



ВЛИЯНИЕ ОКСИДА ГРАФЕНА НА РАСТЕНИЯ-РЕГЕНЕРАНТЫ ГИБРИДА ТОПОЛЬ БЕЛЫЙ × ОСИНА

Наталья С. Стрекалова¹ kotova-ns@yandex.ru, 0000-0002-6723-3074

Ольга В. Захарова^{1,2,3}, olgazakharova1@mail.ru, 0000-0001-8590-2529

Петр А. Баранчиков¹, petrovi4-98@yandex.ru, 0000-0003-0565-3724

Александр А. Гусев^{1,2,4} , nanosecurity@mail.ru, 0000-0002-8699-9112

¹ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, 392000, Россия

²ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский пр-т, 4, г. Москва, 119991, Россия

³ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», Стремянный пер., 36, г. Москва, 117997, Россия

⁴ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

В работе проведено исследование влияния оксида графена на регенеранты гибрида тополь белый × осина при переносе их в нестерильные тепличные условия при клональном микроразмножении. Показано, что суспензия наноматериала в концентрации 1,5 мкг/л стимулировала прирост высоты растений гибрида тополь белый × осина, но также увеличивала количество увядших листьев. Увеличение концентрации наноматериала до 3 мкг/л вызывало негативное влияние на проростки. Количество выживших побегов снизилось на 17 % относительно контроля, высота растений уменьшилась на 25 %. Также наблюдалось уменьшение числа листьев и адаптированных микроклонов – адаптировалось 15 % растений против 55 % в контроле. Общее состояние проростков данной группы оценивалось только на 3 балла из 5. Анализ бинакопления оксида графена в органах растений не показал выраженных очагов скопления наноматериала. Таким образом, оксид графена оказывал разнонаправленное действие на развитие проростков гибрида тополь белый × осина. Результаты исследования могут быть использованы в ходе оценки экологической безопасности графеноподобных материалов по отношению к растениям, а также для совершенствования биотехнологии клонального микроразмножения лесных культур.

Ключевые слова: оксид графена, биологическое воздействие, древесные культуры, гибрид тополь белый × осина, бионакопление

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект RFMEFI57417X0159).


Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Влияние оксида графена на растения-регенеранты гибрида тополь белый × осина / Н. С. Стрекалова, О. В. Захарова, П. А. Баранчиков, А. А. Гусев // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 2 (42). – С. 35–47. – Библиогр.: с. 42–46 (32 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/4>.



Поступила: 29.05.2021 **Принята к публикации:** 28.06.2021 **Опубликована онлайн:** 01.07.2021

EFFECT OF GRAPHENE OXIDE ON REGENERATED PLANTS OF WHITE POPLAR × ASPEN HYBRID

Natalia S. Strekalova¹, kotova-ns@yandex.ru,  0000-0002-6723-3074

Olga V. Zakharova^{1,2,3}, olgazakharova1@mail.ru,  0000-0001-8590-2529

Petr A. Baranchikov¹, petrovi4-98@yandex.ru,  0000-0003-0565-3724

Aleksandr A. Gusev^{1,2,4}  nanosecurity@mail.ru,  0000-0002-8699-9112

¹*Derzhavin Tambov State University, 33, International st., Tambov, 392000, Russian Federation*

²*National Research Technological University (MISiS), Leninsky Prospect, 4, Moscow, 119991, Russian Federation*

³*Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny per., Moscow, 117997, Russian Federation*

⁴*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev street, Voronezh, 394087, Russian Federation*

In this work, we have studied the effect of graphene oxide on the regenerants of the white poplar × aspen hybrid when they were transferred to non-sterile greenhouse conditions during clonal micropropagation. It was shown that a suspension of the nanomaterial at a concentration of 1.5 µg / L stimulated the growth of plant height in the hybrid (white poplar × aspen), but also increased the number of wilted leaves. An increase in the concentration of nanomaterial to 3 µg / L caused a negative effect on seedlings. The number of surviving shoots decreased by 17 % relative to the control, plant height decreased by 25 %. A decrease in the number of leaves and adapted microclones was also observed: 15 % of plants adapted against 55 % in the control group. The general condition of the seedlings of this group was assessed only by 3 points out of 5. Analysis of bioaccumulation of graphene oxide in plant organs has not showed pronounced foci of nanomaterial accumulation. Thus, graphene oxide had a multidirectional effect on the development of seedlings of the hybrid (white poplar × aspen). The results of the study can be used in assessing the environmental safety of graphene-like materials in relation to plants, as well as for improving the biotechnology of clonal micropropagation of forest plantations.

Keywords: graphene oxide, biological effects, woody plantations, hybrid (white poplar × aspen), bioaccumulation

Acknowledgments: The project was partially supported by the Ministry of Science and Education of Russian Federation (project RFMEFI57417X0159).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Strekalova N. S., Zakharova O. V., Baranchikov P. A., Gusev A. A. (2021) Effect Of Graphene Oxide On White Poplar × Aspen And Downy Birch Hybrid Plants In Tissue Culture. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 2 (42), pp. 35-47 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.2/4>.

