

УДК: 547.917+546.57

Д. В. Чикуенок, мл. науч. сотр.,
М. А. Белявская, мл. науч. сотр.,
В. В. Николайчук, асп., науч. сотр.,
К. С. Гилевская, вед. науч. сотр., канд. хим. наук
(ИХНМ НАН Беларуси, г. Минск);
Ж. Н. Калацкая, вед. науч. сотр., канд. биол. наук,
Е.В. Минчук, мл. науч. сотр.
(Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси, г. Минск)

СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТОВ АЛЬГИНАТ-СЕРЕБРО И ИЗУЧЕНИЕ ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВЛИЯНИЯ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ

Введение. За последние десятилетия нанотехнологии развиваются чрезвычайно быстро и расширяется их применение в различных отраслях, в том числе и в агропромышленном комплексе, так как актуальным является увеличение производства высококачественной сельскохозяйственной продукции с возможностью использования эффективных низкотоксичных средств защиты растений и удобрений на основе наноматериалов [1, 2].

С практической точки зрения большой интерес представляют металлополимерные наноконпозиты, поскольку включение различных металлов, в частности серебра, в их состав позволяет получать материалы с заданными свойствами [3, 4]. Наноконпозиты полисахарид-серебро являются биосовместимыми и могут обладать свойствами, присущими каждому из компонентов, в том числе возможна реализация синергетического действия [3].

Цель работы: разработка методики синтеза наноконпозитов альгинат-Ag с регулируемыми физико-химическими характеристиками и составом с использованием подходов «зеленой» химии и оценка влияния полученных наноконпозитов на физиологическое состояние растения ярового ячменя.

Экспериментальная часть. В работе использовали альгинат натрия (216 кДа, Acros Organics), нитрат серебра (AgNO_3 , $\geq 99\%$, Carl Roth, Германия), гидроксид натрия (NaOH , свежеприготовленный 0,1 н водный раствор). Синтез наноконпозитов проводили гидротермальным способом (серия Alg-Ag_AC) при 121°C и 1,5 атм., варьируя время синтеза (15, 20, 30, 45 и 60 минут для получения образцов Alg1-Ag_AC, Alg5-Ag_AC и Alg10-Ag_AC, соответственно) и концентрацию альгината натрия (1, 5 и 10 мг/мл; образцы Alg1, Alg5 и Alg10, соответственно). Температуру варьировали от 60 до 120°C .

Также использовали гидротермальный микроволновой синтез (серия Alg-Ag_MW) с использованием микроволнового лабораторного реактора Monowave 300 (Anton Paar, Австрия), при концентрации альгината натрия 1 мг/мл, варьируя температуру (80, 100 и 120 °С) и время синтеза (5-30 мин). При разработке методики синтеза варьировали количество гидроксида натрия в реакционной смеси и температуру синтеза. Спектры поглощения полученных нанокомпозитов записывали на спектрофлуориметре CM2203 (Solar, Беларусь) в кварцевой кювете с длиной оптического пути 1 см при 20-кратном разбавлении водой.

Яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорт Добры Р-1 выращивали в лабораторных условиях в почвогрунте. На шестые сутки прорастания (появление второго листа) проводили обработку растений нанокомпозитами альгинат-серебро путем опрыскивания. В опыте использовали нанокомпозиты альгинат-Ag 1 (CAlg=0,88 мг/мл; CAgNO₃=0,3 мг/мл) с соотношением альгинат-серебро 3:1, альгинат-Ag 5 (CAlg=4,41 мг/мл; CAgNO₃=0,3 мг/мл) с соотношением альгинат-серебро 15:1 и альгинат Ag-10 (CAlg=8,81 мг/мл; CAgNO₃=0,3 мг/мл) с соотношением альгинат-серебро 30:1, разведенные в 10, 50 и 100 раз. Определяли длину побегов, накопление сырой и сухой биомассы листьями, содержание фотосинтетических пигментов.

Результаты и обсуждение.

Варьируя концентрацию NaOH (0 – 300 мкл) при синтезе нанокомпозитов и контролируя полноту восстановления ионов серебра спектрофотометрически, установлено оптимальное количество щелочи в реакционной смеси – 35 мкл 0,1 н раствора NaOH на 1 мл альгината натрия, обеспечивающее получение нанокомпозитов альгинат-серебро с максимальной концентрацией Ag⁰.

