

ВЛИЯНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ *TAGETES PATULA* L. НА ФОНЕ ЗООГУМУСА*

Святослав Игоревич Лоскутов¹, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией

Ян Викторович Пухальский¹, научный сотрудник

Анатолий Иванович Осипов², доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник

Алла Ивановна Якубовская³, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник

Ирина Алексеевна Каменева³, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией

¹ВНИИ пищевых добавок — филиал ФНЦ пищевых систем имени В.М. Горбатова, г. Санкт-Петербург, Россия

²ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург, Россия

³ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», г. Симферополь, Республика Крым, Россия

E-mail: puhalskyan@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена оценке изменения биометрических показателей роста растений *Tagetes patula* L. под влиянием возрастающих доз предпосевных обработок семян солевыми растворами селена $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$ и кремния $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$ на фоне внесения в субстрат жидкого экстракта зоогуруса — продукта жизнедеятельности личинок *Hermetia illucens*. Для обработки использовали концентрации микроэлементов в пересчете на соли: Se 5-10-20-30 мг⁻¹ и Si 50-100-200-300 мг⁻¹. Приведены результаты измерения минерального состава сухого порошка зоогуруса, а также регуляторных изменений в морфометрии растений при внесении в субстрат его 1,0% щелочной суспензии. Оценивали процессы формирования высоты побегов и длины корневой системы. Добавка суспензии зоогуруса в варианте с кремнием снижала рост побегов при увеличении длины корневой системы. Наибольшая биомасса растений была получена при концентрации 300 мг⁻¹ Si с зоогурусом. Причем большую долю в увеличении общей фитомассы составило повышение веса корней. Прибавка в биомассе — 38% (с 6,5 до 9,0 г). Обработка семян соединением кремния на фоне зоогуруса также увеличила длину корневой системы на 39% (с 15,4 до 21,4 см). Вес и длина побегов при этом уменьшились. Поскольку кремний в основном поглощается корнями, можно предположить, что гуминовые соединения, входящие в состав зоогуруса, способствовали перераспределению его аккумуляции в подземной части растений в виде хелатной Si-органической группы. Отдельная обработка семян кремнием в концентрации 300 мг⁻¹ показала сопоставимые в увеличении веса побегов результаты с выращиванием растений на фоне зоогуруса без обработки. Данную концентрацию Si можно рекомендовать для включения в состав зоокомпоста как дополнительный триггер стимуляции ризогенеза. Добавка селена на всех выбранных концентрациях и фонах, напротив, ингибировала рост побегов и развитие корней, из чего можно сделать вывод о том, что, либо необходимо уменьшать концентрации, либо использовать их менее токсичные наночастицы.

Ключевые слова: бархатцы отклоненные, биомасса, зоогурус, *Hermetia illucens*, селен, кремний

MICRONUTRIENTS INFLUENCE ON GROWTH AND DEVELOPMENT OF *TAGETES PATULA* L. ON THE ZOOHUMUS PHONE

S.I. Loskutov¹, PhD in Agricultural Sciences, Head of the Laboratory

Ya.V. Puhalsky¹, Researcher

A.I. Osipov², Grand PhD in Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher

A.I. Yakubovskaya³, PhD in Biological Sciences, Leading Researcher

I.A. Kameneva³, PhD in Engineering Sciences, Leading Researcher, Head of the Laboratory

¹All-Russian Research Institute of Food Additives — branch of the Federal Scientific Center for Food Systems named after V.M. Gorbatova, St. Petersburg, Russia

²Agrophysical Institute of the Russian Academy of Agricultural Sciences, St. Petersburg, Russia

³Federal State Budgetary Scientific Institution «Research Institute of Agriculture of Crimea», Simferopol, Republic of Crimea, Russia