Received: 29.05.2021 **Accepted for publication:** 28.06.2021 **Published online:** 01.07.2021

Введение

В настоящее время наночастицы и наноматериалы находят все большее применение в промышленных и бытовых целях, что отражается в

неуклонно увеличивающемся объеме их производства. Это сопровождается присутствием наночастиц в окружающей среде и риском потенциально неблагоприятных воздействий на природные сис-

темы. Наночастицы могут попадать в окружающую среду в течение всего жизненного цикла. Рассматриваются три возможных сценария попадания наночастиц в природные экосистемы, в том числе водные: выброс во время производства сырья и продуктов с наночастицами; высвобождение во время использования продукции нанотехнологий; выделение после захоронения продуктов, содержащих наночастицы [1, 2]. Одним из самых распространенных типов наноматериалов являются углеродные наноструктуры – наноразмерные аллотропные модификации углерода, включающие представителей нуль- (квантовые точки, фуллерены), одно- (нанотрубки) и двумерных (графены) типов наночастиц. Их применение возможно практически во всех областях промышленности, сельского хозяйства и медицины, что существенно увеличивает объемы их потенциального поступления в природные экосистемы. Благодаря большому разнообразию структур и уникальным физико-химическим свойствам, на их основе разрабатываются агенты для адресной доставки лекарств, фото- и радио- и генной терапии [3, 4], антибактериальные препараты [5], биосенсоры [6, 7], сенсоры для мониторинга загрязнений [8], адсорбенты для очистки сточных вод [9] и др.

Проблема воздействия графеноподобных материалов на растения достаточно слабо освещена в русскоязычной научной литературе [10], подавляющее большинство работ по этой теме опубликовано в зарубежных журналах.

В ряде работ показано разнонаправленное действие оксида графена на сельскохозяйственные растения [11-13], при этом часто низкие концентрации оказывают стимулирующее, а высокие – токсическое воздействие.

В нескольких исследованиях сообщалось, что производные графена могут проникать в ткани и клетки [14-19].

Несмотря на наличие работ по оценке влияния наночастиц оксида графена на растительные организмы, исследований эффектов воздействия оксида графена на древесные растения, играющие важнейшую роль в наземных экосистемах, ранее не проводилось, что обуславливает актуальность настоящего исследования. В представляемой работе

проведено исследование влияния оксида графена на регенеранты гибрида тополь белый × осина на этапе адаптации побегов к нестерильным условиям теплицы.

Материалы и методы

Синтез и характеристика наноматериала.

Наночастицы оксида графена (GO) были получены методом химической эксфолиации графита [20]. Полученный материал исследовали с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (Рамановский микроскоп Thermo DXR (Thermo Scientific, США) с лазером 532 нм при мощности 1 мВт через объектив 100х) и сканирующей электронной микроскопии (микроскоп Vega3, Tescan, Чешская Республика).

Биологическое исследование. Растения-регенеранты гибрида тополь белый × осина были получены путем клонального микроразмножения. Для асептического введения в культуру *in vitro* использовали свежесрезанные в первой декаде июня черенки с апикальными и пазушными почками. В качестве основы питательной среды для микроразмножения на этапах введения в культуру и мультипликации был взят состав питательной среды Мурасиге-Скуга [21, 22], в которую добавлялись наночастицы оксида графена в концентрации 1,5 мкг/л. На этапе укоренения использовалась среда WPM [23], также содержащая 1,5 мкг/л наночастиц. Результаты исследования влияния наночастиц оксида графена на ранних этапах клонального микроразмножения показаны в работах [24, 25].

На этапе адаптации к нестерильным тепличным условиям использовали выровненные растения, имеющие 4-5 листьев и корневую систему длиной не менее 2 см. Проростки высаживали в технологические кассеты (на 6 ячеек, высотой 5,5 см, объем ячейки – 155 мл), наполненные увлажненным почвенным субстратом. Субстрат состоял из торфа с нейтральным рН и перлита 3:1. Регенеранты культивировались в условиях парника в течение трёх недель при температуре 20-24 °С, 15-часовом фотопериоде, освещённости 4500 Люкс, относительной влажности воздуха 80-90 %. Для создания условий повышенной влажности в парнике применялась туманообразующая установка. Об-

работку проводили водными растворами, содержащими 1,5 и 3 мкг/л наночастиц, наиболее благоприятно показавшими себя на предыдущих этапах, в момент высадки и спустя 1,5 недели, путем введения препаратов под корень (100 мл раствора на ячейку). В качестве контролей использовались дистиллированная вода и ростовой стимулятор Эпин. Учёт показателей проводили по общепринятым методикам. Анализируемые показатели: количество выживших растений, количество растений адаптированных к нестерильным условиям, морфометрические параметры побегов (высота, число листьев, число увядших листьев, число дополнительных побегов, состояние по пятибалльной шкале).

Эксперимент проводился в трёхкратной повторности, количество растений в каждой из 4 групп («Контроль», «Эпин», «GO 1 мкг/л» и «GO 3 мкг/л») составляло 30, выборки имели независимый характер. Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием программы Microsoft Excel 2010 (пакет «Описательная статистика») с применением однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), достоверность различий вычислялась с помощью F-критерия Фишера при 5 %-м уровне значимости.

Анализ накопления оксида графена в растениях. Важным этапом при оценке экологической безопасности новых препаратов является анализ их бионакопления и распределения в органах растений. В данной работе анализ накопления оксида графена в тканях экспериментальных растений осуществлялся на сканирующих электронных микроскопах Neon 40 и Merlin (Carl Zeiss, Германия) с элементным анализом. Для проведения исследования навеску растительной ткани массой 250 мг растирали в охлажденной ступке в 0,5 мл дистиллированной воды. Полученный гомогенат наносили на подложку и высушивали при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

Результаты анализа образца оксида графена. Методом рамановской спектроскопии показаны основные линии, характерные для оксида графена D (1338 см^{-1}) и G (1590 см^{-1}) [26-28]. В ходе исследования методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что образец имеет пластин-

чатую структуру без каких-либо других видов частиц кристаллизованной фазы.

