

УДК 57.05:58.5

Протекторное действие нанобиокомпозита селена при предпосевной обработке семян на рост и развитие однолетней культуры *Tagetes patula* L. в условиях солевого стресса

Юркова И. Н., Панов Д. А., Омельченко А. В.,
Бугара И. А., Ржевская В. С., Омельченко С. О.

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского
Симферополь, Россия
omelchenko_tnu@mail.ru

Представлены результаты изучения протекторного действия различных концентраций нанобиокомпозита селена на ростовые показатели (лабораторную всхожесть, линейные размеры, массу сырого и сухого вещества надземной части и корней) и содержание свободного пролина в листьях *Tagetes patula* L. в условиях моделируемого хлоридного засоления. Синтез наночастиц селена осуществляли путем восстановления селенистокислого натрия L-цистеином в присутствии природного полисахарида альгината натрия. Установлено, что полученный раствор нанобиокомпозита образует достаточно устойчивые наночастицы селена, а средний размер нанозерен составляет 35 нм. Для получения растительного материала семена *T. patula* замачивали в течение 4 часов в растворах наноселена в концентрациях 5,0; 10,0; 20,0 и 30,0 мг/л (по селену), а затем проращивали в водной и почвенной культурах в условиях засоления NaCl. Показано, что засоление NaCl вызывало уменьшение массы сырого и сухого вещества надземной части и корней *T. patula* по сравнению с контрольным вариантом. Применение наноселена в концентрациях 5,0-20,0 мг/л уменьшало негативное влияние солевого стресса на накопление массы сухого вещества надземной части и корней. При концентрации наноселена 30,0 мг/л стимуляция ростовых процессов незначительно снижалась. Наибольшее протекторное действие наноселен оказывал на корневую систему. Обработка семян наноселеном в условиях солевого стресса приводила к снижению содержания свободного пролина на 18,3–56,9 % по сравнению с контролем, что указывает на проявление селеном антиоксидантных свойств. Полученная композиция на основе наночастиц селена может быть рекомендована в качестве индуктора солеустойчивости декоративных цветочных культур.

Ключевые слова: нанобиокомпозит, селен, *Tagetes patula*, морфометрические параметры, пролин, адаптация, засоление.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема солеустойчивости является одной из важнейших в растениеводстве (Munns, Gilliam, 2015; Negrão et al., 2017). Засоленные почвы занимают значительную часть поверхности суши. В результате процессов вторичного засоления их площадь постоянно увеличивается (Иванищев и др., 2020; Иванищев, 2021). Почвенное засоление приводит не только к снижению продуктивности растений, но и нарушает генетическое биоразнообразие (Kuznetsov, Shevyakova, 2007, 2010). Увеличение площади засоленных территорий негативно влияет не только на сельскохозяйственные культуры, но и на декоративные растения (Чуниховская, Житова, 2012; Chrysargyris et al., 2018). Техногенное засоление почвы крупных городов вследствие использования противогололедных реагентов на дорогах в зимний период приводит к гибели зеленых насаждений и нарушению экологической обстановки (Polovnikova, Voskresenskaya, 2008). Это не может не отразиться на росте декоративных однолетников. Наиболее распространенные их представители – род *Tagetes* (бархатцы), культуру которых используют в садоводстве и озеленении. Они не дают самосева и неприхотливы к условиям произрастания (Тихомирова, 2010).

В практическом аспекте интерес к этим растениям обусловлен высоким накоплением лютеина в цветках, что делает их основным промышленным источником природного пигмента ксантофилла (Третьяков и др., 2010; Deineka et al., 2007, 2016). В лечебных целях

используется комплекс лютеина и зеаксантина в соотношении 4:1, который является естественной тенью для глаз, защищая сетчатку от слишком яркого света (Bosma et al., 2000; Rodriguez-Carmona et al., 2006). Кроме этого, бархатцы служат сырьем в пищевой и парфюмерно-косметической промышленности, а в последние годы, эта культура используется в качестве фиторемедиатора почв, загрязненных нефтепродуктами (Третьяков и др., 2010; Киреева и др., 2012; Deineka et al., 2016).

В настоящее время все более широкое распространение получает развитие нанотехнологий в различных отраслях сельского хозяйства. В растениеводстве перспективным направлением является получение нанопрепаратов для предпосевной обработки семян, которая является одним из простейших способов улучшения качества семян и повышения урожайности растений (Юркова и др., 2017; Repetskaya et al., 2021). Наночастицы биогенных элементов вызывают изменения в различных метаболических путях, влияя на рост и развитие растений, участвуют в синтезе белков, углеводов, жиров и витаминов, а также повышают содержание хлорофилла в листьях, улучшая процесс фотосинтеза. Было высказано предположение, что наночастицы металлов также могут нейтрализовать некоторые токсичные вещества в почве (Перфильева и др., 2021).

Важнейшая роль в усилении адаптивного потенциала растений принадлежит селену (Zhang et al., 2001; Hawrylak-Nowak, 2009; Hasanuzzaman, Fujita, 2011; Nikonov et al., 2012; Wrobel et al., 2016; Валуева, Киппер, 2017; Юркова и др., 2017; Jiang et al., 2017; Perfileva et al., 2020; Repetskaya et al., 2021). Селен оказывает значительное действие на содержание отдельных групп фитогормонов (цитокининов и гиббереллинов). Большинство научных исследований посвящено изучению стимуляции селеном урожайности или обогащения им культурных растений (Hawrylak-Nowak, 2009; Hasanuzzaman, Fujita, 2011; Nikonov et al., 2012; Юркова и др., 2017; Jiang et al., 2017; Repetskaya et al., 2021). Известны работы по влиянию ионных форм селена на стрессоустойчивость культурных растений (Юркова и др., 2017; Jiang et al., 2017). Биологическая активность селена зависит от его формы (селенит- и селенат-ионы, наноразмерный селен). Наименее токсичным и биологически доступным является селен в форме наночастиц. Стабилизированные частицы наноселена с размером 20–60 нм полностью сохраняют спектр биологической активности и в 7 раз менее токсичны, чем селенит натрия (Zhang et al., 2001; Карпова и др., 2014). На биологическую активность влияет не только размер наночастиц селена, но и свойства стабилизирующей матрицы (Валуева, Киппер, 2017; Перфильева и др., 2021).

