

В. И. Лукша, канд. биол. наук, ст. препод.
(БГТУ, г. Минск);

Л. Ф. Кабашникова, докт. биол. наук, доц.,

Л. В. Пашкевич канд. биол. наук.,

Я. Н. Артемчук, М. А. Даркович, С. С. Гордиенко

(Институт биофизики и клеточной
инженерии НАН Беларуси, г. Минск)

**ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ
СВЯЗИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ИММУННОГО СТАТУСА
РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ ИНФИЦИРОВАННЫХ
*BIPOLARIS SOROKINIANA***

Нанотехнология предлагает набор методов и процессов для производства / преобразования материалов в частицы нанометрового размера (0,1–100 нм). Наночастицы (НЧ) имеют высокое отношение поверхности к объему, что увеличивает их реактивность и возможную биохимическую активность [1]. Кроме того, наноматериалы проявляют некоторые новые свойства и эффекты, отличные от их макроформ. Например, серебро или золото не токсичны для микроорганизмов, но их наноформы подавляют микробную инфекцию [2]. НЧ имеют разную форму, могут быть сферическими, многогранными, стержневыми и т.д. и во много раз меньше, чем бактериальные клетки (1000 нм; *Escherichia coli*), споры грибов (10 000 нм; *Fusarium*), а также некоторые вирусные частицы (от 300 до 10–18 нм; TMV). Они могут быть получены химическими [3] и физическими методами [4], однако экстракты растений и микроорганизмов также могут катализировать синтез НЧ [5].

Ряд исследований показал, что НЧ серебра (AgNP) обладают дезинфицирующими свойствами в отношении различных патогенных микроорганизмов [6]. В настоящее время нанотехнологии широко применяются в растениеводстве и обладают огромным потенциалом для защиты сельскохозяйственных культур. Учитывая современный прогресс в разработке и применении наноматериалов, нанотехнологии могут оказаться очень эффективными в качестве альтернативы синтетическим фунгицидам в борьбе с возбудителями заболеваний растений, снижая дозы применения пестицидов.

Актуальным представляется выяснение характера действия НЧ серебра с разными физико-химическими свойствами на рост и развитие возбудителя гельминтоспориозной корневой гнили *Bipolaris sorokiniana* Shoem. в культуре *in vitro*, а также на параметры роста и развития проростков яровой пшеницы, инфицированных этим грибом.

В процессе исследования были использованы коммерческие препараты фирмы Nanomaterials&Technologies M9 (Россия), которые представляют собой водные растворы НЧ серебра высокого качества с использованием различных стабилизаторов: неионогенного полимера (полиэтиленгликоль, ПЭГ, 0,1%), линейного полисахарида (карбоксиметилцеллюлоза, КМЦ, 0,1%) и натурального анионного ПАВ (олеат натрия, 1 мМ). Во всех перечисленных растворах концентрация НЧ серебра составляла 500 ppm. Форма НЧ сферическая. Монодисперсность 65-75%. Препараты НЧ серебра с разными стабилизаторами различались по размерам: 12 ± 6 нм (для растворов с ПЭГ и олеатом натрия) и 30 ± 8 нм (для растворов с КМЦ).

В качестве основных показателей иммунного статуса растений, изменение которых проходит под действием биогенного стресса, были изучены параметры окислительных и фотосинтетических процессов в зеленых проростках яровой пшеницы сорта Сударыня, инфицированных грибом *Bipolaris sorokiniana*.

Полученные ранее результаты свидетельствуют о защитном действии НЧ серебра на пигментный фонд и функциональную активность хлоропластов пшеницы на фоне стабилизации окислительных процессов в клетках мезофилла листьев, судя по содержанию активных форм кислорода (АФК), активности перекисного окисления липидов (ПОЛ) и увеличению содержания низкомолекулярных антиоксидантов – фенольных соединений [7].

Известно, что ряд параметров при нормальном развитии растений, таких как окислительные процессы и состояние пигментного фонда в клетках мезофилла листьев коррелируют между собой. Результаты корреляционного анализа между параметрами, характеризующими окислительные процессы и состояние пигментного фонда растений пшеницы, обработанных НЧ серебра с последующим заражением спорами *B. sorokiniana* представлен в таблице.

Из данных таблицы можно отметить, что действие НЧ серебра стабилизировало негативное влияние фитопатогена *B. sorokiniana* на изученные процессы. Отмечена значимая положительная корреляция между суммой хлорофиллов (Хл) и содержанием каротиноидов (мг/г сырой массы) в листьях растений. Достоверная положительная корреляция показана между содержанием АФК (мкг ДХФ/ г сырой массы) и активностью ПОЛ (содержание МДА, мг/г сырой массы). Между содержанием каротиноидов (мг/г сырой массы) и фенольных соединений (мг-экв. ГК/г сырой массы) наблюдается достоверная отрицательная корреляционная зависимость на уровне ($r = - 0,52$).

Таблица – Результат расчета коэффициентов парной корреляции основных показателей иммунного статуса зараженных растений пшеницы сорта Сударыня, предварительно обработанных НЧ серебра

	АФК	Хл (<i>a+b</i>)	Каротиноиды	ПОЛ	Фенолы
АФК	1,00	0,12	0,14	0,59*	-0,07
Хл (<i>a+b</i>)	0,12	1,00	0,89**	0,36	-0,32
Каротиноиды	0,14	0,89**	1,00	0,33	-0,52*
ПОЛ	0,59*	0,36	0,33	1,00	-0,34*
Фенольные соединения	-0,07	-0,32	-0,52*	-0,34*	1,00

Примечание *– значения достоверно отличаются от контроля при $p \leq 0,05$

**– значения достоверно отличаются от контроля при $p \leq 0,01$

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что действие НЧ серебра положительно влияет на состояние пигментного фонда и окислительный статус растений пшеницы, зараженных фитопатогенным грибом *B. sorokiniana*, что проявляется в сохранении корреляционной зависимости между основными показателями естественного иммунитета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Applications of Silver Nanoparticles in Plant Protection / G. Nomita [et al.] // Springer International Publishing AG, part of Springer Nature. – 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-91161-8_9
2. Silver nanoparticles as an antibacterial agent for endodontic infections / W. Sofi, M. Gowri, G. Venkatraman [et al.] // BMC Infectious Diseases. – 2012. – Vol. 12. – No. 1. – P. 60.
3. Schmidt H. Nanoparticles by chemical synthesis, processing to materials and innovative applications // Applied Organometallic Chemistry. – 2001. – Vol. 15. – No. 5. – P. 331–343.
4. Plants in nanoparticle synthesis/ S. Iravani, H. Korbekandi, S. V. Mirmohammadi [et al.] // Reviews in Advanced Sciences and Engineering. – 2014. – Vol. 3. – No. 3. – P. 261–274.
5. Fatimah S. A. Gold and silver nanoparticles: Green synthesis, microbes, mechanism, factors, plant disease management and environmental risks // Saudi Journal of Biological Sciences. – 2021. – Vol. 28. – P. 3624–3631.
6. An *in vitro* study of the antifungal effect of silver nanoparticles on oak wilt pathogen *Raffaelea sp.* / S.W. Kim, K.S. Kim, K. Lamsal [et al.] // Journal Microbiological Biotechnology. – 2009. – Vol. 19. – No. 8. – P. 760–764.
7. Эффективность применения наночастиц серебра в качестве антимикробных агентов на растениях пшеницы на ранних этапах онтогенеза / Л.Ф. Кабашникова, В.И. Лукша, Л.В. Пашкевич [и др.] // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2024. – №3. – С. 111–122.