Влияние оксида графена на проростки гибрида тополь белый × осина. Анализ выживаемости растений регенерантов гибрида тополь белый × осина показал значительное снижение жизнеспособности побегов (-17 %) при обработке их раствором оксида графена в концентрации 3 мкг/л (рис. 1), более низкая доза наноматериала (1,5 мкг/л) не оказала влияния на регенеранты. Максимальный показатель выживаемости отмечен в варианте с эталонным стимулятором роста, прибавка составила 10 %.

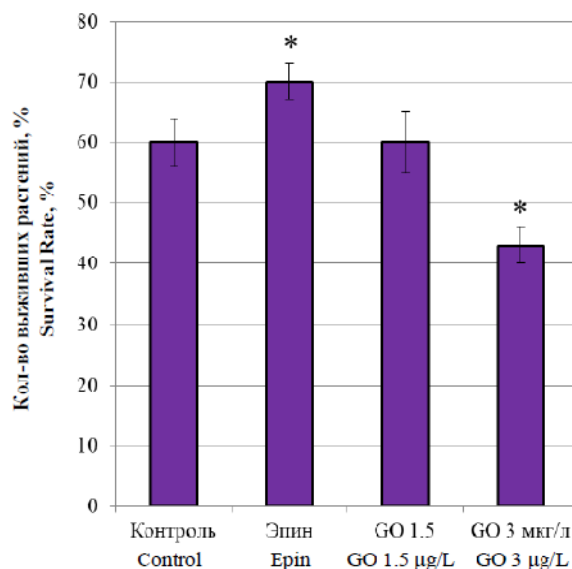


Рис. 1. Влияние оксида графена на выживаемость регенерантов гибрида тополь белый × осина
Figure 1. Effect of graphene oxide on the survival rate of regenerated hybrid poplar white × aspen

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

В ходе исследования установлено небольшое стимулирующее действие оксида графена в концентрации 1,5 мкг/л на прирост стебля (рис. 2), в данном случае высота растений увеличивалась в среднем на 0,4 см относительно контроля, схожие показатели отмечены в варианте с Эпином. Увеличение концентрации наноматериала подавляло рост побегов на 25 %.

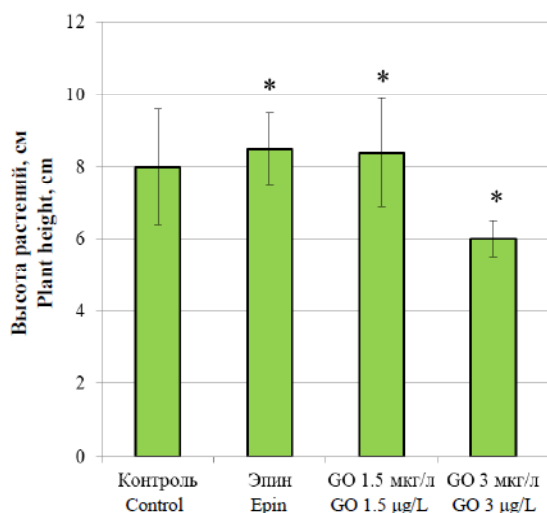


Рис. 2. Влияние оксида графена на рост регенерантов гибрида тополь белый × осина
 Figure 2. Effect of graphene oxide on the growth of regenerants of the white poplar × aspen hybrid
 Источник: собственные вычисления авторов
 Source: own calculations

Максимальное количество листьев (10 шт.) наблюдалось в группе, культивируемой с применением стимулятора роста, в этом же варианте отмечена минимальная доля увядших листьев по отношению к общему числу (рис. 3). В случае с низкой концентрацией оксида графена количество развившихся листьев достоверно не отличалось от контрольных значений, однако число увядших листьев было в 2 раза больше, чем в контрольной группе – 4 против 2. При концентрации 3 мкг/л из 4 листьев в среднем увядали 3, что говорит об ингибирующем действии наноматериала.

Стоит сказать, что на данном этапе все анализируемые показатели снижались при максимальной концентрации оксида графена. Так и количество адаптированных растений в данной группе было на 35 % меньше, чем в контрольном варианте (рис. 4). Наноматериал в дозе 1,5 мкг/л не оказал влияния на адаптируемость регенерантов к нестерильным условиям. Лучшие показатели вновь наблюдались в группе со стимулятором роста – 60 % против 50 % в контроле.

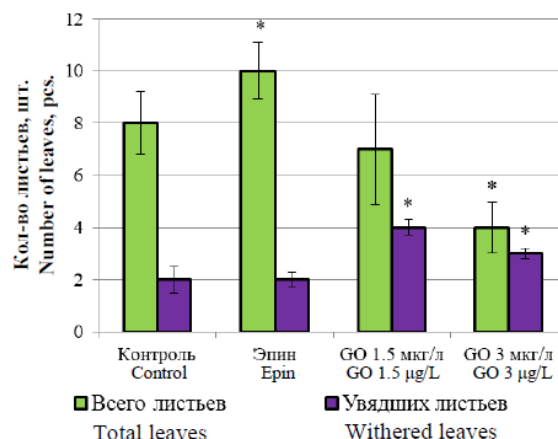


Рис. 3. Состояние вегетативных органов регенерантов гибрида тополь белый × осина

Figure 3. The state of the vegetative organs of the regenerants of the hybrid white poplar × aspen
 Источник: собственные вычисления авторов
 Source: own calculations

В ходе исследования не отмечено появления дополнительных побегов ни в одном из вариантов (табл. 1). Отличное состояние растений было только в варианте с Эпином, в контрольной и опытной (1,5 мкг/л) группах общее состояние регенерантов оценивалось на 4 балла. Худшее состояние побегов было при максимальной концентрации оксида графена – 3 балла.

