

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 5 (71). 2019. № 3. С. 226–235.

УДК 544.7

СИНТЕЗ НОВОГО НАНОБИОКОМПЗИТА СЕЛЕНА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РОСТ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ВОДНОГО И СОЛЕВОГО СТРЕССОВ

Панов Д. А., Юркова И. Н., Омельченко А. В.

*Таврическая академия (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: nanosilver@rambler.ru*

Разработан способ получения нового биологически активного препарата на основе водорастворимого альгинат-хитозанового полиэлектролитного комплекса и наночастиц селена, полученных путем восстановления селенита натрия аминокислотой L-цистеином. Агрегативная устойчивость нанобиокомпозиата сохранялась в течение четырех месяцев.

Установлено, что полученный препарат наноразмерного селена повышает устойчивость проростков пшеницы к засухе и засолению.

Ключевые слова: альгинат натрия, хитозан, наноселен, полиэлектролитный комплекс, L-цистеин, селенит натрия, пшеница, стресс.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в нашей стране и за рубежом возросло внимание к медико-биологическим свойствам микроэлемента селена. Он входит в состав многих ферментов, в частности, глутатионпероксидазы, которая нейтрализует активные формы кислорода и свободные радикалы в живых клетках. Недостаток селена в почвах и воде вызывает заболевания, связанные с окислительным стрессом в клетках животных и человека. Работы по исследованию и влиянию разных форм селена на рост и развитие растений начали активно проводиться в конце XX–начале XXI веков [1–4]. Большинство имеющихся научных исследований посвящено изучению стимуляции селеном урожайности или обогащению им культурных растений. Известны работы по влиянию ионных форм селена на устойчивость растений к засухе [4, 5]. Установлено положительное действие низких концентраций селена при обработке семян сельскохозяйственных культур на их продуктивность и адаптацию к стрессам. Один из механизмов адаптогенного действия селена связан с его участием в антиоксидантной системе защиты клеток [3, 6]. В ряде работ изучалось влияние селена на рост и развитие проростков озимой пшеницы и возможность повышения устойчивости растений к неблагоприятным факторам среды. Полученные результаты позволяют говорить о возможности

использования селена на ранних этапах развития озимой пшеницы в качестве стимулирующего экзогенного фактора [5, 7].

Согласно литературным данным, в основном, селен применяется в токсичной форме (селенит-, селенат-ионы), он вносится в почву или используется для замачивания семян [4–8]. В отличие от ионных форм высокодисперсный элементарный селен менее токсичен и обладает пролонгированным действием [9–11]. Показано, что стабилизированные частицы селена с размером 20–60 нм полностью сохраняют спектр биологической активности ионного селена, а, именно, стимулируют синтез селеносодержащих ферментов, но при этом в несколько раз менее токсичны, чем селенит натрия [12]. Наибольшей биодоступностью для растений обладают наночастицы, полученные методом «зеленой химии», когда в их синтезе используют вещества биологического происхождения. В качестве стабилизаторов наночастиц применяют природные полисахариды (альгинат, хитозан, арабиногалактан и другие), имеющие в своем составе различные функциональные группы. Полисахариды проявляют высокую эффективность в качестве полимерных матриц, стабилизирующих наночастицы, препятствуя их агрегации. Использование наночастиц селена (20–50 нм), стабилизированных биополимером морских водорослей – альгинатом натрия, стимулировало ростовую активность пшеницы, увеличивая энергию прорастания и всхожесть семян, а также накопление биомассы [13–15].

Биологическая активность наночастиц зависит от способа их получения и стабилизаторов, предотвращающих агрегацию частиц. Поэтому понятен интерес ученых к поиску новых биополимеров-стабилизаторов, обеспечивающих длительную устойчивость частиц. В литературе последних лет наблюдается рост публикаций по изучению и применению нового класса биополимеров – полиэлектролитных комплексов (ПЭК), разноименно заряженных полисахаридов. ПЭК биополимеров зачастую обладают другими физико-химическими свойствами. Использование их позволяет получать частицы меньших размеров, агрегативно устойчивых в течение длительного времени. В различных областях медицины, фармакологии, промышленности в качестве стабилизаторов широко применяются биоразлагаемые альгинат-хитозановые комплексы. Они образуются за счет электростатических взаимодействий между карбоксильными группами альгината натрия и аминогруппами хитозана, а также за счет водородных связей между молекулами [16–18]. В литературе отсутствуют данные об использовании альгинат-хитозановых комплексов в качестве стабилизаторов наночастиц селена.