Исследование новых композиций на основе наночастиц селена, повышающих адаптивный потенциал однолетних декоративных культур при возделывании на антропогенно-депрессивных территориях, является актуальным.

Целью настоящей работы было изучить протекторное действие композиции на основе наночастиц селена, стабилизированного альгинатом натрия на солеустойчивость однолетней культуры *Tagetes patula*.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для проведения исследований служили растения бархатцев отклоненных (*Tagetes patula* L.) семейства сложноцветные (Compositae). Семена растений были получены из коллекции Ботанического сада им. Н. В. Багрова (Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского).

Синтез наноселена проводили в водном растворе альгината натрия (BioPolymer, Норвегия) путём восстановления селенистокислого натрия (х.ч.) L-цистеином («Synex Pharma», Китай), рН реакционной смеси 6,5–7,0, при температуре 293 °К (Юркова и др., 2016). Подробно процесс синтеза описан ранее (Панов, 2017). Для дальнейшей работы использовали водный раствор нанобиокомпозита селена, в котором концентрация селена составляла 0,050 г/л, альгината натрия – 1,0 г/л, а массовое соотношение концентраций, нуль-валентный селен/альгинат натрия, равно 1:20. После введения всех компонентов, раствор выдерживали в течение двух-трёх суток при комнатной температуре. Методом сканирующей электронной и

атомно-силовой микроскопии определяли морфологические и размерные характеристики наносистем на основе наночастиц селена, стабилизированных альгинатом натрия. Измерения проводили на сканирующем мультимикроскопе СММ-2000 (Россия). Плёнки для анализа готовили путём нанесения раствора нанобиокомпозиции на предварительно очищенную стеклянную пластину и дальнейшего высушивания при комнатной температуре. Сканирование проводили кантилеверами марки MST VEECO (USA) со скоростью 4 мкм/сек и количество усреднений в точке 16. Полученную информацию обрабатывали с использованием программ для статического анализа.

Протекторное действие композиции на основе наночастиц селена в условиях моделируемого хлоридного засоления изучали путем проращивания семян в водной и почвенной культурах.

В первой серии опыта семена *T. patula* замачивали в водных растворах композиции на основе наночастиц селена в концентрациях 5,0, 10,0, 20,0 и 30,0 мг/л (опыт). Время экспозиции семян в растворах составляло 4 часа. Контролем служили семена, замоченные в дистиллированной воде. Исследования проводили в чашках Петри на фильтровальной бумаге, увлажненной 5 мл дистиллированной воды (контроль) или 100 мМ раствора NaCl в термостате при температуре 24 °С. Объем выборки составлял 50 семян в трехкратной повторности. На 10 сутки определяли всхожесть семян, линейные размеры, массу сырого и сухого вещества надземной части и корней. Биомассу надземной части и корней измеряли гравиметрическим методом. Массу сухого вещества определяли после фиксации материала при 90 °С и его высушивания при 70 °С до постоянного веса.

Во второй серии опыта семена замачивали в исследуемых растворах композиции на основе наночастиц селена (опыт) и дистиллированной воде (контроль), а затем в количестве 25 штук высаживали в вегетационные сосуды. В качестве субстрата использовали воздушно-сухую почву (1,0 кг). Вместе с дистиллированной водой в опытные сосуды вносили раствор NaCl в количестве 2,0 г/кг почвы. Относительная влажность субстрата составляла 60 % от его полной влагоемкости. Растения *T. patula* выращивали в течение 30 суток в контролируемых условиях в климатической камере («Binder», Германия) в сосудах емкостью 1,0 л при 16-часовом фотопериоде, температуре 25/20 °С (день/ночь) и относительной влажности воздуха 60±5 %.

Содержание свободного пролина определяли с помощью кислого нингидринового реактива спектрофотометрически при длине волны 520 нм и рассчитывали по калибровочной кривой, построенной со стандартным L-пролином («Sigma»). Содержание пролина выражали в мкмоль на 1 г сырой массы (Khedr et al., 2003).

Статистическую обработку полученных результатов проводили по стандартным методикам (Trukhacheva, 2012), а также с использованием программы Microsoft Excel® 2016. Полученные результаты представлены на рисунках и в таблице в виде средней арифметической величины со стандартной ошибкой ($M \pm m_M$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наночастицы селена в отличие от ионных форм обладают повышенной биодоступностью, антиоксидантной активностью и более низкой токсичностью (Zhang et al., 2001; Карпова и др., 2014; Wrobel et al., 2016; Perfilova et al., 2020). Среди многочисленных методов получения наночастиц селена преобладают химические методы восстановления ионов селена в растворах восстановителей. В качестве восстановителей используют аскорбиновую кислоту, тиомочевину, боргидрид натрия, аминокислоту L-цистеин и другие. В этом случае образуются микрочастицы размером 100 нм и более, обладающие сильно развитой межфазной поверхностью, что приводит к быстрой агрегации и потери химической и биологической активности. Для повышения агрегативной устойчивости наночастиц, восстановление ионных соединений селена проводят в присутствии различных стабилизаторов. С этой целью чаще всего используют синтетические полимеры: полиэтилен, полиэтиленгликоль, поливинилпирролидон и другие (Валуева, Киппер, 2017). В настоящее время всё возрастающий интерес вызывают водорастворимые природные полисахариды:

арабиногалактан, пектин, хитозан, альгинат натрия, которые отличаются от синтетических полимеров биосовместимостью с живыми системами и меньшей токсичностью (Панов, 2017; Юркова и др., 2017; Valueva et al., 2019; Перфильева и др., 2021; Repetskaya et al., 2021). Широким спектром биологической активности обладают бурые морские водоросли, в состав которых входят альгиновая кислота и ее соли. Они находят свое применение в медицине, биотехнологии, пищевой промышленности и сельском хозяйстве (Ишевский, 2019; Kuznetsova et al., 2021).