По итогам исследования можно сказать, что раствор оксида графена в концентрации 1,5 мкг/л в целом не оказал существенного влияния на растения-регенеранты гибрида тополь белый × осина, в то время как при обработке растений раствором, содержащим 3 мкг/л оксида графена, отмечено негативное влияние на все анализируемые показатели. Предполагается, что токсическое действие графена связано с накоплением наноматериала в растениях и вызываемым им окислительным стрессом [29-31]. Избыточное производство H₂O₂ может вызвать существенное торможение роста растений и уменьшение биомассы [32].

Анализ накопления оксида графена в тканях растений. Исследовались растения контрольной группы и растения, обрабатываемые раствором с максимальной концентрацией наноматериала – 3 мкг/л.

Анализ накопления частиц оксида графена в корнях побегов гибрида тополь белый × осина

не выявил накопления наноматериала в корнях растений, проходящих адаптацию в среде с максимальным содержанием оксида графена (рис. 5).

При оценке бионакопления оксида графена в побегах гибрида тополь × осина также не выявлено частиц наноматериала в стеблях растений экспериментальной группы (рис. 6).

Однако, поскольку чешуйки оксида графена визуально могут быть сходны с биологическими структурами, для проверки результатов сканирующей электронной микроскопии проводилось картирование углерода в тканях растений. На рис. 7 представлены результаты картирования углерода в корнях и стеблях гибрида тополь белый × осина контрольной и опытной групп.

Как видно из представленных микрофотографий, во всех случаях углерод характеризуется равномерным распределением по всему образцу, независимо от добавления оксида графена в культивационную среду.

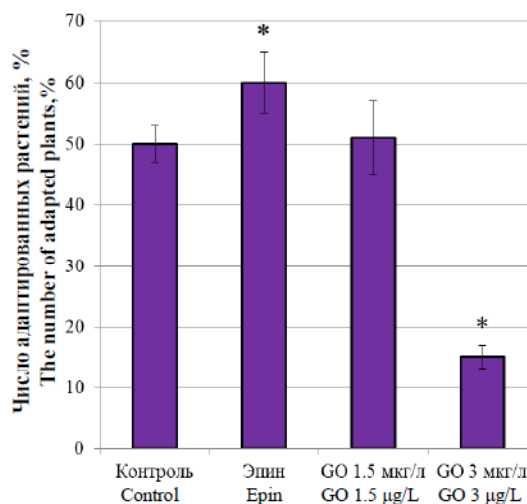


Рис. 4. Эффективность адаптации регенерантов гибрида тополь белый × осина
Figure 4. The efficiency of adaptation of regenerants of the hybrid white poplar × aspen

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Показатели эффективности адаптации микроклонов культур гибрида тополь белый × осина
Table 1

Indicators of adaptation efficiency of microclones of cultures of a hybrid white poplar × aspen

Вариант Variant	Число дополнительных побегов, шт. Number of extra shoots, pcs.	Состояние микроклонов по 5-балльной шкале Condition of microclones on a 5-point scale
Контроль Control	0	4
Эпин Epin	0	5
GO 1,5 мкг/л GO 1.5 µg/L	0	4
GO 3 мкг/л GO 3 µg/L	0	3

Источник: собственные вычисления автор(ов)
Source: own calculations

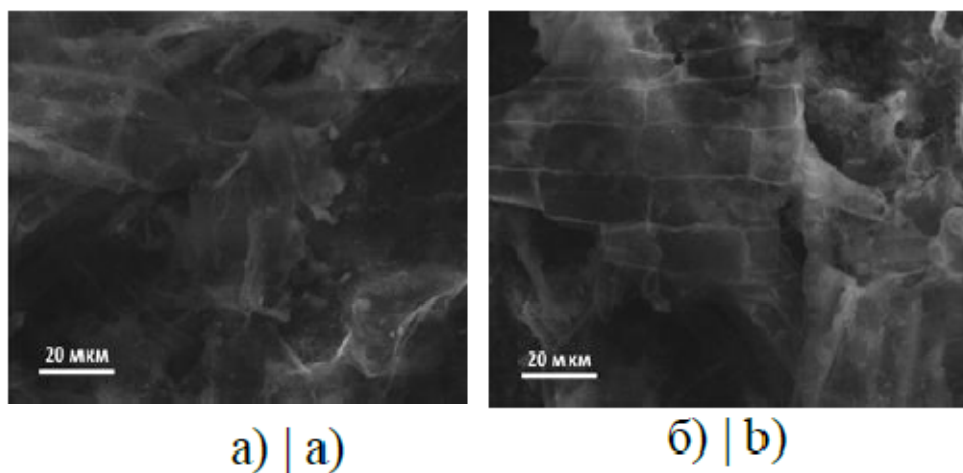


Рис. 5. Микрофотографии корня гибрида тополь белый × осина: а) контроль, б) группа 3 мкг/л
Figure 5. Micrographs of the root of a hybrid white poplar × aspen: a) control, b) group 3 μg/L