При синтезе наночастиц серебра в матрице альгината натрия под действием микроволнового излучения интенсивность и ширина пика ППР, а также длина волны максимума поглощения зависят от концентрации полисахарида в реакционной смеси (рисунок 1). Так, с увеличением концентрации альгината натрия от 1 до 10 мг/мл наблюдается уменьшение площади пика от 90,4 до 77,0 нм², его уширение от 44,9 до 76,2 нм и батохромный сдвиг максимума поглощения от 396 до 405 нм, что свидетельствует об укрупнении частиц и увеличении полидисперсности полученных гидрозолей.

Установлено, что максимальная степень восстановления катионов серебра альгинатом натрия достигается при проведении синтеза в течение 60 минут (рисунок 1). Рассчитаны значения констант скорости реакций восстановления катионов серебра альгинатом натрия в диапазоне 30-60 минут – $(1,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, $(1,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $(1,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ для

образцов Alg1-Ag_AC, Alg5-Ag_AC и Alg10-Ag_AC соответственно.

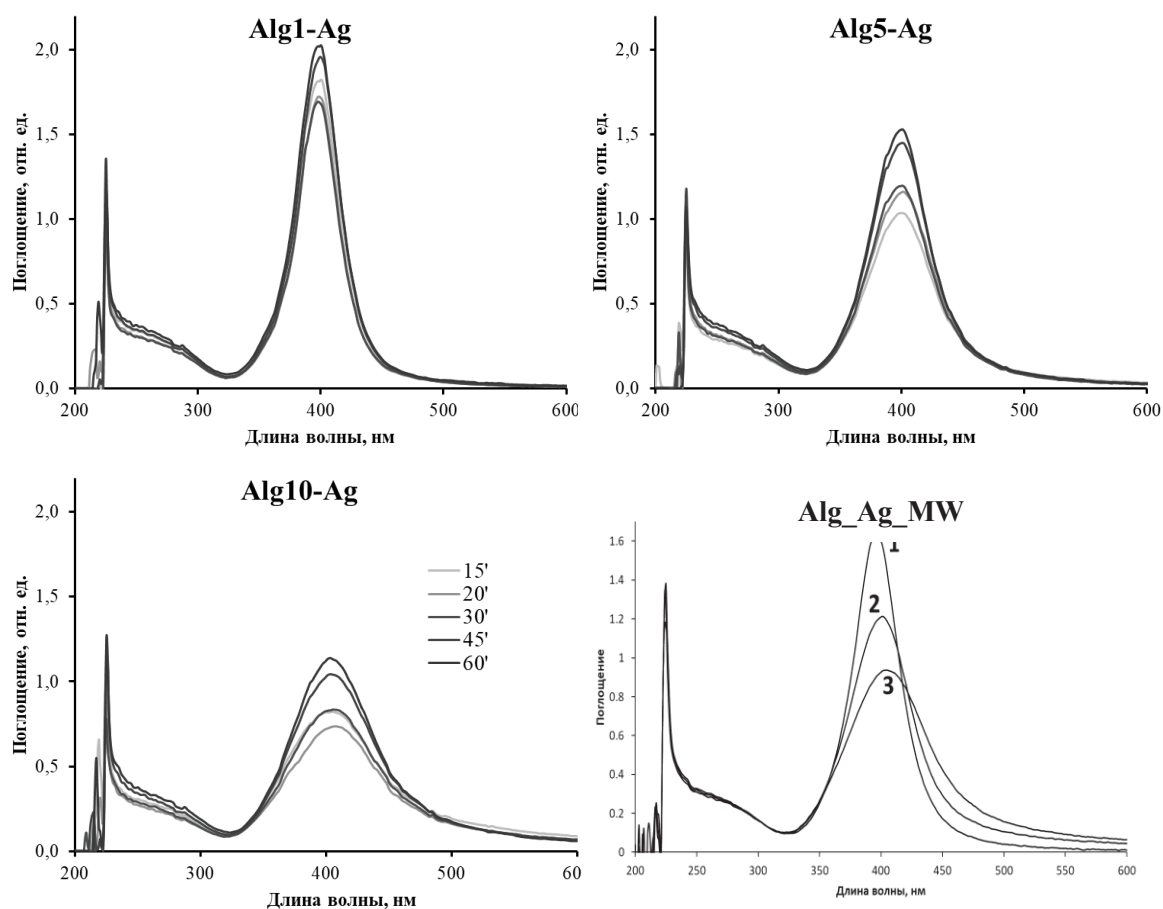


Рисунок 1 – Спектры поглощения нанокompозитов Alg1-Ag_AC, Alg5-Ag_AC и Alg10-Ag_AC, время синтеза от 15 до 60 минут, и нанокompозитов, синтезированных при исходной концентрации альгината натрия Alg1 (1), Alg5 (2) и Alg10 (3) мг/мл под действием микроволнового излучения

Анализ образцов полученных гидротермальным микроволновым синтезом установлено, что при температурах 100 и 120°C максимальное восстановление катионов серебра происходит в течение первых 5 минут (рисунок 2). Константа скорости реакции при температуре 80°C составила $(1,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$.