В результате восстановления селенита натрия L-цистеином в водном растворе альгината натрия образуется коллоидный раствор красновато-оранжевого цвета. При этом на спектрах поглощения данного раствора наблюдался пик при длине волны 253 нм (Панов, 2017), что свидетельствует об образовании наночастиц селена. Биологическая активность наноматериалов зависит от их формы, размеров и свойства поверхности, поэтому в работе было уделено особое внимание определению этих характеристик.

На рисунке 1 (а) представлено 3-D-изображение поверхности тонкой пленки, отлитой из водного раствора, содержащего наночастицы селена в матрице альгината натрия. На шероховатой поверхности пленки видны скопления нанокластеров, состоящих из нанозерен, основной размер которых лежит в пределах от 20 до 50 нм. Средний размер нанозерен составляет около 35 нм (рис. 1 б).

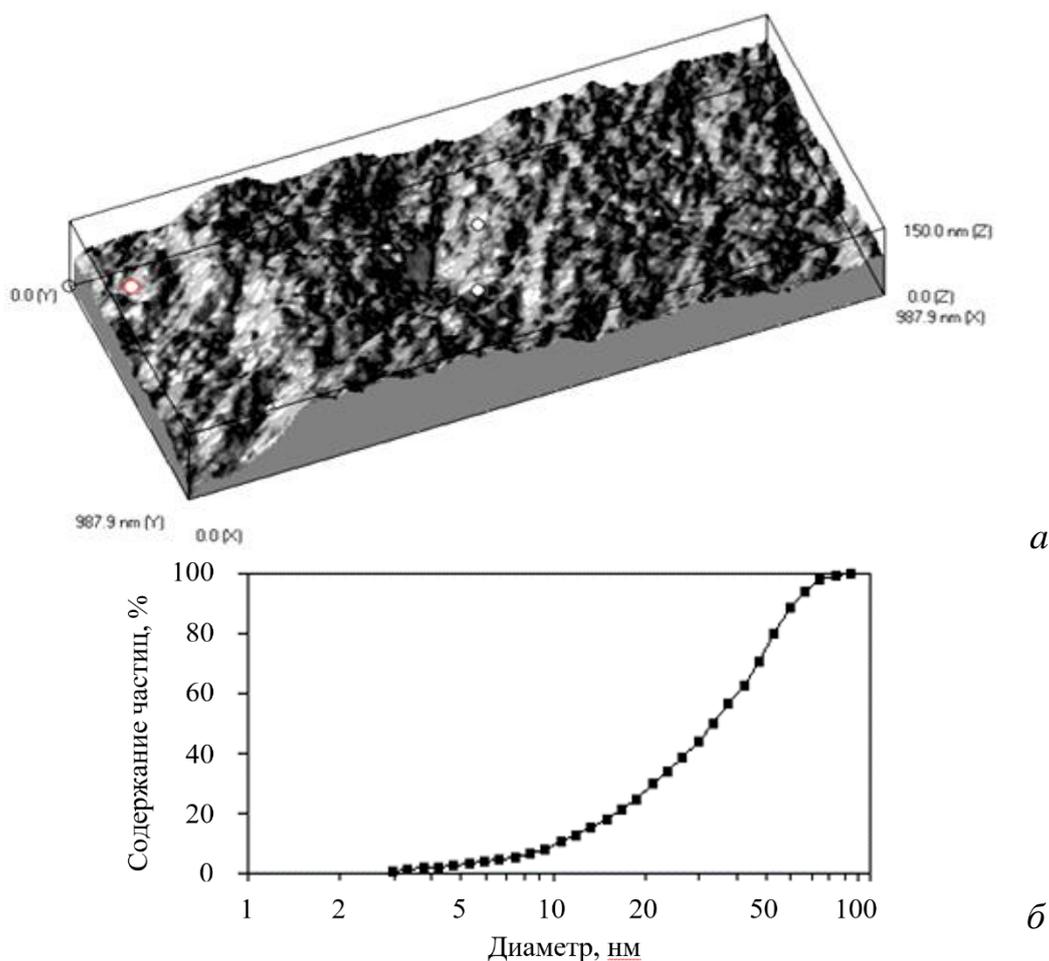


Рис. 1. 3-D изображение поверхности плёнки (а), интегральная кривая гранулометрического состава нанозерен селена (б)

В имеющихся работах, показано позитивное влияние наноселена на рост и развитие высших растений, а также повышение их антиоксидантного потенциала. Предположительно, увеличение роста растений после воздействия на них наночастиц селена, связано с усилением фотосинтетической активности и митотического деления клеток (Солдатов, Расчётова, 2013; Черникова и др., 2019).

Известно, что для формирования высококачественных посевов растений требуется высокопродуктивный семенной материал. Стимулирование ростовых процессов наночастицами происходит на ранних этапах онтогенеза при прорастании семян, что значительно влияет на дальнейшее развитие проростков и мобилизацию системы антиоксидантной защиты растений.

В связи с этим, нами было изучено влияние наночастиц селена при замачивании семян однолетней культуры *T. patula* на их всхожесть и морфометрические показатели, в условиях моделируемого хлоридного засоления.

Полученные результаты показали, что всхожесть семян *T. patula* в условиях засоления 100 мМ NaCl снижалась на 24,1 %. При обработке семян наноселеном наблюдалось увеличение всхожести в опытах без засоления на 7,1–14,2 %. При этом отрицательное воздействие солевого стресса на всхожесть после обработки семян наноселеном значительно снижалось. Наилучшие показатели всхожести наблюдались при концентрации наноселена 20,0 мг/л как в опытах без NaCl, так и в условиях солевого стресса. На фоне засоления обработка семян наноселеном увеличивала всхожесть на 5,2–12,3 % по сравнению с контрольным вариантом. Дальнейшее увеличение концентрации наноселена (30,0 мг/л) вызывало снижение всхожести, как в варианте без засоления, так и с NaCl. Однако эти значения оставались выше, чем в контрольном опыте (рис. 2).