E-mail: puhalskyan@gmail.com

Abstract. The work is devoted to the assessment of changes in biometric indices of *Tagetes patula* plant growth under the influence of increasing doses of pre-sowing treatments of plant seeds with saline solutions of selenium $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$ and silicon $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$ against the background of the introduction of a liquid extract of zoohumus, a product of the vital activity of *Hermetia illucens* larvae, into the substrate. The following concentrations of microelements in terms of salts were used for the treatment: Se 5-10-20-30 ppm and Si 50-100-200-300 ppm. The results of measuring the mineral composition of dry zoohumus powder, as well as regulatory changes in plant morphometry under the influence of the introduction of its 1.0% alkaline suspension into the substrate, are presented. The processes of formation of shoot height and root system length were assessed. As a result, the introduction of the zoohumus suspension in the variant with silicon reduced the growth of shoots, with an increase in the length of the root system. The highest plant biomass was obtained at a concentration of 300 ppm Si with the addition of zoohumus. Moreover, a large share in the increase in the total phytomass was due to an increase in the weight of the roots. The increase in biomass was 38% (from 6.50 to 9.00 g). Seed treatment with a silicon compound against the background of zoohumus also increased the length of the root system by 39% (from 15.36 to 21.37 cm). The weight and length of the shoots decreased. Since silicon is mainly absorbed by the roots,

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (темы FGUS 2024-0010 и FGUS 2025-0005) / The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FGUS 2024-0010 and FGUS 2025-0005 topics).

it can be assumed that the humic compounds included in the zoohumus contributed to the redistribution of its accumulation in the underground part of plants in the form of a chelate Si-organic group. Separate treatment of seeds with silicon at a concentration of 300 ppm showed comparable results in increasing shoot weight as when growing plants on the background of zoohumus without treating seeds with this microelement. Thus, this concentration of Si can be recommended as an additional trigger for stimulating rhizogenesis and inclusion in the composition of zoocompost. The addition of selenium at all selected concentrations and backgrounds, on the contrary, inhibited shoot growth and root development, from which it can be concluded that these concentrations should either be reduced or their less toxic nanoforms should be used.

Keywords: marigolds, biomass, zoohumus, *Hermetia illucens*, selenium, silicon

Селен (Se) и кремний (Si) — биофильные микроэлементы необходимые для нормального роста и развития растений. [1, 2, 19] Они входят в состав антиоксидантной системы и способствуют снижению негативного воздействия различных абиотических стрессов на растения. В основном оценка их стресс-протекторного действия проводится на зерновых и овощных культурах. При экзогенной внекорневой обработке томатов водными растворами данных микроэлементов наблюдали снижение зараженности растений галловой нематодой. [14] Селен, в отличие от кремния, может приобретать токсичные свойства при превышении накопления в системе почва-растение, превращаясь из эссенциального элемента в тяжелый металл первого класса опасности для почв. [4, 11] На примере злаков рабочие концентрации соединений селена варьировали в диапазоне от 0,00012 до 0,1%. [12]

Если раньше влияние органических удобрений и микроэлементов оценивали на примере сельскохозяйственно значимых культур, то с развитием отрасли цветоводства в России и созданием собственной селекционно-семеноводческой базы необходимы дополнительные испытания с декоративными саженцами. Помимо улучшения их внешних эстетических качеств (габитус) это важно и для пищевой отрасли, поскольку в последние годы появился тренд на выращивание съедобных цветов. [3] Здесь, как и для микрозелени, следует получать экологически безопасное сырье, которое, помимо нативного ингредиента в кулинарии, можно использовать для выделения вторичных метаболитов, в частности природных флавоноидов и каротиноидов.

Данные по использованию концентраций разведения селена и кремния для декоративного цветоводства пока фрагментарны. Подобные исследования не проводили в естественных условиях и на фоне действия комбинированных органических добавок, обладающих хелатирующими свойствами. В недавней работе было показано, что кремний — жизненно важный элемент при выращивании цветочных культур. [23] Результаты опытов на пионах и розах демонстрировали улучшение показателей роста, качества, режима питания и долговечности срезанных цветов при обработках культур данным микроэлементом. [6, 20, 21, 24] На примере бархатцев и эхиума, традиционно используемых в народной медицине, Se и Si способствовали формированию лучшего габитуса и адаптации культур к кратковременному действию засухи или засоления. [16, 17, 22]

Среди органических добавок нового типа выделяют экстракт зоогумуса (зоокомпост) — продукт жизнедеятельности личинок черной львинки (*Hermetia illucens* L.) (ГОСТ 33830-2016 и ГОСТ 53117-2008). [8–10] Благодаря высокому содержанию в его составе биогенных веществ с пролонгированным эффектом действия, он может служить хорошей альтернативой ис-

пользованию минеральных удобрений. Получают зоогумус в процессе переработки насекомыми отходов 3...4 класса опасности, без наличия токсичных соединений. По содержанию питательных веществ зоогумус не уступает сухому птичьему помету. Его близкий аналог — биокомпост красных червей или вермикомпост. При этом скорость биоконверсии высокобелковых отходов личинками синантропной мухи гораздо быстрее. [18] Зоогумус улучшает структуру почвы, ее водный и воздушный баланс.