Источник: собственное исследование авторов

Source: author's study

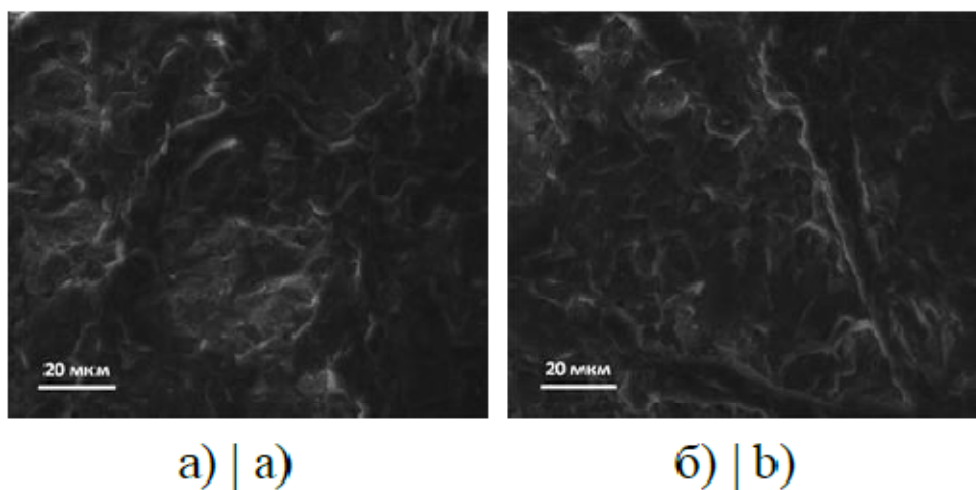


Рис. 6. Микрофотографии стебля гибрида тополь белый × осина: а) контроль, б) группа 3 мкг/л
Figure 6. Micrographs of the stem of a hybrid white poplar × aspen: a) control, b) group 3 μ/L

Источник: собственное исследование авторов

Source: author's study

Таким образом, наше исследование показало отсутствие аккумуляции оксида графена в проростках гибрида тополь белый × осина. При этом в литературе описывается проникновение этого материала в другие растения, например, в проростки гороха, через корневую систему [14,15]. Вероятно, отмеченные различия связаны с разным размером чешуек использованного наноматериала и/или с видовыми особенностями растений.

Выводы (Заключение)

Таким образом, в ходе исследования установлено положительное влияние раствора оксида графена в концентрации 1,5 мкг/л на развитие стебля гибрида тополь белый × осина, но при этом наблюдалось увеличение количества увядших листьев. Повышение концентрации наноматериала до 3 мкг/л вызывало негативное влияние на проростки. Количество выживших побегов снизилось на 17% относительно контроля, высота растений уменьшилась на 25%. Также наблюдалось умень-

шение числа листьев и адаптированных микроклонов. Анализ бинакопления оксида графена в органах растений, обработанных максимальной концентрацией оксида графена, не показал выраженных очагов скопления наноматериала.

Можно заключить, что оксид графена оказывал разнонаправленное действие на развитие про-

ростков гибрида тополь белый × осина, при этом его бионакопления в растениях не обнаружено.

Результаты исследования могут быть использованы в ходе оценки экологической безопасности графеноподобных материалов по отношению к растениям, а также для совершенствования биотехнологии клонального микроразмножения лесных культур.

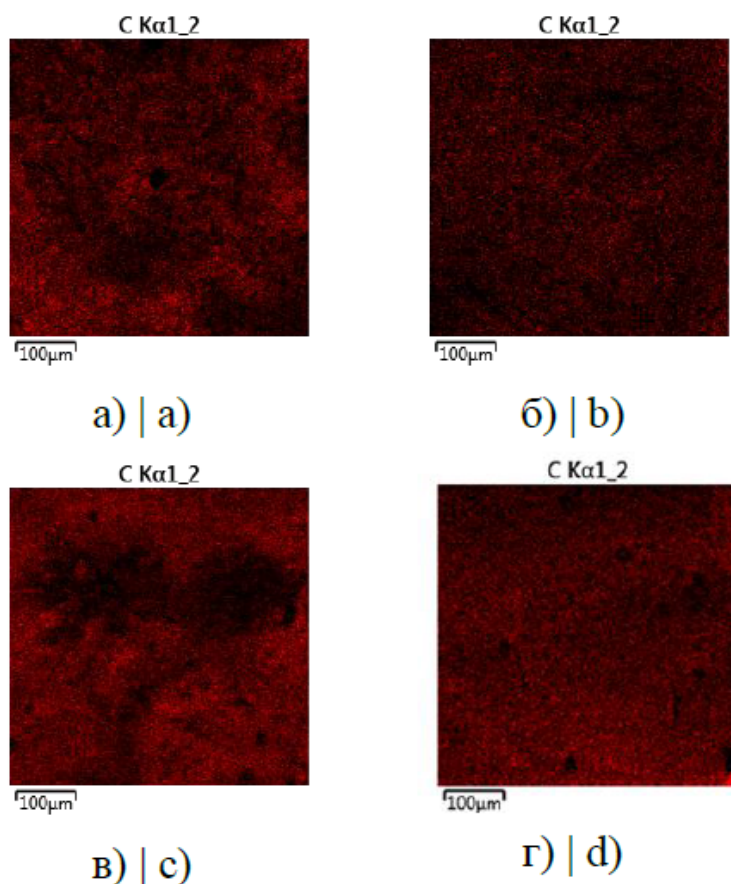


Рис. 7. Распределение углерода в тканях корня и стебля гибрида тополь белый × осина: а) корень растений контрольной группы, б) корень растений группы 3 мкг/л, в) стебель растений контрольной группы, г) стебель растений группы 3 мкг/л

Figure 7. Distribution of carbon in the tissues of the root and stem of the hybrid white poplar × aspen: a) the root of the plants in the control group, b) the root of the plants in the 3 μg/L group, c) the stem of the plants in the control group, d) the stem of the plants in the 3 μg/L group

Источник: собственное исследование авторов
Source: author's study

Список литературы

1. Jahan S., Yusoff I. B., Alias Y. B., Bakar A. F. B. A. Reviews of the toxicity behavior of five potential engineered nanomaterials (ENMs) into the aquatic ecosystem. Toxicology Reports. 2017; 4: 211-220. DOI: 10.1016/j.toxrep.2017.04.001.