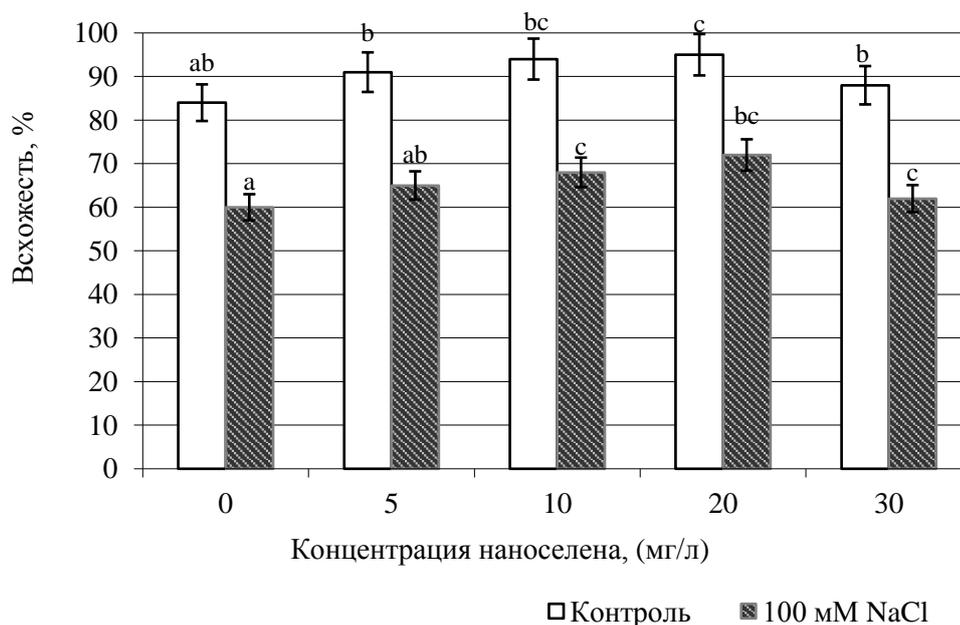


Рис. 2. Влияние наноселена на всхожесть семян *Tagetes patula* в условиях моделируемого хлоридного засоления ($p < 0,05$)

В условиях солевого стресса защитная реакция растений проявляется в задержке роста и наиболее достоверно отражается на изменении их морфометрических параметров (Юркова и др., 2017).

В процессе вегетации растений *T. patula* в отсутствии NaCl длина надземной части и корней увеличивалась с ростом концентрации наноселена в диапазоне 5,0–20,0 мг/л, а максимальное увеличение составляло 27,7 % и 22,5 % соответственно (рис. 3 и 4).

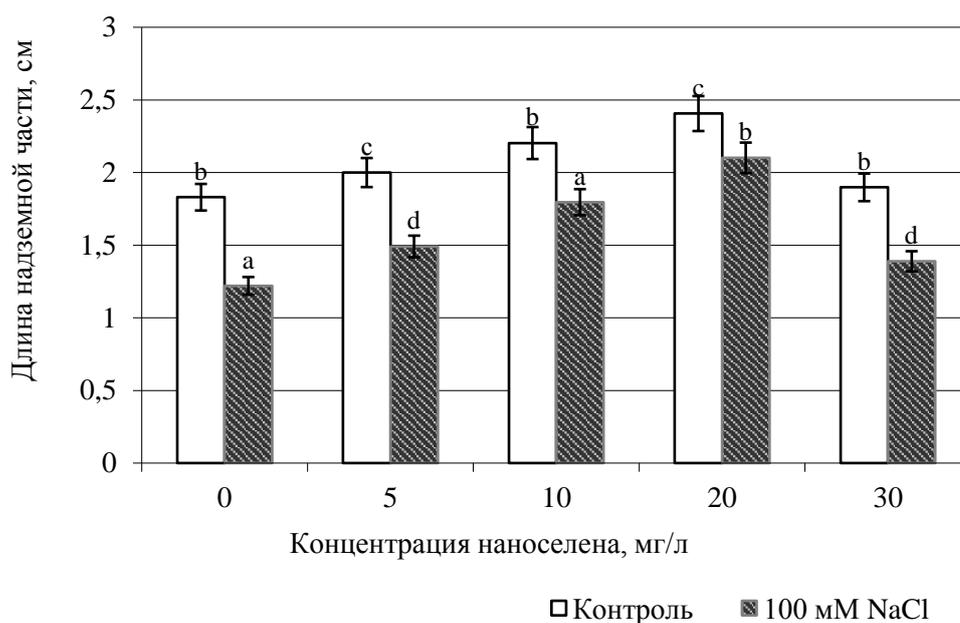


Рис. 3. Влияние наноселена на длину надземной части *Tagetes patula* в условиях моделируемого хлоридного засоления ($p < 0,05$)