Цель работы — оценка изменения морфометрических показателей роста и развития бархатцев под влиянием возрастающих концентраций солевых растворов Se и Si при предпосевной обработке семян растений, а также подбор оптимальных концентраций биофильных микроэлементов для возможности дополнительного обогащения ими нового типа органического удобрения в виде зоокомпоста *H. illucens*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследований — бархатцы отклоненные (*Tagetes patula* L.), сорт *Bonanza Yellow* (Pan American Seed).

Опыт проводили на базе закрытого тепличного комплекса ЛГУ имени А.С. Пушкина (Санкт-Петербург — г. Пушкин) весной 2024 года по методике Журбицкого. Среднюю температуру воздуха в помещении поддерживали днем на уровне 20...22°C, ночью — 15°C. Влажность воздуха — 60...70%, фотопериод светового дня — 16 ч.

Растения выращивали из семян в пластиковых кассетах на шесть ячеек в течение 70 сут. до фазы активного цветения (рис. 1, 4-я стр. обл.).

Для каждого варианта опыта брали по две кассеты. Таким образом, число растений (повторности) в варианте — 12. Поливали на протяжении всего периода вегетации под корень фильтрованной водой. Влажность субстрата поддерживали на уровне 60% полной полевой влагоемкости (ППВ) весовым методом. [13]

Перед посевом семена проращивали на фильтровальной бумаге в течение суток в чашках Петри с добавлением дистиллированной воды (контроль), селенита натрия (Na_2SeO_3) и силиката натрия (Na_2SiO_3) в возрастающих концентрациях (табл. 1).

В качестве субстрата для выращивания растений брали верховой торф (Veltorf, Россия), нейтрально-

Таблица 1.
Концентрации микроэлементов для обработки семян
Tagetes patula L.

Соединение	Концентрация, млн ⁻¹
$\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$	5, 10, 20, 30
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$	50, 100, 200, 300

го значения pH достигали при добавлении извести. В опыте использовали субстрат без зоогумуса (фон 1) и субстрат с экстрактом зоогумуса (фон 2), который вносили один раз в виде 1,0%-й щелочной вытяжки. Субстрат проливали органической суспензией до оптимальной степени влагоемкости.

Схема опыта: субстрат без зоогумуса (фон 1) + обработка семян дистиллированной водой (контроль); фон 1 + обработка семян $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$ в концентрациях 5...10...20...30 млн⁻¹; фон 1 + обработка семян $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$, 50...100...200...300 млн⁻¹; субстрат с добавлением 1%-го щелочного экстракта зоогумуса (фон 2) + обработка семян дистиллированной водой; фон 2 + обработка семян $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$ в концентрациях 5...10...20...30 млн⁻¹; фон 2 + обработка семян $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$, 50...100...200...300 млн⁻¹.

Суспензию зоогумуса получали с помощью щелочной экстракции высушенных и просеянных экскрементов личинок *H. illucens* 0,1 н КОН сведением кислотности до нейтральной реакции потенциометрическим методом на мультитестере ИПЛ 103-1 (Семико, Россия). [5] Личинок *H. illucens* разводили на базе лабораторного инсектария ВНИИ пищевых добавок (г. Санкт-Петербург). Исходный состав зоогумуса определяли в лаборатории ВНИИ пищевых добавок (г. Санкт-Петербург) методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) на оптическом спектрометре ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) согласно ГОСТ 26213-2021 и методике. [7] Физико-химические показатели сухого порошка зоогумуса представлены в таблице 2.

