

УДК: 631.811.93:631.559:635.64

ВЛИЯНИЕ АМОРФНОГО КРЕМНЕЗЕМА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВО ТОМАТОВ[§]

© 2023 г. Е. А. Бочарникова^{1,*}, А. А. Касацкий², В. В. Матыченков¹

¹Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

²ООО “Экопроект”
115551 Москва, Шипиловский пр., 39 корп. 1, помещ. 1, офис 6, Россия

*E-mail: mswk@rambler.ru

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.

После доработки 29.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

Томаты относятся к одним из наиболее популярных овощей, улучшение их вкусового и биохимического качества возможно в результате снижения содержания нитратов и увеличения содержания сахара. В вегетационных экспериментах изучали влияние аморфного тонкодисперсного кремнезема на продуктивность и качество томатов. Кремнезем вносили в смесь серой лесной почвы и промытого песка в дозах 0.1, 0.2 и 0.3 г/сосуд, что соответствовало 100, 200 и 300 кг/га, на фоне внесения комплексных минеральных удобрений. Показали, что улучшение кремниевого питания томатов существенно повысило их урожайность на 52–70%. Также было установлено улучшение качества плодов в результате снижения содержания нитратов на 20–40% и увеличения содержания сахара на 12.9–50.9%. Статистический анализ полученных данных выявил, что концентрация монокремниевой кислоты в обработанных диоксидом кремния грунтах тесно положительно коррелировала с урожайностью томатов, а также содержанием сахара в плодах и отрицательно коррелировала с содержанием нитратов.

Ключевые слова: аморфный кремнезем, продуктивность, качество, томаты.

DOI: 10.31857/S0002188123100058, **EDN:** EOZLCG

ВВЕДЕНИЕ

Томаты являются вторым наиболее распространенным после картофеля овощем в мире и занимают площадь >2.2 млн га [1]. Популярность томатов обусловлена высокой урожайностью, относительной простотой возделывания, хорошей адаптированностью к разным климатическим условиям и высокой пищевой ценностью. Присутствующий в их составе ликопин является мощным антиоксидантом и обладает противовоспалительным действием.

Широко распространенное в современном растениеводстве интенсивное применение химических удобрений приводит к ряду негативных последствий, включая снижение качества продукции, в частности, из-за чрезмерного содержания нитратов [2]. Поэтому в настоящее время остро встает проблема качества выращиваемых томатов [3].

Качество томатов определяется множеством параметров и зависит от комплекса факторов, таких как практика возделывания, генетические особенности, условия окружающей среды и другие. Наиболее часто товарное качество томатов определяют по внешней привлекательности плодов (цвету, форме, размеру, крепости, текстуре и др.) [3, 4]. Однако сейчас все большее значение для потребителя приобретают биохимические показатели качества томатов, определяющие их пищевую ценность, такие как содержание сахаров, витаминов, важных макро- и микроэлементов [4].

Многочисленные исследования, проведенные в последние 2 десятилетия, свидетельствуют о перспективности применения кремниевых препаратов для повышения урожайности сельскохозяйственных растений, а также качества плодов, включая томаты [5, 6]. Было показано, что помимо роста урожайности Si-содержащие препараты обеспечивают увеличение содержания сахара и витаминов в томатах и снижение в плодах тома-

[§] Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103-6.

тов содержания нитратов [6, 7]. Хотя результаты исследований свидетельствуют об улучшении качества и урожайности томатов при внесении кремниевых препаратов, эти данные не являются систематическими и часто положительное действие Si-содержащих препаратов объясняют присутствием примесей, таких как кальций, железо, калий и др. Цель работы — исследование влияния аморфного диоксида кремния на качество томатов при выращивании в условиях теплицы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Вегетационный опыт проводили в теплице с использованием в качестве грунта верхнего горизонта серой лесной среднесуглинистой почвы на покровных суглинках (содержание углерода — 1.25%, pH 6.4, емкость поглощения — 15 мг-экв/100 г почвы, общее содержание фосфора — 725 мг/кг, общее содержание калия — 203 мг/кг) и промытого кварцевого песка. Эксперименты проводили в пластиковых сосудах объемом 1 л.