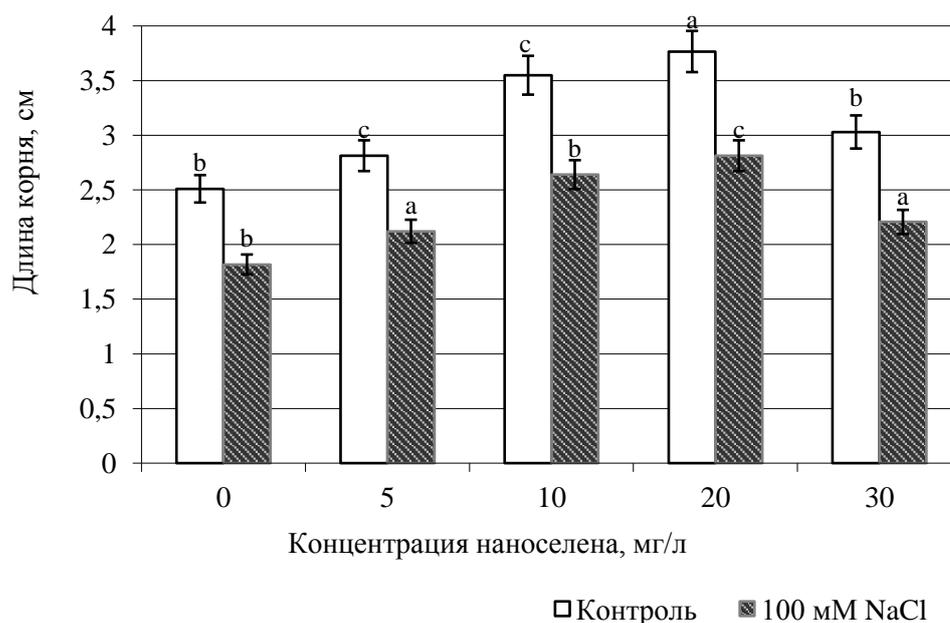


Рис. 4. Влияние наноселена на длину корня *Tagetes patula* в условиях моделируемого хлоридного засоления ($p < 0,05$)

При солевом стрессе эта зависимость сохранялась, а динамика роста надземной части и корней при концентрации наноселена 10,0–20,0 мг/л превышала контрольные на 7,6–21,5 % и 4,5–11,7 % соответственно. Эти показатели также были выше, чем у проростков, выращенных в отсутствие наноселена без NaCl. При концентрации наноселена 30,0 мг/л стимуляция ростовых процессов у *T. patula* незначительно снижалась, как в варианте без засоления, так и на фоне 100 мМ NaCl (см. рис. 3 и 4).

Полученные результаты коррелировали с накоплением биомассы надземной части и корней. Показано, что при концентрации наноселена 5,0–20,0 мг/л в отсутствии засоления, масса сухого вещества надземной части и корней увеличилась на 11,8–43,0 % и 26,7–87,3 % соответственно. Доля корней в биомассе растения составляла 60,7–62,8 %. Обработка семян наноселеном снижала негативное влияние солевого стресса на биомассу проростков по сравнению с контрольным вариантом. При этом максимальный прирост массы сухого вещества надземной части и корней составлял 33,1 % и 63,4 % соответственно. Доля корней в общую биомассу на фоне засоления достигала 49,7 %. Это на 5,1 % выше, чем в контрольном варианте, что свидетельствует о протекторном действии композиции на основе наночастиц селена в условиях хлоридного засоления. При дальнейшем увеличении концентрации наночастиц селена было отмечено незначительное снижение прироста биомассы проростков как в вариантах без засоления, так и на фоне NaCl (табл. 1).

Таблица 1

Влияние наноселена на накопление массы вегетативных органов *Tagetes patula* без засоления и в условиях моделируемого засоления NaCl

Концентрация наноселена, мг/л	Масса сырого вещества, мг		Масса сухого вещества, мг	
	Надземная часть	Корни	Надземная часть	Корни
H ₂ O (без засоления)				
0	5,52±0,21 ^b	7,10±0,29 ^b	2,21±0,12 ^b	2,85±0,12 ^c
5,0	6,18±0,39 ^a	8,61±0,27 ^{ab}	2,47±0,14 ^{ab}	3,81±0,13 ^a
10,0	7,54±0,40 ^b	9,21±0,30 ^{ab}	3,03±0,15 ^b	5,06±0,10 ^d
20,0	7,90±0,41 ^b	10,02±0,31 ^c	3,16±0,15 ^b	5,34±0,11 ^b
30,0	7,53±0,39 ^b	9,03±0,29 ^{ab}	3,02±0,16 ^b	3,63±0,13 ^c
На фоне 100 мМ NaCl				
0	3,48±0,15 ^{bc}	3,41±0,15 ^{bc}	1,39±0,11 ^a	1,12±0,06 ^a
5,0	3,72±0,14 ^c	3,72±0,15 ^c	1,50±0,14 ^b	1,35±0,07 ^a
10,0	3,95±0,15 ^a	4,06±0,16 ^a	1,68±0,13 ^b	1,52±0,06 ^b
20,0	4,37±0,15 ^b	4,12±0,17 ^b	1,85±0,15 ^c	1,83±0,06 ^c
30,0	4,04±0,16 ^b	3,90±0,16 ^a	1,63±0,14 ^b	1,28±0,05 ^a

Примечание к таблице. Средние значения, за которыми следуют одинаковые буквы в каждом столбце, существенно не отличаются (критерий множественного диапазона Дункана при 5 %).

Эти результаты согласуются с ранее полученными нами, данными по стимуляции накопления биомассы проростков после обработки семян композицией на основе наночастиц селена методом инкрустации. Однако в отличие от замачивания семян в растворе наноселена, результаты прироста биомассы проростков *T. patula* после инкрустации были значительно ниже. В условиях солевого стресса негативное влияние NaCl на прирост сухого вещества надземной части и корней снижалось лишь на 9,0 и 9,3 % соответственно (Юркова и др., 2017).

Таким образом, действие нанобиокомпозита селена на рост и развитие *T. patula* в условиях солевого стресса во многом определяется его концентрацией. Как показали наши исследования, оптимальной для растений является обработка семян нанобиокомпозитом селена в концентрации 20 мг/л. При этих условиях наблюдалось повышение всхожести семян, длины корня и надземной части, а также накопления массы сырого и сухого вещества вегетативных органов. Положительное влияние нанобиокомпозита селена на ростовые

процессы *T. patula* может быть связано с его антиоксидантными свойствами, то есть способностью к ликвидации накапливающихся в избыточном количестве свободных радикалов в стрессовых условиях.