Целью настоящей работы явилось изучение влияния водорастворимого альгинат-хитозанового полиэлектролитного комплекса на процесс формирования и устойчивость наночастиц селена и рост пшеницы в условиях водного и солевого стрессов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для получения элементарного селена в растворе были использованы селенит натрия (х.ч.) и аминокислота L-цистеин («Synex Pharma», Китай). Стабилизацию наночастиц селена осуществляли растворами биополимеров: низковязкий альгинат

натрия («BioPolymer», Норвегия) и водорастворимый хитозан со степенью дезацетилирования около 75 % (ЗАО «Биопрогресс», Россия). Ранее экспериментально были определены некоторые характеристические свойства этих полисахаридов. Вискозиметрическим методом определяли средневязкостные молекулярные массы: для альгината натрия она равна 150 кДа, для хитозана – 10 кДа. Потенциометрическим методом определяли содержание функциональных групп: свободные карбоксильные группы в альгинате натрия составляли 12,6 %, а содержание аминогрупп в хитозане – 6 %. Согласно ранее проведенным исследованиям, водорастворимый альгинат-хитозановый ПЭК (рН ≈ 7) образуется при эквимольных соотношениях функциональных групп (карбоксильных- и аминогрупп) в растворах этих полимеров (хитозан:альгинат), равному 1:9 [18].

Нанобиокомпозиты селена и альгинат-хитозанового комплекса готовили следующим образом: к раствору альгината натрия (0,5–2,5 г/л) прибавляли рассчитанную навеску хитозана 0,05–0,25 г/л и перемешивали на магнитной мешалке. К полученной смеси добавляли цистеин (0,31 г/л) и селенит натрия (0,11 г/л). Все тщательно перемешивали в течение 30 минут. Концентрация селена оставалась постоянной и соответствовала 0,05 г/л, а менялась концентрация полисахаридов. Соотношения массовых концентраций (г/л) наноселена и полиэлектролитного комплекса (в пересчете на альгинат) находились в пределах 0,1–0,01. В результате окислительно-восстановительной реакции образовывался коллоидный раствор нанобиокомпозита селена красного цвета.

Вискозиметром Оствальда ($d = 0,73$ и $0,56$ мм) определяли относительные вязкости полученных биокомпозитов. Измерение проводили так, чтобы истечение растворителя составляло около 100 сек. На иономере АНИОН 4154 (с комбинированным стеклянным электродом «Эком-рН-ком», $\Delta pH = \pm 0,01$) измеряли значения рН. Оптическую плотность индивидуальных веществ (альгинат натрия, хитозан, селенит натрия и L-цистеин), смесей альгината с хитозаном и наноселена с альгинат-хитозановым комплексом измеряли на псевдо-двухлучевом сканирующем спектрофотометре Shimadzu UV-1280 (Япония) в интервале длин волн $\lambda = 210$ – 700 нм. Контроль агрегативной устойчивости наночастиц селена осуществляли спектрофотометрическим методом по изменению оптической плотности, относительной вязкости и рН. Растворы сохраняли в закрытых колбах при комнатной температуре не на прямом солнечном свете. Через каждые 7–8 дней в течение пяти месяцев отбирали пробы, измеряли относительную вязкость и рН растворов, затем после разбавления их в два раза проводили определение оптической плотности.

Для исследования протекторного действия нанобиокомпозита селена в условиях водного и солевого стрессов семена озимой пшеницы сорта «Жнея» замачивали в растворах с концентрацией 5,0; 10,0; 20,0 и 30,0 мг/л (по селену). Время экспозиции семян составляло 4 часа. Контролем служили семена, замоченные в течение 4 часов в дистиллированной воде. Для исследования в чашки Петри помещали фильтровальную бумагу, увлажненную дистиллированной водой (контроль), 5 % раствором ПЭГ-6000 (водный стресс) или 100 мМ раствором NaCl (солевой стресс). Семена проращивали в климатической камере Binder (Германия)

при температуре 24 °С. Объем выборки составлял 50 семян в трехкратной повторности. На 7 сутки определяли массу сухого вещества побегов и корней.

Биомассу корней и надземной части проростков измеряли гравиметрическим методом, фиксируя растительный материал в течение 5 мин. при 110 °С, доводя его до постоянной массы при 60 °С.