По окончании эксперимента растения извлекали из ячеек кассет, промывали проточной водой, отдельно измеряли длину, а также нативную биомассу побегов вме-

сте с бутонами и корневой системой, путем взвешивания на аналитических весах РА 214С (Ohaus, США)

Полученные данные анализировали с помощью прикладных систем Excel 2016 (Microsoft Corp., США). Для статистической обработки результатов использовали дисперсионный анализ ANOVA и критерий Даннетта. По критерию Колмогорова-Смирнова оценивали нормальность распределения параметров количественных переменных. Различия считали достоверными и признавали наличие связи между показателями на уровне вероятности, не превышающей 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Урожайность — важный показатель развития растений. Его параметры считаются генетическим признаком сорта, который закладывается селекционером в процессе его создания. Однако на генетическом уровне любых культур записано несколько программ их развития, а также возможен небольшой резерв для их роста. В зависимости от агротехнологии возделывания культуры, в результате применения физиологически активных добавок, данный параметр в урожае может проявиться по-разному.

Использованные в опыте концентрации селенита натрия для предпосевной обработки семян ингибировали рост вегетативных органов бархатцев при их выращивании на субстрате без зоогумуса. При самой высокой концентрации Se (30 млн⁻¹) вес побегов снизился, по сравнению с контролем на 47% (с 2,8 до 1,5 г), корней на 46 (с 6,5 до 3,5 г), длина побегов на 20 (с 11,2 до 8,9 см), корней на 38% (с 17,8 до 11,0 см). Выбранные концентрации селена в виде данного соединения необходимо уменьшать до уровня применения на злаках (озимая рожь, яровые пшеница и ячмень), либо использовать их наночастицы, от концентрации которых мы исходили изначально, основываясь на результатах опыта с бархатцами у других исследователей. [12, 15]

Внесение в субстрат экстракта зоогумуса стимулировало развитие растений в варианте без предпосевной обработки солями микроэлементов. Вес побегов увеличился на 25% (с 2,8 до 3,5 г) (рис. 2а), корней на 15% (с 6,5 до 7,5 г) (рис. 2б), по сравнению с контролем. Показатели длины побегов возросли на 15% (с 11,2 до 12,8 см). Увеличение длины корневой системы не отмечено.

При выращивании растений из семян, обработанных селенитом натрия, усиливалось ингибирующее действие Se на фоне внесения зоогумуса в субстрат. При самой высокой концентрации Se (30 млн⁻¹) вес побегов снизился на 74% (с 3,5 до 0,9 г), корней — 67% (с 7,5 до 2,5 г). Длина побегов уменьшилась на 39% (с 12,8 до 7,8 см), корней на 25% (с 15,4 до 11,5 см).

Замачивание семян в растворах силиката натрия, напротив, приводило к увеличению биомассы вегетативных органов растений. Наиболее значимый результат зафиксирован при предпосевной обработке семян раствором высокой концентрации (300 млн⁻¹) — на фоне 1 вес побегов увеличился на 13% (с 2,8 до 3,2 г), корней на 23% (с 6,5 до 8,0 г). На фоне 2 отмечен только рост корней на 20% (с 7,5 до 9,0 г).

Следует отметить, что при выращивании растений из семян, обработанных растворами силиката натрия, на субстрате с зоогумусом наблюдали снижение высоты побегов с увеличением длины корней (рис. 2, 4-я стр. обл., табл. 3).

Таблица 2.
Физико-химические показатели сухого порошка зоогумуса

Показатель	Значение
Обменный аммоний (массовая доля аммонийного азота), млн ⁻¹	10,0
Фосфор (подвижная форма), мг/кг	820,0
Массовая доля органического вещества, %	62,8
pHвод, ед.	7,6
Калий (валовая форма), млн ⁻¹	10500,0
Калий (подвижная форма), млн ⁻¹	1989,3
Кальций (валовая форма), млн ⁻¹	2550,0
Магний (валовая форма), млн ⁻¹	2600,0
Натрий (валовая форма), млн ⁻¹	37,0
Массовая доля (валовая форма), млн ⁻¹	
Марганец	218,9
Медь	10,5
Кадмий	<0,1 (0,043)
Цинк	179,2
Железо	340,0
Никель	2,5
Кобальт	0,9
Алюминий	190,0
Хром	0,6
Свинец	1,2

Таблица 3.
Соотношение морфометрических показателей роста растений по вариантам опыта