Одним из универсальных осмолитов, участвующего в поддержании жизнедеятельности растений в стрессовых условиях является пролин. Его накопление в клетках является неспецифической защитной реакцией растений на действие стресс-факторов различной природы (Khedr et al., 2003; Verslues et al., 2006; Abdul et al., 2021). Роль пролина заключается в том, чтобы стабилизировать интактную гидратационную сферу макромолекул и тем самым предотвратить инактивацию белков, сохранить их биологическую активность, структуру и целостность мембран (Akbulut, Çakır, 2010). Пролин не только обладает осморегуляторной и протекторной функциями, но также является антиоксидантом. Существует положительная корреляция между увеличением содержания пролина в клетке и способностью растений выживать при засолении и водном дефиците (Verslues et al., 2006; Abdul et al., 2021).

В ряде работ по изучению влияния селена на накопление пролина в органах культурных растений в условиях водного и солевого стресса показано, как увеличение, так и снижение этого показателя до уровня контроля и ниже (Verslues et al., 2006; Akbulut, Çakır, 2010; Иванищев, 2019; Sotoodehnia-Korani et al., 2020; Abdul et al., 2021). Высказано предположение, что селен, являясь антиоксидантом, участвует в снижении внутриклеточного уровня активных форм кислорода в условиях стресса, что и проявляется в торможении стресс-стимулирующей активации антиоксидантных ферментов и резком ингибировании накопления индуцированного засолением пролина (Солдатов, Расчётова, 2013).

В связи с этим, было важным изучить влияние селена в форме наночастиц на активность свободного пролина в листьях однолетней культуры *T. patula*, выращенных в почвенной культуре в условиях солевого стресса (рис. 5).



Рис. 5. Внешний вид растений *Tagetes patula*, выращенных в условиях почвенного засоления при различной обработке семян нанобиокомпозитом селена а – контроль (H_2O); б – 10,0 мг/л Se^0 ; в – 20,0 мг/л Se^0 ; г – 30,0 мг/л Se^0 .

В условиях солевого стресса содержание свободного пролина в листьях превышало его уровень в контрольных вариантах (без засоления) на 362,4 %, что может свидетельствовать о нарушении клеточного гомеостаза, являясь показателем стрессового состояния организма. При увеличении концентрации наноселена 5,0–30,0 мг/л наблюдалось снижение накопления пролина в листьях на 18,3–56,9 % по сравнению с контролем (табл. 2).

Таблица 2

Влияние наноселена на содержание свободного пролина в листьях *Tagetes patula*,
выращенных в почвенной культуре на фоне хлоридного засоления

Концентрация наноселена, мг/л	Содержание свободного пролина в листьях		
	Н ₂ O (контроль)	2,0 г NaCl / кг почвы	Доля к контролю (%)
	мкмоль / г сырой биомассы	мкмоль / г сырой биомассы	
0	1,45±0,04 ^d	5,26±0,12 ^b	362,4
5,0	1,56±0,05 ^a	4,62±0,15 ^b	296,1
10,0	1,70±0,07 ^b	3,82±0,11 ^a	224,7
20,0	1,72±0,06 ^b	3,25±0,14 ^{bc}	188,9
30,0	1,80±0,08 ^c	2,81±0,09 ^c	156,1

Примечание к таблице. Средние значения, за которыми следуют одинаковые буквы в каждом столбце, существенно не отличаются (критерий множественного диапазона Дункана при 5 %).

Снижение содержания свободного пролина в листьях в условиях моделируемого хлоридного засоления связано с проявлением нанобиокомпозита селена антиоксидантных свойств, влияющих на уменьшение содержания активных форм кислорода внутри клетки и, как следствие, меньшее участие пролина в этих процессах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в результате восстановления селенистокислого натрия аминокислотой L-цистеином в водном растворе альгината натрия образуются достаточно устойчивые наночастицы селена, со средним размером нанозерен 35 нм.

Показано, что в условиях засоления при обработке семян *T. patula* нанобиокомпозитом селена увеличивалась всхожесть семян, длина корня и надземной части, масса сырого и сухого вещества корней и надземной части на ранних этапах онтогенеза. Максимальный эффект влияния наноселена на ростовые показатели наблюдался при концентрации 20,0 мг/л.

Отмечено, что на фоне засоления с увеличением концентрации наноселена (5,0–30,0 мг/л) наблюдалось снижение накопления свободного пролина в листьях на 18,3–56,9 % по сравнению с контролем. Полученные результаты свидетельствуют о проявлении наноселеном антиоксидантных свойств.

Таким образом, полученная композиция на основе наночастиц селена, стабилизированного альгинатом натрия, проявляет выраженное протекторное действие на устойчивость растений *T. patula* к солевому стрессу и может быть рекомендована в качестве индуктора солеустойчивости декоративных цветочных культур.