Биологические эксперименты проводили в 3-кратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов проводили по Г. Ф. Лакину [19], в таблицах представлены средние арифметические значения и их стандартные ошибки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментально было установлено, что наноселен с альгинат-хитозановым комплексом в интервале массовых соотношений (г/л) Se/Alg = 0,1–0,01 образует устойчивые растворы, так как в течение четырех месяцев не происходило никаких заметных изменений в системе (образование осадка или помутнения). При получении наночастиц и исследовании их физико-химических свойств анализируются прежде всего спектры поглощения, поскольку они несут в себе информацию о размере частиц, распределении их по размерам, степень их агрегации. На рис. 1 представлены спектры поглощения (в диапазоне $\lambda = 200$ –500 нм) растворов элементарного селена с полиэлектролитным комплексом с массовыми соотношениями Se/Alg = 0,02 и 0,08.

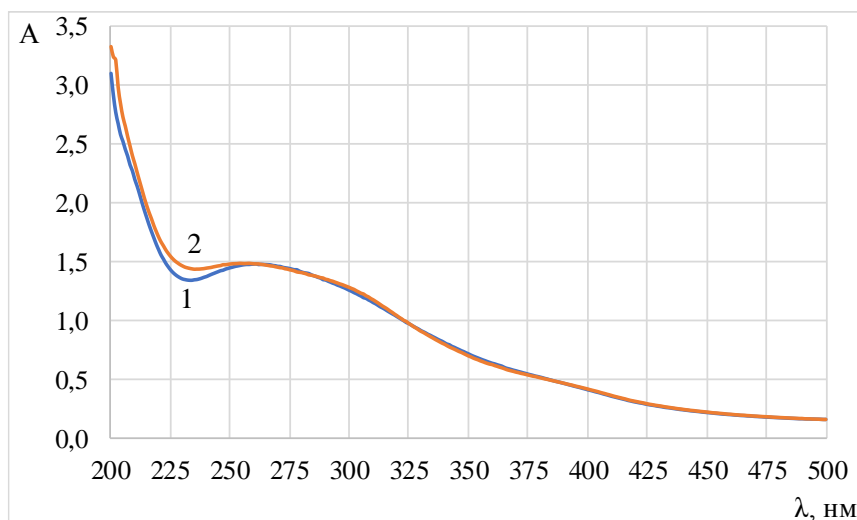


Рис. 1. Зависимость оптической плотности раствора нанобиокомпозита селена от длины волны.

1 – Se/Alg = 0,08.

2 – Se/Alg = 0,02.

Следует отметить, что в исследуемом диапазоне индивидуальные вещества (альгинат, хитозан, селенит натрия, L-цистеин) и водорастворимый альгинат-

хитозановый комплекс не поглощают кванты света. Появление характеристического пика поглощения раствора нанобиоконпозита в области 250–260 нм можно объяснить наличием наноселена в растворе с диаметром частиц 20–50 нм [18].

Положение, интенсивность и форма характеристической полосы поглощения наночастиц зависят от их размера, типа стабилизации и свойств окружающей жидкой среды. Концентрация стабилизатора оказывает существенное влияние на агрегативную устойчивость наночастиц. При изучении влияния альгинат-хитозанового комплекса на агрегативную устойчивость наноселена были приготовлены ряд растворов с различными массовыми соотношениями Se/Alg: 0,02; 0,04; 0,06; 0,08. Концентрация наноселена была постоянной во всех случаях, а концентрация смеси полисахаридов менялась. Затем проводили измерения оптической плотности полученных растворов при длине волны $\lambda = 250$ нм, относительной вязкости и рН через определенные промежутки времени в течение пяти месяцев. На основании проведенных исследований (Рис. 2) было установлено, что в течение четырех месяцев наблюдается стабильное состояние наноселена, так как в течение всего периода не наблюдалось изменения оптической плотности. Что касается величин относительной вязкости и рН, их значения несколько снизились.