Обработка семян	Вес корня / вес побега, г		Длина корня / длина побега, см	
	1	2	1	2
Вода (контроль)	2,3	2,1	1,6	1,3
5Se*	2,4	2,3	1,5	1,3
10Se	2,3	2,0	1,3	1,0
20Se	2,4	2,3	0,9	1,0
30Se	2,4	2,7	1,2	1,5
50Si**	2,3	4,2	1,6	1,4
100Si	2,0	4,0	1,4	1,3
200Si	2,1	4,9	1,6	2,0
300Si	2,5	3,7	1,0	1,9
HCP ₀₅	0,54		0,22	

Примечание. 1 — субстрат без зоогумуса, 2 — субстрат с добавлением экстракта зоогумуса; * — обработка семян раствором $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$ в концентрациях 5...10...20...30 млн⁻¹; ** — обработка семян раствором $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot (\text{H}_2\text{O})_3$, 50...100...200...300 млн⁻¹. Различия HCP₀₅ представлены между двумя фонами.

Увеличение длины корней в варианте с 300 млн⁻¹ Si составило 39% (с 15,4 до 21,4 см), по сравнению с контролем. В естественных условиях это может служить следствием повышенного заглубления корневой системы для извлечения воды из нижележащих горизонтов почвы, способствуя образованию кремнеземной кутикулы и увеличению числа придаточных корней.

Выводы. Все изученные дозы селена негативно повлияли на рост и развитие растений. Добавление экстрактов зоогумуса усугубило данные показатели. Обработка кремнием способствовала наращиванию вегетативной биомассы растений. Наибольшие значения по весу обоих органов растений отмечены при дозе 300 млн⁻¹. Они были сопоставимы с показателями биомассы растений при их выращивании на фоне зоогумуса без обработки семян данным микроэлементом. Добавление зоогумуса нивелировало процесс роста побегов и усилило прирост корневой системы. Таким образом, данную концентрацию кремния можно рекомендовать для включения в состав зоокомпоста как дополнительный триггер стимуляции ризогенеза.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Безручко Е.В. Кремний — недооцененный элемент питания растений // Земледелие. 2020. № 4. С. 40–46. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10411>
- Давидова О.Е. Вешийский В.А., Яворівський П.П. Фізіолого-біохімічні та стрепротекторні функції селену в рослинах // Физиология и биохимия культурных растений. 2009. № 41(2). С. 109–123.
- Иванова М.И., Кашлева А.И., Разин А.Ф., Разин О.А. Съедобные цветки — новый перспективный источник фитонутриентов в питании человека // Пищевая промышленность. 2016. № 9. С. 30–32.
- Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф., Пономарева С.В. Ранжирование химических элементов по их экологической опасности для почвы // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2010. № 1. С. 27–29.