Перед посадкой семян в грунт вносили следующие минеральные удобрения: азот в форме нитрата аммония (NH_4NO_3) в дозе 114 кг/га, фосфор в форме двойного суперфосфата ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) в дозе 110 кг/га и калий в форме хлорида калия в дозе 71.7 кг/га. В качестве кремниевого удобрения использовали тонкодисперсный диоксид кремния (производство Салаватского катализаторного завода, Башкортостан) с содержанием SiO_2 98.6–99.2%, Na — 0.30–0.41%, удельной поверхностью — 160–180 м²/г, pH_{H₂O} 7.7. Дозы внесения SiO_2 составляли 0, 100, 200 и 300 кг/га или 0, 0.1, 0.2 и 0.3 г/сосуд.

Семена томатов (*Solanum lycopersicum*, сорт Аврора) замачивали в 0.1%-ном растворе пероксида водорода в течение 10 мин, затем раствор заменили на дистиллированную воду и семена проращивали в течение 24 ч при температуре $25 \pm 2^\circ\text{C}$, после чего высаживали в сосуды. Растения выращивали при естественном освещении и ежедневном поливе дистиллированной водой для поддержания влажности грунта 20–25%. Опыт проводили в пятикратной повторности.

Сбор урожая начали через 1.5 мес. после посадки и проводили в течение 2-х мес. В плодах, собранных в конце эксперимента, анализировали содержание растворимых углеводов (сахаров) с помощью рефрактометра (KH-512ATC, Kehang, Китай) и нитратов ионометром (Twin NO_3^- , B-343, Noriba, Japan).

После уборки урожая отбирали образцы почвы. Во влажных почвенных образцах определяли

Таблица 1. Влияние аморфного кремнезема на урожайность томатов

Доза SiO_2 , кг/га	Масса томатов, кг/растение	Количество плодов, шт./растение	Средняя масса 1-го томата, г
Серая лесная почва			
0	2.5	9.4	266
100	2.8	9.8	286
200	3.2	9.9	323
300	3.8	11.3	336
Кварцевый песок			
0	1.7	9.1	187
100	2.0	9.5	211
200	2.6	9.9	263
300	2.9	10.4	279
HCP ₀₅	0.2	0.9	21

содержание монокремниевой кислоты. В пластиковую пробирку на 50 мл помещали навеску 6 г и заливали 30 мл дистиллированной воды. Суспензию встряхивали в течение 1 ч и центрифугировали при 6000 об./мин в течение 10 мин. Полученный раствор немедленно анализировали на содержание монокремниевой кислоты по методу Маллин–Райли, который позволяет избежать мешающее влияние фосфора [17]. В высушенных почвенных образцах измеряли содержание кислоторастворимых форм кремния и фосфора. В колбу на 50 мл помещали 2 г почвы и заливали 20 мл 0.1 н. HCl. Суспензию встряхивали в течение 1 ч и центрифугировали при 6000 об./мин в течение 10 мин. В полученном растворе измеряли концентрацию кремния и фосфора с использованием методов Маллин–Райли и Кирсанова соответственно [8, 9]. Все анализы проводили в трехкратной повторности. Для расчетов наименьшей существенной разницы при 5%-ном уровне значимости использовали программу Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В среднем урожайность томатов на серой лесной почве была больше на 32%, чем на песке (табл. 1). Это связано с более высоким уровнем плодородия серой лесной почвы по сравнению с песком, а также с более интенсивным выносом питательных элементов из сосудов с песком. Внесение аморфного кремнезема существенно увеличило урожайность томатов, при этом наблюдали увеличение как количества плодов на одном кусте, так и средней массы плода. На серой лесной почве максимальное увеличение урожайности

Таблица 2. Влияние аморфного кремнезема на содержание нитратов и углеводов в томатах

Доза SiO ₂ , кг/га	NO ₃ ⁻	Углеводы
	мг/кг	
Серая лесная почва		
0	96.4	38.5
100	71.3	43.5
200	65.8	44.8
300	55.3	49.5
Кварцевый песок		
0	87.4	30.2
100	69.4	35.8
200	65.9	40.5
300	57.8	45.6
НСР ₀₅	4.5	4.0

сти составило 52, на песке — 70%. Это соответствовало литературным данным, которые показали, что на более бедных почвах эффективность применения кремниевых препаратов больше [10].