2. Tolaymat T., El Badawy A., Genaidy A., Abdelraheem W., Sequeira R. Analysis of metallic and metal oxide nanomaterial environmental emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 143: 401-412. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.094.
3. Ganguly S., Ray D., Das P., (et al.) Mechanically robust dual responsive water dispersible-graphene based conductive elastomeric hydrogel for tunable pulsatile drug release. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018; 42: 212-227. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.11.028.
4. Goenka S., Sant V., Sant S. Graphene-based nanomaterials for drug delivery and tissue engineering. *Journal of Controlled Release*. 2014; 173: 75-88. DOI: 10.1016/j.jconrel.2013.10.017.
5. Zhao C., Wang X., Wu L. (et al.) Nitrogen-doped carbon quantum dots as an antimicrobial agent against *Staphylococcus* for the treatment of infected wounds. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2019; 179: 17-27. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2019.03.042
6. Joshi P., Mishra R., Narayan R. J. Biosensing applications of carbon-based materials. *Current Opinion in Biomedical Engineering*. 2021; 18: 100274. DOI: 10.1016/j.cobme.2021.100274.
7. Wang Z., Huang P., Bhirde A. (et al.) A nanoscale graphene oxide-peptide biosensor for real-time specific biomarker detection on the cell surface. *Chemical Communications*. 2012; 48: 9768-9770. DOI: 10.1039/c2cc31974h.
8. Li H-Y., Li D., Guo Y. (et al.) On-site chemosensing and quantification of Cr(VI) in industrial wastewater using one-step synthesized fluorescent carbon quantum dots. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2018; 277: 30-38. DOI: 10.1016/j.snb.2018.08.157.
9. Fallah Z., Zare E. N., Ghomi M. (et al.) Toxicity and remediation of pharmaceuticals and pesticides using metal oxides and carbon nanomaterials. *Chemosphere*. 2021; 275: 130055. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.130055.
10. Юрин В. М., Молчан О. В. Наноматериалы и растения: взгляд на проблему. Труды Белорусского государственного университета. Серия: Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем. 2015; 10 (1): 9-21.
11. Nair R., Mohamed M. S., Gao W. (et al.) Effect of carbon nanomaterials on the germination and growth of rice plants. *Journal of nanoscience and nanotechnology*. 2012; 12: 2212-2220. DOI: 10.1166/jnn.2012.5775.
12. Liu S., Wei H., Li Z. (et al.) Effects of graphene on germination and seedling morphology in rice. *Journal of nanoscience and nanotechnology*. 2015; 15: 2695-2701. DOI: 10.1166/jnn.2015.9254.
13. Zhang P., Zhang R., Fang X. (et al.) Toxic effects of graphene on the growth and nutritional levels of wheat (*Triticum aestivum* L.): Short-and longterm exposure studies. *Journal of hazardous materials*. 2016; 317: 543-551. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.06.019.
14. Park S., Kim T., Gwon Y. (et al.) Graphene-Layered Eggshell Membrane as a Flexible and Functional Scaffold for Enhanced Proliferation and Differentiation of Stem Cells. *ACS Applied Bio Materials*. 2019; 2: 4242-4248. DOI: 10.1021/acsabm.9b00525.
15. Chen L., Wang C., Yang S. (et al.) Chemical reduction of graphene enhances in vivo translocation and photosynthetic inhibition in pea plants. *Environmental science. Nano*. 2019; 6: 1077-1088. DOI: 10.1039/C8EN01426D.
16. Wang J., Wei Y., Shi X., Gao H. Cellular entry of graphene nanosheets: The role of thickness, oxidation and surface adsorption. *RSC Advances*. 2013; 3: 15776-15782. DOI: 10.1039/C3RA40392K.
17. Ratajczak K., Krazinski B. E., Kowalczyk A. E. (et al.) Ternary Interactions and Energy Transfer between Fluorescein Isothiocyanate, Adenosine Triphosphate, and Graphene Oxide Nanocarriers. *Journal of Physical Chemistry. B* 2017; 121: 6822-6830. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b04295.
18. Ratajczak K., Stobiecka M. Optical Biosensing System for the detection of survivin mRNA in colorectal cancer cells using a graphene oxide carrier-bound oligonucleotide beacon. *Nanomaterials*. 2018; 8: 510. DOI: 10.3390/nano8070510.
19. Kim J., Choi K. S., Kim Y. (et al.) Bioactive effects of graphene oxide cell culture substratum on structure and function of human adipose-derived stem cells. *Journal of biomedical materials research. Part A*. 2013; 101: 3520-3530. DOI: 10.1002/jbm.a.34659.