Список литературы

- Валуева С. В., Киппер А. И. Влияние полимерных стабилизаторов на морфологические и термодинамические характеристики селенсодержащих наносистем // Журнал физической химии. – 2017. – № 4 (91). – С. 577–581. DOI: 10.7868/S004445371704032X
- Иванищев В. В. Новые направления исследований в повышении солеустойчивости растений // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2021. – № 2. – С. 47–55. DOI: 10.24412/2071-6176-2021-2-47-55
- Иванищев В. В. О механизмах солеустойчивости растений и специфике влияния засоления // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2019. – № 4. – С. 76–88.
- Иванищев В. В., Евграфкина Т. Н., Бойкова О. И., Жуков Н. Н. Засоление почвы и его влияние на растения // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 3. – С. 28–42.
- Ишевский А. Л., Успенская М. В., Гунькова П. И., Давыдов И. А., Василевская И. А. Направления использования альгинатов в пищевой промышленности // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2019. – № 51 (77). – С. 61–69. DOI: 10.36807/1998-9849-2019-51-77-61-69
- Карпова Е. А., Демиденко О. К., Ильина О. П. К вопросу о токсичности препаратов на основе наноселена // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2014. – № 4 (91). – С. 207–210.
- Киреева Н. А., Григориади А. С., Баширова Р. М., Амирова А. Р. Использование бархатцев прямостоячих *Tagetes erecta* L. для фиторемедиации почвы, загрязненной нефтяными углеводородами // Агрехимия. – 2012. – № 5. – С. 66–72.
- Панов Д. А. Получение и свойства нанобиокомпозита селена и альгината натрия // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология, химия. – 2017. – Т. 3 (69), № 1. – С. 91–98.
- Перфильева А. И., Ножкина О. А., Граскова И. А., Забанова Н. С., Сухов Б. Г. Фитотоксичность нанокompозитов селена в природных матрицах на развитие растений картофеля *in vitro* // Агрехимия. – 2021. – № 1. – С. 70–78. DOI: 10.31857/S0002188121010087
- Солдатов С. А., Расчётова О. А. Действие селената натрия на ростовые процессы и развитие растений яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в условиях стресса // Бюллетень Брянского Отделения Русского Ботанического Общества. – 2013. – № 2 (2). – С. 120–128.
- Тихомирова Г. И. Тагетис – многопрофильная перспективная культура // Картофель и овощи. – 2010. – № 7. – С. 13.
- Третьяков М. Ю., Сорокопудов В. Н., Дейнека В. И. Накопление ксантофиллов у некоторых видов рода *Tagetes* L. в условиях Белгородской области // Сельскохозяйственная биология. – 2010. – № 4. – С. 105–109.
- Черникова О. В., Амплеева Л. Е., Мажайский Ю. А. Формирование урожая кукурузы при обработке семян наночастицами селена // Российская сельскохозяйственная наука. – 2019. – № 2. – С. 24–27. DOI: 10.31857/S2500-26272019224-27
- Чуниховская В. Н., Житова Л. В. Выращивание лекарственных растений на солонцеватых почвах Крыма // Научные труды Южного филиала национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Крымский агротехнологический университет». Серия: Сельскохозяйственные науки. – 2012. – Т. 149. – С. 66–70.
- Юркова И. Н., Омельченко А. В., Пидгайна Е. С. Наноселен как индуктор солеустойчивости зерновых и декоративных растений // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Серия: «Биология, химия». – 2017. – Т. 3 (69). – № 3. – С. 79–85.
- Юркова И. Н., Панова Э. П., Панов Д. А., Омельченко А. В.; Пат. № 159620, Российская Федерация. Способ получения водорастворимой композиции наночастиц, содержащей наночастицы селена. Патентообладатель Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского; заявл. 26.04.2013; опубл. 10.02.2016. Бюл. – № 4.
- Abdul Saboor Khan, Muhammad Adnan, Aamir Hamid, Adnan Akbar Molecular Mechanisms of Stress Tolerance in Plants. In book: Engineering Tolerance in Crop Plants Against Abiotic Stress. – 2021. – 16 p. DOI: 10.1201/9781003160717-8
- Akbulut M., Çakır S. The effects of Se phytotoxicity on the antioxidant systems of leaf tissues in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings // Plant Physiology and Biochemistry. – 2010. – Vol. 48, N 2–3. – P. 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.11.001>
- Bosma T. L., Dole J. M., Maness N. O. Optimizing marigold (*Tagetes erecta* L.) petal and pigment yield // American Society for Horticultural Science. – 2000. – Vol. 35, N 3. – P. 504. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.35.3.504>
- Chrysargyris A., Tziosis A., Xylia P., Tzortzakos N. Effects of Salinity on *Tagetes* Growth, Physiology, and Shelf Life of Edible Flowers Stored in Passive Modified Atmosphere Packaging or Treated With Ethanol // Front. Plant Sci. – 2018. – Vol. 9. – P. 1765. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01765>
- Deineka V., Kulchenko Y., Blinova I., Deineka L., Chulkov A. Anthocyanins of *Tagetes patula* flower petals // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – Vol. 7, N 5. – P. 2986–2993.
- Deineka V. I., Sorokopudov V. N., Deineka L. A., Tret'yakov M. Y. Flowers of marigold (*Tagetes*) species as a source of xanthophylls // Pharm. Chem. – 2007. – Vol. 41. – P. 540. <https://doi.org/10.1007/s11094-008-0007-z>
- Hasanuzzaman M., Fujita M. Selenium pretreatment upregulates the antioxidant defense and methylglyoxal detoxification system and confers enhanced tolerance to drought stress in rapeseed seedlings // Biological Trace Element Research. – 2011. – Vol. 143. – P. 1758–1776. DOI: 10.1007/s12011-011-8998-9