- Комиссаренков А.А., Пругло Г.Ф., Фёдоров В.А. Потенциометрия: учебно-методическое пособие. СПб.: СПб ГТУРП, 2013. 64 с.
- Леконцева Т.Г., Федоров А.В. Влияние оксида кремния (SiO_2) на адаптацию микрорастений роз (*Rose L.*) сорта *Reine Sammut* // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. 23(6). С. 814–821. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.6.814-821>
- Методика выполнения измерений массовой доли элементов в породах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. С.-Пб. 2008. 36 с.
- Пендюрин Е.А., Здоровцов В.А., Рыбина С.Ю., Святченко А.В. Агрохимические характеристики зоокомпоста личинок насекомого Черная львинка // Агрохимический вестник. 2024. № 3. С. 59–62. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-3-010>
- Пендюрин Е.А., Сапронова Ж.А., Токач Ю.Е. Зоокомпост личинок мухи черная львинка как влагоудерживающий агент в почвах // Природообустройство. 2023. № 3. С. 59–65. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-3-59-65>
- Пендюрин Е.А., Рыбина С.Ю., Смоленская Л.М. Использование зоокомпоста Черной львинки в качестве органического удобрения // Аграрная наука. 2020. № 340(7). С. 106–110. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-340-7-106-110>
- Побилат А.Е., Волошин Е.И. Особенности содержания селена в системе почва — растение (обзор) // Вестник КрасГАУ. 2020. № 11(164). С. 98–105. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-11-98-105>
- Синдирева А.В., Мангутова А.К., Швеи Е.С. Влияние селенита и селената натрия на рост и развитие растений // Проблемы региональной экологии. 2023. № 6. С. 87–95. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-6-87-95>
- Сиухина М.С., Быкова С.Л. Методы почвенных исследований: учеб.-метод. пособие. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2016. 174 с.
- Удалова Ж.В., Зиновьева С.В. Влияние внекорневой обработки растений томатов микроэлементами на заражение галловой нематодой // Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. 2021. № 22. С. 520–525. <https://doi.org/10.31016/978-5-6046256-1-3.2021.22.520-525>
- Юркова И.Н., Панов Д.А., Омелченко А.В. и др. Протекторное действие нанобиокомпозита селена при предпосевной обработке семян на рост и развитие однолетней культуры *Tagetes patula L.* в условиях солевого стресса // Экосистемы. 2022. № 29. С. 130–141.
- Anandhi S., Sudharshini P., Parkavi E. et al. Effect of silicon dioxide nano fertilizer on the growth and yield marigold (*Tagetes erecta L.*) // Journal of Harbin Engineering University. 2023. № 44 (8). P. 1712–1718.
- Attia E., Elhawat N. Combined foliar and soil application of silica nanoparticles enhances the growth, flowering period and flower characteristics of marigold (*Tagetes erecta L.*) // Scientia Horticulturae. 2021. № 282 (27). 110015. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110015>
- Goodwin C., Hay-Roe M.M. Black Soldier Fly Larva (*Hermetia illucens*) Frass vs. Red Wiggler (*Eisenia fetida*) Castings on (*Capsicum annum*) “Early Jalapeno” Seedling Growth // UF Journal of Undergraduate Research. 2022. № 24. P. 1–18. <https://doi.org/10.32473/ufjur.24.130728>
- Heather A.C., Carole C.P. Silica in plants: Biological, biochemical and chemical studies // Annals of Botany. 2007. № 100 (7). P. 1383–1389. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm247>