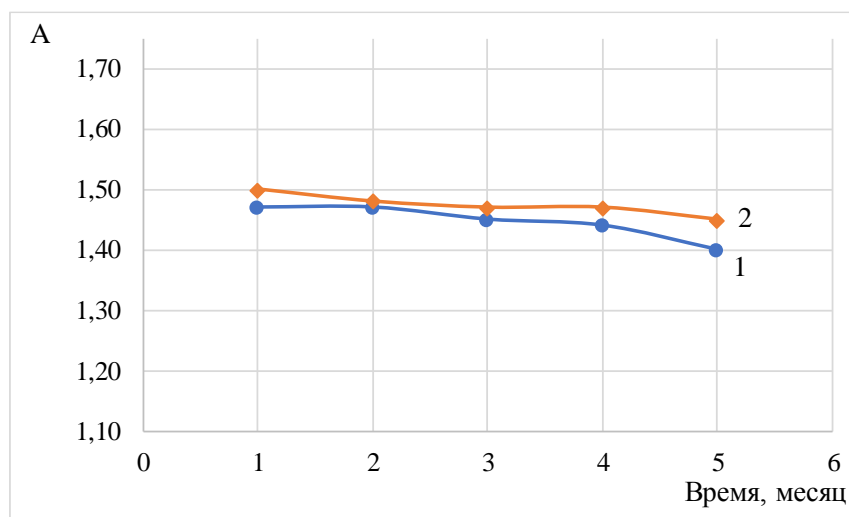


Рис. 2. Характеристика агрегативной устойчивости наночастиц селена в смеси с альгинат-хитозановым ПЭК во времени ($\lambda = 250$ нм).

1 – Se/Alg = 0,08.

2 – Se/Alg = 0,02.

Агрегативная устойчивость наночастиц селена в присутствии водорастворимого альгинат-хитозанового ПЭК можно объяснить гидрофобной адсорбцией биополимеров на поверхности наночастиц и, соответственно, гидрофилизацией их поверхности за счет ионизированных групп альгината и хитозана, а гидрофильные коллоиды в водных растворах более стабильны.

Полученный нанобиокомпозит селена проявлял высокую антистрессовую активность у 7-дневных проростков пшеницы при моделировании стресса засухи и засоления (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Влияние обработки семян пшеницы наноконпозицией селена на накопление биомассы 7-дневных проростков в условиях водного стресса
($\bar{x} \pm S\bar{x}$)

Вариант опыта	Масса сухого вещества			
	корни, мг	побеги, мг	корни, %	побеги, %
Контроль (без наноселена, 100 мМ NaCl)	4,62±0,15	8,06±0,33	100,0	100,0
Наноселен 5,0 мг/л (100 мМ NaCl)	4,88±0,21	8,55±0,35	105,6	106,0
Наноселен 10,0 мг/л (100 мМ NaCl)	4,92±0,23	8,91±0,37	106,5	110,5
Наноселен 20,0 мг/л (100 мМ NaCl)	5,63±0,22	9,50±0,35	113,2	117,9
Наноселен 30,0 мг/л (100 мМ NaCl)	5,20±0,21	9,43±0,38	105,7	117,0

Таблица 2

Влияние обработки семян пшеницы наноконпозицией селена на накопление биомассы 7-дневных проростков в условиях солевого стресса
($\bar{x} \pm S\bar{x}$)

Вариант опыта	Масса сухого вещества			
	корни, мг	побеги, мг	корни, %	побеги, %
Контроль (без наноселена, 5 % ПЭГ-6000)	4,55±0,14	7,65±0,31	100,0	100,0
Наноселен 5,0 мг/л (5 % ПЭГ-6000)	4,80±0,20	8,65±0,36	105,5	113,1
Наноселен 10,0 мг/л (5 % ПЭГ-6000)	4,93±0,21	9,54±0,35	108,4	124,7
Наноселен 20,0 мг/л (5 % ПЭГ-6000)	5,45±0,23	9,93±0,37	119,8	129,8
Наноселен 30,0 мг/л (5 % ПЭГ-6000)	5,33±0,22	9,57±0,36	117,1	125,1

Предварительное замачивание семян в растворах наночастиц селена значительно уменьшало отрицательное воздействие 100 мМ NaCl на ростовую активность проростков по сравнению с контрольным опытом (без селена). Прирост массы сухого вещества корней и надземной части проростков увеличивался на 5,6–13,2 % и 6,0–17,9 % соответственно. Из приведенных результатов видно, что максимальный эффект наблюдался при концентрации наноселена 20,0 мг/л (табл. 1). Это хорошо согласуется с ранее полученными результатами стимуляции роста и стрессоустойчивости пшеницы при использовании нанобиокомпозиции селена, стабилизированного альгинатом натрия [14, 20].