- Hawrylak-Nowak B. Beneficial effects of exogenous selenium in cucumber seedlings subjected to salt stress // *Biol. Trace Elem.* – 2009. – Vol. 132. – P. 259–269. <http://dx.doi.org/10.1007/s12011-009-8402-1>
- Jiang C., Zu C., Lu D., Zheng Q., Shen J., Wang H., Li D. Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na⁺ accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress // *Scientific Reports.* – 2017. – Vol. 7. – P. 42039. <https://doi.org/10.1038/srep42039>
- Khedr A. A., Abbas M. A., Wahid A. A., Quick W. P., Abogadallah G. A. Proline induces the expression of salt-stress-responsive proteins and may improve the adaptation of *Pancreaticum maritimum* L. to salt-stress // *Journal of Experimental Botany.* – 2003. – Vol. 54. – N 392. – P. 2553–2562. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg277>
- Kuznetsov V. V., Shevyakova N. I. Polyamines and plant adaptation to saline environments. In: Ramawat K. (eds) *Desert Plants. Biology and Biotechnology.* Springer, Berlin, Heidelberg. – 2010. – P. 261–298. DOI: 10.1007/978-3-642-02550-1_13
- Kuznetsov V. V., Shevyakova N. I. Polyamines and stress tolerance of plants // *Plant Stress. Global Sci. Books.* – 2007. – Vol. 1, N 1. – P. 50–71.
- Kuznetsova T. A., Andryukov B. G., Besednova N. N., Khotimchenko Y. S. Polysaccharides from marine algae in modern technologies of regenerative medicine // *Russian Journal of Marine Biology.* – 2021. – Vol. 47 (1). – P. 1–9. DOI: 10.31857/S013434752101006X
- Munns R., Gilliam M. Salinity tolerance of crops - what is the cost? // *New Phytol.* – 2015. – Vol. 208. – P. 668–673. <https://doi.org/10.1111/nph.13519>
- Negrão S., Schmöckel S. M., Tester M. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress // *Annals of Botany.* – 2017. – Vol. 119, N 1. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw191>
- Nikonov I. N., Folmanis J. G., Kovalenko L. V., Laptev G. Y., Folmanis G. E., Egorov I. A., Fisinin V. I., Tananaev I. G. Biological activity of nanoscale colloidal selenium // *Doklady Biochemistry and Biophysics.* – 2012. – Vol. 447. – P. 297–299. <https://doi.org/10.1134/S1607672912060075>
- Perfileva A. I., Nozhkina O. A., Tretyakova M. S., Graskova I. A., Klimenkov I. V., Sudakov N. P., Alexandrova G. P., Sukhov B. G. Biological activity and safety for the environment of selenium nanoparticles encapsulated in starch macromolecules // *Nanotechnologies in Russia.* – 2020. – Vol. 15, N 1. – P. 96–104. DOI: 10.1134/S199272232001015X
- Polovnikova M. G., Voskresenskaya O. L. Activities of antioxidant system components and polyphenol oxidase in ontogeny of lawn grasses under megapolis conditions // *Russian Journal of Plant Physiology.* – 2008. – Vol. 55, N 5. – P. 699–705. DOI: 10.1134/S1021443708050154
- Repetskaya A. I., Yurkova I. N., Omelchenko A. V., Panov D. A., Kazakova I. S. Effects of selenium nanoparticles on increasing the salt tolerance of some annual flower crops // *Acta Horticulturae.* – 2021. – N 1324_65. – P. 421–426. DOI: 10.17660/ACTAHORTIC.2021.1324.65
- Rodriguez-Carmona M., Kvensakul J., Harlow J.A., Köpcke W., Schalch W., Barbur J. L. The effects of supplementation with lutein and/or zeaxanthin on human macular pigment density and colour vision // *Ophthalm. Physiol. Opt.* – 2006. – Vol. 26. – P. 137–147. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2006.00386.x>
- Sotoodehnia-Korani P. P., Iranbakhsh A., Ebadi M., Majd A., Oraghi Ardebili Z. Selenium nanoparticles induced variations in growth, morphology, anatomy, biochemistry, gene expression, and epigenetic DNA methylation in *Capsicum annuum*; an *in vitro* study // *Environ Pollut.* – 2020. – Vol. 265 (Pt B). – P. 114727. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114727>.
- Trukhacheva N. *Mathematical statistics in biomedical research using the Statistica package.* – M.: GEOTAR-Media, 2012. – 379 p.
- Valueva S. V., Vylegzhanina M. E., Kutin A. A., Sukhanova T. E. Silver- and selenium-containing bioactive nanosystems based on zosterin and methylcellulose // *Journal of sol-gel science and technology.* – 2019. – Vol. 2 (92). – P. 408–414. DOI: 10.1007/s10971-019-05065-5
- Verslues P. E., Agarwal M., Katiyar-Agarwal S., Zhu J., Zhu J. K. Methods and concepts in quantifying resistance to drought salt and freezing abiotic stresses that affect plant water status // *Plant Journal.* – 2006. – Vol. 45, N 4. – P. 523–539. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2005.02593.x>
- Wrobel J. K., Power R., Toborek M. Biological activity of selenium: Revisited // *International Union of Biochemistry and Molecular Biology.* – 2016. – Vol. 68. – N 2. – P. 97–105. <https://doi.org/10.1002/iub.1466>
- Zhang J. S., Gao X. Y., Zhang L. D., Bao Y. P. Biological effects of a nano red elemental selenium // *BioFactors.* – 2001. – Vol. 15, N 1. – P. 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2010.10.025>

Yurkova I. N., Panov D. A., Omelchenko A. V., Bugara I. A., Rzhevskaya V. S., Omelchenko S. O. Protective effect of selenium nanobiocomposite during presowing treatment of seeds on the growth and development of an annual culture of *Tagetes patula* L. under salt stress // Ekosistemy. 2022. Iss. 29. P. 130–141.

The results of studying the protective effect of various concentrations of selenium nanobiocomposite on growth parameters (laboratory germination, linear dimensions, wet and dry mass of the aerial parts and roots) and the content of free proline in the leaves of *Tagetes patula* L. under simulated chloride salinity are presented. The synthesis of selenium nanoparticles was carried out by reduction of sodium selenite with L-cysteine in the presence of natural polysaccharide sodium alginate. It has been revealed that the resulting nanobiocomposite solution forms sufficiently stable selenium nanoparticles, and the average size of nanograins is 35 nm. To obtain plant material, *T. patula* seeds were soaked for 4 hours in nanoselenium solutions at a concentration of 5.0; 10.0; 20.0 and 30.0 mg/L (for selenium), and then germinated in water and soil cultures under conditions of NaCl salinity. It was shown that NaCl salinity caused a decrease in the weight of wet and dry matter of the aerial parts and roots of *T. patula* compared to the control variable. The use of nanoselenium at concentrations of 5.0–20.0 mg/L reduced the negative effect of salt stress on the accumulation of dry matter mass of the aerial parts and roots. The stimulation of growth processes decreased slightly at a nanoselenium concentration of 30.0 mg/L. Nanoselenium had the greatest protective effect on the root system. Seed treatment with nanoselenium under salt stress resulted in a decrease in the content of free proline by 18.3–56.9 % compared to the control variable, which indicates that selenium develops antioxidant properties. The resulting composition based on selenium nanoparticles can be recommended as an inducer of salt tolerance in decorative flower crops.

Key words: nanobiocomposite, selenium, *Tagetes patula* L., morphometric parameters, proline, adaptation, salinization.

Поступила в редакцию 01.04.22

Принята к печати 10.05.22