Обработка листьев растений ячменя нанокompозитами не оказала существенного влияния на длину и сырую массу побегов, однако альгинат-Ag1 и альгинат-Ag5, разведенные в 10 и 100 раз увеличивали сухую биомассу листьев. Уменьшение содержания фотосинтетических пигментов наблюдалось в варианте альгинат-Ag5 с разведением в 10 раз, в то же время альгинат-Ag10 с разведением в 10 раз способствовал увеличению содержания фотосинтетических пигментов, в отдельных выявлены изменения в соотношении хлорофиллов.

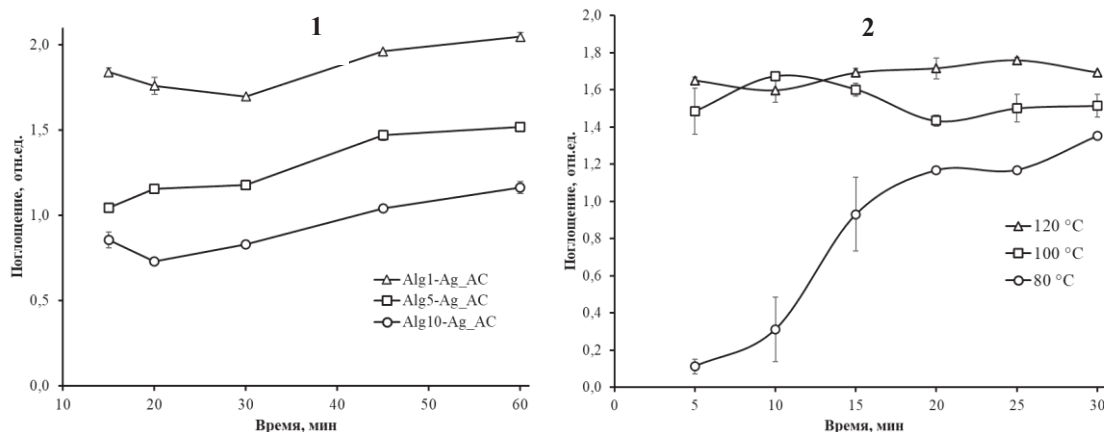


Рисунок 2 – Зависимости интенсивности поглощения максимума пика ПНР нанокompозитов Alg-Ag_AC (1) и Alg1-Ag_MW (2) от времени синтеза

Таким образом, обработка листовой поверхности ячменя нанокompозитами альгинат-серебро при разведении от 10 до 100 раз не оказывает токсичного действия на растения, альгинат-Ag 10 при разведении в 10 раз проявил стимулирующее действие увеличивая содержание фотосинтетических пигментов в листьях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусский
Республиканский Фонд фундаментальных исследований
(договор Б25В-003/01 и Б25В-003).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Pérez-de-Luque, A. Interaction of Nanomaterials with Plants: What Do We Need for Real Applications in Agriculture? / A. Pérez-de-Luque // *Frontiers in Environmental Science*. – 2017. – Vol. 5 – P. 12.
2. Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review / L. R. Khot, S. Sankaran, J. M. Maja [et al.] // *Crop Protection*. – 2012. – Vol. 35 – P. 64–70.
3. Alginate coated biogenic silver nanoparticles for the treatment of *Pseudomonas* infections in rainbow trout / V. Kulikouskaya, V. Nikalaichuk, K. Hileuskaya [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2023. – Vol. 251 – P. 126302.
4. New insights into chitosan-Ag nanocomposites synthesis: Physico-chemical aspects of formation, structure-bioactivity relationship and mechanism of antioxidant activity / K. Hileuskaya, A. Kraskouski, A. Ihnatsyeu-Kachan [et al.] // *International Journal of Biological Macro-molecules*. – Vol. 300, – 2025. – P. 40077.