Такая же зависимость наблюдалась и при моделировании водного стресса (табл. 2). Однако эффективность обработки семян наноселеном в этом случае было значительно выше, чем при солевом стрессе. Прирост массы сухого вещества корней и побегов увеличивался на 5,5–19,8 % и 13,1–29,8 % соответственно по сравнению с контролем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получен биологически активный препарат на основе водорастворимого элементарного селена в матрице альгинат-хитозанового ПЭК с высокой агрегативной устойчивостью в течение четырех месяцев.
2. Обработка семян пшеницы нанобиокомпозитом селена уменьшала отрицательное воздействие водного и солевого стрессов на прирост сухого вещества корней и надземной части проростков на 5,5–19,8 % и 6,0–29,8 % соответственно по сравнению с контролем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Совета Министров Республики Крым в рамках научного проекта № 19-44-910003 р а «Исследование закономерностей влияния наноконпозиции селена на стрессоустойчивость пшеницы в условиях комбинированного действия засоления и засухи».

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Спектральные метода анализа» ФГАОУ ВО КФУ им. В. И. Вернадского».

Список литературы

1. Громова О. А. Впечатляющие итоги и перспективы применения / О. А. Громова, И. В. Гоголева // Медицина неотложных состояний. – 2010. – Т. 6, № 31 – С. 124–128.
2. Голубкина Н. А. Селен в медицине и экологии / Н. А. Голубкина, А. В. Скальный, Я. А. Соколов [и др.] // М.: КМК, 2006. – 136 с.
3. Скрыпник Л. Н. Микроэлемент селен и антиоксидантный статус растительной пищи / Л. Н. Скрыпник, Г. Н. Чупахина // Вестник Балтийского ФУ им. Канта. – 2007. – № 7. – С. 73–78.
4. Hasanuzzaman M. Selenium pretreatment upregulates the antioxidant defense and methylglyoxal detoxification system and confers enhanced tolerance to drought stress in rapeseed seedlings / M. Hasanuzzaman, M. Fujita // Biol. Trace Elem. Res. – 2011. – Vol. 143. – P. 1758–1776.

5. Головацкая И. Ф. Влияние селенита и селената натрия на рост и продуктивность пшеницы Иргина в зависимости от способов обработки / И. Ф. Головацкая, Ю. М. Кулагина, А. В. Крахалева // Вестник ТГПУ (TSPU Bulletin). – 2012. – № 7 (122). – С. 111–115.
6. Вихрева В. А. Влияние селена на активность антиоксидантной системы растений / В. А. Вихрева, Т. Б. Лебедева, Г. В. Клеменова // Агрономия: Нива Поволжье. – 2019. – №1. – С. 1–3.
7. Щукин В. Б. Селен как экзогенный стимулирующий фактор в начальный период роста и развития растений озимой пшеницы / В. Б. Щукин, А. А. Громов, Н. В. Щукина // Известия ОГАУ. – 2005. – № 3. – С. 107–110.
8. Turakainen M. Effects of selenium treatments on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and concentrations of soluble sugars and starch / M. Turakainen, H. Hartikainen, M. M. Seppänen // J. Agric. Food Chem. – 2004. – Vol. 52. – P. 5378–5382.
9. Храмов А. Г. Новый биологически активный препарат на основе наночастиц селена / А. Г. Храмов, А. В. Серов, В. П. Тимченко [и др.] // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2010. – № 4. – С. 122–125.
10. Никонов И. Н. Влияние наноразмерного селена на рост сельскохозяйственно-значимых культур / И. Н. Никонов, А. И. Иванов, Л. В. Коваленко, Г. Э. Фоллик // Перспективные материалы. – 2009. – № 4. – С. 54–57.
11. Юркова И. Н. Влияние наночастиц селена и селенита натрия на рост и развитие растений пшеницы / И. Н. Юркова, А. В. Омельченко // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2015. – Т. 1 (67), № 3. – С. 99–106.
12. Zhang J. S. Biological effects of a nano red elemental selenium / J. S. Zhang, X. Y. Gao, L. D. Zhang, Y. P. Bao // BioFactors. – 2001. – Vol. 15. – P. 27–38.
13. Карпова Е. А. К вопросу о токсичности препаратов на основе наноселена / Е. А. Карпова, О. К. Демиденко, О. П. Ильина // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 14. – С. 207–210.
14. Юркова И. Н. Защитно-стимулирующие свойства наноселена при инкрустации семян пшеницы / И. Н. Юркова, А. В. Омельченко // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2016. – Т. 2(68), № 2. – С. 79–85.
15. Панов Д. А. Получение и свойства нанобиокомпозиата селена и альгината натрия / Д. А. Панов // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология, химия. – 2017. – Т. 3(69), № 1. – С. 91–98.
16. Бровко О. С. Гели полиэлектролитных комплексов на основе альгината натрия и хитозана / О. С. Бровко, И. А. Паламарчук, Н. А. Вальчук // Журнал физической химии. – 2017. – Т. 91, № 8 – С. 1420–1425.
17. Максимова С. Н. Перспективы охлаждения гидробионтов льдом с использованием хитозана и его полиэлектролитных комплексов / С. Н. Максимова, С. Ю. Суровцева, Е. В. Федосеева [и др.] // Известия ТИНРО. – 2016. – Т. 186 – С. 231–237.
18. Панов Д. А. Влияние хитозана на физико-химические свойства альгината натрия / Д. А. Панов // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология, химия. – 2018. – Т. 4 (70), № 4 – С. 311–319.
19. Лакин Г. Ф. Биометрия / Г. Ф. Лакин. – М.: Высш. шк., 1990. – 352 с.
20. Юркова И. Н. Наноселен как индуктор солеустойчивости зерновых и декоративных культурных растений / И. Н. Юркова, А. В. Омельченко, Е. С. Пидгайная // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2017. – Т. 3(69), № 2. – С. 215–222.