20. Hosseinzadeh Rostam Kalaei M., Abdossi V., Danaee E. Evaluation of foliar application of selenium and flowering stages on selected properties of Iranian Borage as a medicinal plant // *Scientific Reports*. 2022. № 12 (1). 12568. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16241-z>
21. Jalilzadeh Khoie E., Jabbarzadeh Z., Norouzi P. et al. Silicon spray affect floricultural traits and leaf elemental nutrient concentrations of rose Beverly Watson // *Journal of Plant Nutrition*. 2024. № 47 (1). P. 145–156. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2262513>
22. Kleiber T., Borowiak K., Kosiada T. et al. Application of selenium and silicon to alleviate short-term drought stress in French marigold (*Tagetes patula* L.) as a model plant species // *Open Chemistry*. 2020. № 18 (1). P. 1468–1480. <https://doi.org/10.1515/chem-2020-0183>
23. Kumari P., Sharma R., Panwar S. et al. Silicon as vital element in flower crop production // *Journal of Plant Nutrition*. 2023. № 46 (11). P. 2747–2762. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2160739>
24. Song J., Yang J., Jeong B.R. Synergistic Effects of Silicon and Preservative on Promoting Postharvest Performance of Cut Flowers of Peony (*Paeonia lactiflora* Pall.) // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. № 23 (21). 13211. <https://doi.org/10.3390/ijms232113211>
11. Pobilat A.E., Voloshin E.I. Osobennosti soderzhaniya selena v sisteme pochva – rastenie (obzor) // *Vestnik KrasGAU*. 2020. № 11(164). S. 98–105. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-11-98-105>
12. Sindireva A.V., Mangutova A.K., Shvec E.S. Vliyanie selena i selenata natriya na rost i razvitie rastenij // *Problemy regional'noj ekologii*. 2023. № 6. S. 87–95. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-6-87-95>
13. Siuhina M.S., Bykova S.L. Metody pochvennyh issledovaniy: ucheb.-metod. posobie. Novosibirsk: IC NGAU «Zolotoj kolos», 2016. 174 s.
14. Udalova Zh.V., Zinov'eva S.V. Vliyanie vnekornevoj obrabotki rastenij tomatov mikroelementami na zarazhenie gallovoj nematodoy // *Teoriya i praktika bor'by s parazitarnymi boleznyami*. 2021. № 22. S. 520–525. <https://doi.org/10.31016/978-5-6046256-1-3.2021.22.520-525>
15. Yurkova I.N., Panov D.A., Omel'chenko A.V. i dr. Protektornoe dejstvie nanobiokompozita selena pri predposhevnoj obrabotke semyan na rost i razvitie odnoletnej kul'tury Tagetes patula L. v usloviyah solevogo stressa // *Ekosistemy*. 2022. № 29. S. 130–141.
16. Anandhi S., Sudharshini P., Parkavi. E. et al. Effect of silicon dioxide nano fertilizer on the growth and yield marigold (*Tagetes erecta* L.) // *Journal of Harbin Engineering University*. 2023. № 44 (8). P. 1712–1718.
17. Attia E., Elhawaw N. Combined foliar and soil application of silica nanoparticles enhances the growth, flowering period and flower characteristics of marigold (*Tagetes erecta* L.) // *Scientia Horticulturae*. 2021. № 282 (27). 110015. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110015>
18. Goodwin C., Hay-Roe M.M. Black Soldier Fly Larva (*Hermetia illucens*) Frass vs. Red Wiggler (*Eisenia fetida*) Castings on (*Capsicum annum*) “Early Jalapeno” Seedling Growth // *UF Journal of Undergraduate Research*. 2022. № 24. P. 1–18. <https://doi.org/10.32473/ufjur.24.130728>
19. Heather A.C., Carole C.P. Silica in plants: Biological, biochemical and chemical studies // *Annals of Botany*. 2007. № 100 (7). P. 1383–1389. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm247>
20. Hosseinzadeh Rostam Kalaei M., Abdossi V., Danaee E. Evaluation of foliar application of selenium and flowering stages on selected properties of Iranian Borage as a medicinal plant // *Scientific Reports*. 2022. № 12 (1). 12568. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16241-z>
21. Jalilzadeh Khoie E., Jabbarzadeh Z., Norouzi P. et al. Silicon spray affect floricultural traits and leaf elemental nutrient concentrations of rose Beverly Watson // *Journal of Plant Nutrition*. 2024. № 47 (1). P. 145–156. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2262513>
22. Kleiber T., Borowiak K., Kosiada T. et al. Application of selenium and silicon to alleviate short-term drought stress in French marigold (*Tagetes patula* L.) as a model plant species // *Open Chemistry*. 2020. № 18 (1). P. 1468–1480. <https://doi.org/10.1515/chem-2020-0183>
23. Kumari P., Sharma R., Panwar S. et al. Silicon as vital element in flower crop production // *Journal of Plant Nutrition*. 2023. № 46 (11). P. 2747–2762. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2160739>
24. Song J., Yang J., Jeong B.R. Synergistic Effects of Silicon and Preservative on Promoting Postharvest Performance of Cut Flowers of Peony (*Paeonia lactiflora* Pall.) // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. № 23 (21). 13211. <https://doi.org/10.3390/ijms232113211>

REFERENCES

1. Bezruchko E.V. Kremnij – nedoocenennyy element pitaniya rastenij // *Zemledelie*. 2020. № 4. S. 40–46. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10411>
2. Davidova O.E. Veshic'kij V.A., Yavorivs'kij P.P. Fiziologobiohimichni ta stresprotektorni funkci selenu v roslinah // *Fiziologiya i biohimiya kul'turnyh rastenij*. 2009. № 41(2). C. 109–123.
3. Ivanova M.I., Kashleva A.I., Razin A.F., Razin O.A. S"edobnye cvetki – novyy perspektivnyy istochnik fitonutrientov v pitanii cheloveka // *Pishchevaya promyshlennost'*. 2016. № 9. S. 30–32.
4. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F., Ponomareva S.V. Ranzhirovanie himicheskikh elementov po ih ekologicheskoy opasnosti dlya pochvy // *Doklady Rossijskoj akademii sel'skohozyajstvennyh nauk*. 2010. № 1. S. 27–29.
5. Komissarenkov A.A., Pruglo G.F., Fyodorov V.A. Potenciometriya: uchebno-metodicheskoe posobie. SPb.: SPb GTURP, 2013. 64 s.
6. Lekonceva T.G., Fedorov A.V. Vliyanie oksida kremniya (SiO₂) na adaptaciyu mikrorastenij roz (Rose L.) sorta Reine Sammut // *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2022. 23(6). S. 814–821. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.6.814-821>
7. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj doli elementov v porodah pochv, gruntov i donnyh otlozheniyah metodami atomno-emissionnoj i atomno-absorbcionnoj spektrometrii. S.-Pb. 2008. 36 s.
8. Pendyurin E.A., Zdorovcov V.A., Rybina S.Yu., Svyatchenko A.V. Agrohimiicheskie harakteristiki zookomposta lichinok nasekomogo Chernaya l'vinka // *Agrohimiicheskij vestnik*. 2024. № 3. S. 59–62. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-3-010>
9. Pendyurin E.A., Saprionova Zh.A., Tokach Yu.E. Zookompost lichinok muhi chernaya l'vinka kak vlagouderzhivayushchij agent v pochvah // *Prirodobustroystvo*. 2023. № 3. S. 59–65. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-3-59-65>
10. Pendyurin E.A., Rybina S.Yu., Smolenskaya L.M. Ispol'zovanie zookomposta Chernoy l'vinki v kachestve organicheskogo udobreniya // *Agrarnaya nauka*. 2020. № 340 (7). S. 106–110. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-340-7-106-110>