20. Hummers W. S., Offeman R. E. Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*. 1958; 1339. DOI: 10.1021/ja01539a017.
21. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio-assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962; 15 (3): 473-497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.
22. Trigiano R. N., Gray D. J. *Plant Development and Biotechnology*. CRC Press LLC. 2005: 358 p.
23. Lloyd G., McCown B. Commercially feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia*, by shoot tip culture. *Combined Proceedings, International Plant Propagators' Society*. 1980; 30: 421-427.
24. Zakharova O., Kolesnikova E., Muratov D. S. (et al.) Effects of graphene oxide on white poplar x aspen (*Populus alba* x *Populus tremula*) hybrid microsprouts at various growth stages. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 693: 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/693/1/012037.
25. Zakharova O., Kolesnikova E., Muratov D., Gusev A. Stimulating and toxic effects of graphene oxide on *Betula pubescens* microclones. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 595: 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012010.
26. Muzyka R., Drewniak S., Pustelny T., Chrubasik M., Gryglewicz G. Characterization of Graphite Oxide and Reduced Graphene Oxide Obtained from Different Graphite Precursors and Oxidized by Different Methods Using Raman Spectroscopy. *Materials*. 2018; 11 (7): 1050. DOI: 10.3390/ma11071050.
27. Rattana, Chaiyakun S., Wititanun N., Nuntawong N. (et al.) Preparation and characterization of graphene oxide nanosheets. *Procedia Engineering*. 2012; 32: 759-764. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.02.009.
28. Oh W-Ch., Zhang F-J. Preparation and characterization of graphene oxide reduced from a mild chemical method. *Asian Journal of Chemistry*. 2011; 23 (2): 875-879.
29. Sasidharan A., Panchakarla L. S., Chandran P. (et al.) Differential nano-bio interactions and toxicity effects of pristine versus functionalized grapheme. *Nanoscale*. 2011; 3 (6): 2461-2464. DOI: 10.1039/c1nr10172b.
30. Anjum N. A., Singh N., Singh M. K. (et al.) Single-bilayer graphene oxide sheet impacts and underlying potential mechanism assessment in germinating faba bean (*Vicia faba* L.). *Science of the Total Environment*. 2014; 472: 834-841. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.018.
31. Lee G., Kim B. S. Biological reduction of graphene oxide using plant leaf extracts. *Biotechnology Progress*. 2014; 30 (2): 463-469. DOI: 10.1002/btpr.1862.
32. Ocoy I., Paret M. L., Ocoy M. A. Nanotechnology in plant disease management: DNA-directed silver nanoparticles on graphene oxide as an antibacterial against *Xanthomonas perforans*. *ACS Nano*. 2013; 7 (10): 8972-8980. DOI: 10.1021/nn4034794.

References

1. Jahan S., Yusoff I. B., Alias Y. B., Bakar A. F. B. A. Reviews of the toxicity behavior of five potential engineered nanomaterials (ENMs) into the aquatic ecosystem. *Toxicology Reports*. 2017; 4: 211-220. DOI: 10.1016/j.toxrep.2017.04.001.
2. Tolaymat T., El Badawy A., Genaidy A., Abdelraheem W., Sequeira R. Analysis of metallic and metal oxide nanomaterial environmental emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 143: 401-412. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.094.
3. Ganguly S., Ray D., Das P., (et al.) Mechanically robust dual responsive water dispersible-graphene based conductive elastomeric hydrogel for tunable pulsatile drug release. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018; 42: 212-227. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.11.028.
4. Goenka S., Sant V., Sant S. Graphene-based nanomaterials for drug delivery and tissue engineering. *Journal of Controlled Release*. 2014; 173: 75-88. DOI: 10.1016/j.jconrel.2013.10.017.

5. Zhao C., Wang X., Wu L. (et al.) Nitrogen-doped carbon quantum dots as an antimicrobial agent against *Staphylococcus* for the treatment of infected wounds. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2019; 179: 17-27. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2019.03.042
6. Joshi P., Mishra R., Narayan R. J. Biosensing applications of carbon-based materials. *Current Opinion in Biomedical Engineering*. 2021; 18: 100274. DOI: 10.1016/j.cobme.2021.100274.
7. Wang Z., Huang P., Bhirde A. (et al.) A nanoscale graphene oxide-peptide biosensor for real-time specific biomarker detection on the cell surface. *Chemical Communications*. 2012; 48: 9768-9770. DOI: 10.1039/c2cc31974h.
8. Li H-Y., Li D., Guo Y. (et al.) On-site chemosensing and quantification of Cr(VI) in industrial wastewater using one-step synthesized fluorescent carbon quantum dots. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2018; 277: 30-38. DOI: 10.1016/j.snb.2018.08.157.
9. Fallah Z., Zare E. N., Ghomi M. (et al.) Toxicity and remediation of pharmaceuticals and pesticides using metal oxides and carbon nanomaterials. *Chemosphere*. 2021; 275: 130055. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.130055.
10. Yurin V. M., Molchan O. V. Nanomaterialy i rasteniya: vzglyad na problemu. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fiziologicheskiye, biokhimicheskiye i molekulyarnyye osnovy funkcionirovaniya biosistem*. 2015; 10 (1): 9-21 (In Russian).
11. Nair R., Mohamed M. S., Gao W. (et al.) Effect of carbon nanomaterials on the germination and growth of rice plants. *Journal of nanoscience and nanotechnology*. 2012; 12: 2212-2220. DOI: 10.1166/jnn.2012.5775.
12. Liu S., Wei H., Li Z. (et al.) Effects of graphene on germination and seedling morphology in rice. *Journal of nanoscience and nanotechnology*. 2015; 15: 2695-2701. DOI: 10.1166/jnn.2015.9254.
13. Zhang P., Zhang R., Fang X. (et al.) Toxic effects of graphene on the growth and nutritional levels of wheat (*Triticum aestivum* L.): Short-and longterm exposure studies. *Journal of hazardous materials*. 2016; 317: 543-551. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.06.019.
14. Park S., Kim T., Gwon Y. (et al.) Graphene-Layered Eggshell Membrane as a Flexible and Functional Scaffold for Enhanced Proliferation and Differentiation of Stem Cells. *ACS Applied Bio Materials*. 2019; 2: 4242-4248. DOI: 10.1021/acsabm.9b00525.
15. Chen L., Wang C., Yang S. (et al.) Chemical reduction of graphene enhances in vivo translocation and photosynthetic inhibition in pea plants. *Environmental science. Nano*. 2019; 6: 1077-1088. DOI: 10.1039/C8EN01426D.
16. Wang J., Wei Y., Shi X., Gao H. Cellular entry of graphene nanosheets: The role of thickness, oxidation and surface adsorption. *RSC Advances*. 2013; 3: 15776-15782. DOI: 10.1039/C3RA40392K.
17. Ratajczak K., Krazinski B. E., Kowalczyk A. E. (et al.) Ternary Interactions and Energy Transfer between Fluorescein Isothiocyanate, Adenosine Triphosphate, and Graphene Oxide Nanocarriers. *Journal of Physical Chemistry. B* 2017; 121: 6822-6830. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b04295.
18. Ratajczak K., Stobiecka M. Optical Biosensing System for the detection of survivin mRNA in colorectal cancer cells using a graphene oxide carrier-bound oligonucleotide beacon. *Nanomaterials*. 2018; 8: 510. DOI: 10.3390/nano8070510.
19. Kim J., Choi K. S., Kim Y. (et al.) Bioactive effects of graphene oxide cell culture substratum on structure and function of human adipose-derived stem cells. *Journal of biomedical materials research. Part A*. 2013; 101: 3520-3530. DOI: 10.1002/jbm.a.34659.
20. Hummers W. S., Offeman R. E. Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*. 1958; 1339. DOI: 10.1021/ja01539a017.
21. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio-assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962; 15 (3): 473-497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.
22. Trigiano R. N., Gray D. J. *Plant Development and Biotechnology*. CRC Press LLC. 2005: 358 p.
23. Lloyd G., McCown B. Commercially feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia*, by shoot tip culture. *Combined Proceedings, International Plant Propagators' Society*. 1980; 30: 421-427.