SYNTHESIS OF A NEW SELENIUM NANOBIOCOMPOSITE AND ITS INFLUENCE ON WHEAT GROWTH UNDER CONDITIONS OF WATER AND SALT STRESS

Panov D. A., Jurkova I. N., Omelchenko A. V.

*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia
E-mail: nanosilver@rambler.ru*

Recently, in our country and abroad increased attention to the biomedical properties of the trace element selenium. It is part of many enzymes, in particular, glutathione peroxidase, which neutralizes reactive oxygen species and free radicals in living cells. Lack of selenium in soils and water causes diseases associated with oxidative stress in animal and human cells. Known works on the influence of ionic forms of selenium on the resistance of plants to drought. In a number of studies, the effect of selenium on the growth and development of seedlings of winter wheat and the possibility of increasing the resistance of plants to adverse environmental factors were studied. The results obtained suggest the possibility of using selenium in the early stages of the development of winter wheat as a stimulating exogenous factor.

According to literature data, mainly selenium is used in toxic form (selenite, selenate ions), it is applied to the soil or used to soak seeds. In contrast to ionic forms, highly dispersed null-valent selenium is less toxic and has a prolonged action. The highest bioavailability for plants is possessed by nanoparticles obtained by the "green chemistry" method, when substances of biological origin are used in their synthesis. Natural polysaccharides (alginate, chitosan, arabinogalactan, etc.) are used as stabilizers of nanoparticles.

The aim of this work was to study the effect of a water-soluble alginate-chitosan polyelectrolyte complex on the formation and stability of selenium nanoparticles and wheat growth under conditions of water and salt stress.

To obtain elemental selenium in solution, sodium selenite and the amino acid L-cysteine were used. Selenium nanoparticles were stabilized by solutions of biopolymers: low-viscosity sodium alginate and water-soluble chitosan with a degree of deacetylation of about 75 %. Water-soluble alginate-chitosan PEC (pH \approx 7) is formed when the ratio of equimolar chitosan: alginate solutions is 1: 9. The aggregate stability of selenium nanoparticles was controlled by a spectrophotometric method by changing the optical density, relative viscosity, and pH. To study the protective effect of the selenium nanobiocomposite under water and salt stress, the seeds of winter wheat of the «Zhneya» variety were soaked in solutions with a concentration of 5.0; 10.0; 20.0 and 30.0 mg/l (in selenium). The seed exposure time was 4 hours. The control was seeds soaked for 4 hours in distilled water. The biomass of roots and aerial parts of seedlings was measured by the gravimetric method, fixing plant material for 5 min. at 110 °C, bringing it to constant mass at 60 °C.

A biologically active preparation based on water-soluble elemental selenium was synthesized in an alginate-chitosan PEC matrix with high aggregative stability for four months. The treatment of wheat seeds with selenium nanobiocomposite reduced the negative effect of water and salt stress on the growth of dry matter of roots and aerial parts of seedlings by 5.5–19.8 % and 6.0–29.8 %, respectively, compared with the control.

