementation of forest climate projects (FZUR-2023-0002)”.*

## **Сведения об авторах**

**Федорова Ольга Анатольевна** – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова», 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8. Телефон: +79529572068, e-mail: fed-olga78@mail.ru

**Гродецкая Татьяна Александровна** – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова», 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8. Телефон: +79009455898, e-mail: tatyana.pokusina@yandex.ru

**Евтушенко Надежда Александровна** - ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова», 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8. Телефон: +79009455806, e-mail: nadya.evtushenko.94@mail.ru

**Евлаков Петр Михайлович** – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова», 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8. Телефон: +79204366589, e-mail: peter.evlakov@yandex.ru.