24. Zakharova O., Kolesnikova E., Muratov D. S. (et al.) Effects of graphene oxide on white poplar x aspen (*Populus alba* x *Populus tremula*) hybrid microsprouts at various growth stages. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019; 693: 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/693/1/012037.
25. Zakharova O., Kolesnikova E., Muratov D., Gusev A. Stimulating and toxic effects of graphene oxide on *Betula pubescens* microclones. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 595: 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012010.
26. Muzyka R., Drewniak S., Pustelny T., Chrubasik M., Gryglewicz G. Characterization of Graphite Oxide and Reduced Graphene Oxide Obtained from Different Graphite Precursors and Oxidized by Different Methods Using Raman Spectroscopy. *Materials*. 2018; 11 (7): 1050. DOI: 10.3390/ma11071050.
27. Rattana, Chaiyakun S., Wititanun N., Nuntawong N. (et al.) Preparation and characterization of graphene oxide nanosheets. *Procedia Engineering*. 2012; 32: 759-764. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.02.009.
28. Oh W-Ch., Zhang F-J. Preparation and characterization of graphene oxide reduced from a mild chemical method. *Asian Journal of Chemistry*. 2011; 23 (2): 875-879.
29. Sasidharan A., Panchakarla L. S., Chandran P. (et al.) Differential nano-bio interactions and toxicity effects of pristine versus functionalized grapheme. *Nanoscale*. 2011; 3 (6): 2461-2464. DOI: 10.1039/c1nr10172b.
30. Anjum N. A., Singh N., Singh M. K. (et al.) Single-bilayer graphene oxide sheet impacts and underlying potential mechanism assessment in germinating faba bean (*Vicia faba* L.). *Science of the Total Environment*. 2014; 472: 834-841. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.018.
31. Lee G., Kim B. S. Biological reduction of graphene oxide using plant leaf extracts. *Biotechnology Progress*. 2014; 30 (2): 463-469. DOI: 10.1002/btpr.1862.
32. Ocoy I., Paret M. L., Ocoy M. A. Nanotechnology in plant disease management: DNA-directed silver nanoparticles on graphene oxide as an antibacterial against *Xanthomonas perforans*. *ACS Nano*. 2013; 7 (10): 8972-8980. DOI: 10.1021/nm4034794.

Сведения об авторах

Стрекалова Наталья Сергеевна – старший преподаватель кафедры биохимии и фармакологии Медицинского института ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6723-3074>, e-mail: kotova-ns@yandex.ru.

Захарова Ольга Владимировна – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией перспективных химических технологий НИИ экологии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8590-2529>, e-mail: olgazakharova1@mail.ru.

Баранчиков Петр Александрович – магистрант Института естествознания ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0565-3724>, e-mail: petrovi4-98@yandex.ru.

✉ *Гусев Александр Анатольевич* – доктор биологических наук, директор НИИ экологии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8699-9112>, e-mail: nanosecurity@mail.ru.

Information about the authors

Strekalova Nataliya Sergeevna – Senior Lecturer, Department of Biochemistry and Pharmacology, Medical Institute, Derzhavin Tambov State University, Internatsionalnaya str., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6723-3074>, e-mail: kotova-ns@yandex.ru.

Zakharova Olga Vladimirovna – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Advanced Chemical Technologies, Research Institute for Environmental science and Biotechnology, Derzhavin Tambov State University, Internatsionalnaya str., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8590-2529>, e-mail: olgazakharova1@mail.ru.

Baranchikov Petr Aleksandrovich – Master's student of the Institute of Natural Sciences, Derzhavin Tambov State University, Internatsionalnaya str., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0565-3724>, e-mail: petrovi4-98@yandex.ru.

✉ *Gusev Aleksandr Anatolyevich* – Doctor of Biological Sciences, Director of the Research Institute for Environmental science and Biotechnology, Derzhavin Tambov State University, Internatsionalnaya str., 33, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8699-9112>, e-mail: nanosecurity@mail.ru.

✉ – Для контактов / Corresponding author