Keywords: sodium alginate, chitosan, nanoselen, the polyelectrolyte complex, L-cysteine, sodium selenite, wheat, stress.

References

1. Gromova O. A., Gogolev I. V. Impressive results and prospects of application, *Medicine of emergency conditions*, **6** (31), 124 (2010). (in Russ.)
2. Golubkina N. A., Skalny A. V., Sokolov Y. A. *Selenium in medicine and ecology*, 136 p. (KMK, Moscow, 2006). (in Russ.)
3. Skrypnyk L. N., Chupakhin G. N. Trace element selenium and antioxidant status of plant food, *Bulletin of the Baltic Federal University named after Kant*, **7**, 73 (2007). (in Russ.)
4. Hasanuzzaman M., Fujita M. Selenium pretreatment upregulates the antioxidant defense and methylglyoxal detoxification system and confers enhanced tolerance to drought stress in rapeseed seedlings, *Biol. Trace Elem. Res.*, **143**, 1758 (2011).
5. Golovatskaya I. F., Kulagina Yu. M., Krakhaleva A. V. The influence of selenite and sodium selenate on the growth and productivity of Irgin wheat, depending on the processing methods, *Bulletin of TSPU (TSPU Bulletin)*, **7** (122), 111 (2012). (in Russ.)
6. Vikhрева V. A., Lebedeva T. B., Vikhрева G. V. The effect of selenium on the activity of the antioxidant system of plants, *Agronomy: Niva Volga*, **1**, 1 (2019). (in Russ.)
7. Schukin V. B., Gromov A. A., Schukina N. V. Selenium as an exogenous stimulating factor in the initial period of growth and development of winter wheat plants, *News of the OGAU*, **3**, 107 (2005). (in Russ.)
8. Turakainen M., Hartikainen H., Seppänen M.M. Effects of selenium treatments on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and concentrations of soluble sugars and starch, *J. Agric. Food Chem.*, **52**, 5378 (2004).
9. Khramtsov A. G., Serov A. V., Timchenko V. P. A new biologically active preparation based on selenium nanoparticles, *Bulletin of the North Caucasus State Technical University*, **4**, 122 (2010). (in Russ.)
10. Nikonov I.N., Ivanov A.I., Kovalenko L.V., Follie G.E. The effect of nanosized selenium on the growth of agricultural crops, *Promising materials*, **4**, 54 (2009). (in Russ.)
11. Jurkova I. N., Omelchenko A. V. The influence of selenium nanoparticles and sodium selenite on the growth and development of wheat, *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Biology. Chemistry*, **1** (3), 99 (2015). (in Russ.)
12. Zhang J. S., Gao X. Y., Zhang L. D., Bao Y. P. Biological effects of a nano red elemental selenium, *BioFactors*, **15**, 27 (2001).
13. Karpova E. A., Demidenko O. K., Ilyina O. P. To the question of the toxicity of drugs based on nanoselen, *Bulletin of the KrasGAU*, **14**, 207 (2014). (in Russ.)
14. Jurkova I. N., Omelchenko A. V. Protective and stimulating properties of nanoselenium for incrustation of wheat seeds, *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Biology. Chemistry*, **2** (2), 79 (2016). (in Russ.)
15. Panov D. A. Selenium and sodium alginate nanocomposites producing and properties, *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Biology, Chemistry*, **3** (1), 91 (2017). (in Russ.)
16. Brovko O. S., Palamarchuk I. A., Valchuk N. A. Gels of polyelectrolyte complexes based on sodium alginate and chitosan, *Journal of Physical Chemistry*, **91** (8), 1420 (2017). (in Russ.)
17. Maksimova S. N., Surovtseva S. Yu., Fedoseeva E. V. Prospects for cooling aquatic organisms with ice using chitosan and its polyelectrolyte complexes, *News of TINRO*, **186**, 231 (2016). (in Russ.)
18. Panov D. A. Effect of chitosan on the physical and chemical properties of sodium alginate, *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Biology, Chemistry*, **4** (4), 311 (2018). (in Russ.)
19. Lakin G. F. *Biometrics*, 352 p. (Higher. school, Moscow, 1990). (in Russ.)
20. Jurkova I. N., Omelchenko A. V., Pidgaynaya E. S. Nanoselenium as an inducer of salt tolerance of cereals and ornamental plants, *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Biology. Chemistry*, **3** (2), 215 (2017). (in Russ.)