Поступила в редакцию 11.05.2025
Принята к публикации 25.05.2025



Рис. 1. Внешний вид растений *T. patula* L. на 70-е сут. роста.

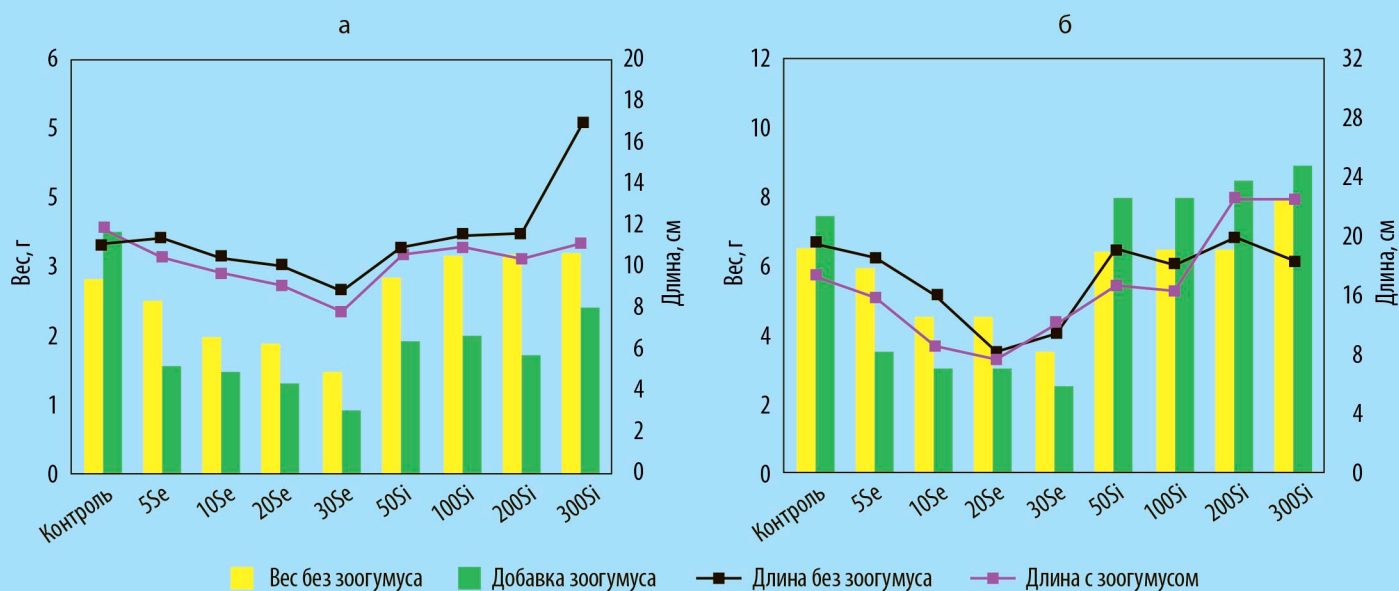


Рис. 2. Морфометрические параметры растений по вариантам опыта на 70-е сут. вегетации: а – побеги, б – корни, $p < 0,05$.