Внесение диоксида кремния также обеспечило улучшение качества томатов, которое выражалось в снижении содержания нитратов в плодах и увеличении содержания углеводов (табл. 2). Впервые способность кремниевых препаратов влиять на накопление нитратов в растениях была отмечена в 1976 г. [11]. Авторы установили, что в условиях дефицита азотного питания применение силиката натрия увеличило содержание нитратов в пшенице, однако при избытке азотного питания наблюдали уменьшение содержания нитратов под действием кремниевого препарата. В нашем эксперименте оба грунта характеризовались высоким содержанием азота благодаря внесению нитрата аммония, и внесение диоксида кремния привело к уменьшению содержания нитратов на 26–40 и на 20–34% в томатах, выращенных на серой лесной почве и кварцевом песке соответственно. Механизмы, обуславливающие влияние кремниевых препаратов на содержание нитратов в плодах и листьях растений, изучены плохо. Можно предположить, что действие кремния было связано с универсальной способностью его активных форм регулировать транспорт неорганических и органических молекул по апопласту и симпласту [12, 13].

Влияние кремниевых препаратов на содержание в растениях сахаров известно давно [14]. Было показано, что улучшение кремниевого питания приводит к увеличению содержания сахаров в сахарном тростнике, сахарной свекле, яблоках,

Таблица 3. Влияние аморфного кремнезема на содержание водо- и кислоторастворимого кремния и кислоторастворимого фосфора в грунте

Доза SiO ₂ , кг/га	Водо- растворимый Si	Кислото- растворимый Si	Кислото- растворимый P ₂ O ₅
	мг/кг		
Серая лесная почва			
0	14.5	245	58.4
100	19.7	267	64.3
200	23.5	278	73.2
300	24.8	283	75.3
Кварцевый песок			
0	5.8	187	34.4
100	12.8	202	38.3
200	19.6	213	41.4
300	20.5	224	43.3
НСП ₀₅	1.4	20	4.2

клубнике и томатах [6, 7, 15–17]. Согласно нашим данным, внесение диоксида кремния позволило увеличить содержание углеводов на 12.9–28.5% в томатах на серой лесной почве и на 18.5–50.9% — на кварцевом песке. В настоящее время механизм, ответственный за увеличение содержания углеводов в растениях при оптимизации кремниевого питания, неизвестен. Можно предположить, что дополнительное кремниевое питание растений стимулирует активность метаболических процессов, в том числе синтез углеводов. Как указывали выше, активные формы кремния также могут влиять на транспортную систему растений, возможно, включая транспорт углеводов [12, 13]. Доказательство этих гипотез требует проведения специальных фундаментальных исследований.

Содержание водорастворимого кремния и кислоторастворимых форм Si и P в грунте представлено в табл. 3. Внесение аморфного кремнезема привело к увеличению содержания водорастворимого Si от 14.5 до 24.8 мг/кг и от 5.8 до 20.5 мг/кг в серой лесной почве и кварцевом песке соответственно. Кроме того, увеличилось содержание кислоторастворимых форм кремния.

Также в почве отмечено увеличение доступного для растений фосфора, что могло быть обусловлено 2-мя процессами. Во-первых, монокремниевая кислота может реагировать с труднорастворимыми фосфатами, вытесняя фосфат-анион в почвенный раствор [16]. Скорее всего данный механизм обеспечил увеличение содер-

Таблица 4. Коэффициенты корреляции (r) между содержанием водорастворимого и кислоторастворимого кремния в грунте и количественными и качественными показателями томатов

Параметр	Водорастворимый Si	Кислоторастворимый Si
Серая лесная почва		
Урожайность	0.919	0.900
Количество плодов с одного куста	0.783	0.772
Средний вес одного плода	0.973	0.951
Содержание нитратов	−0.977	−0.988
Содержание углеводов	0.947	0.949
Содержание кислоторастворимого фосфора в грунте	0.986	0.969
Кварцевый песок		
Урожайность	0.966	0.982
Количество плодов с одного куста	0.943	0.992
Средний вес одного плода	0.974	0.974
Содержание нитратов	−0.953	−0.973
Содержание углеводов	0.962	0.998
Содержание кислоторастворимого фосфора в грунте	0.987	0.996

жания кислоторастворимого фосфора в серой лесной почве. Во-вторых, при увеличении концентрации монокремниевой кислоты улучшаются сорбционные свойства почв, что приводит к снижению выноса фосфора [17]. Благодаря этому механизму, по-видимому, произошло увеличение доступного для растений фосфора в кварцевом песке.

При внесении аморфного кремнезема в серую лесную почву и кварцевый песок изменялось содержание монокремниевой кислоты и кислоторастворимого кремния. Кислоторастворимый кремний является интегрированным показателем, характеризующим содержание как соединений кремния (моно- и поликремниевых кислот) в почвенном растворе, так и твердых соединений кремния с относительно высокой растворимостью [8]. С целью определения, какой из данных параметров преимущественно влияет на продуктивность и качество томатов, были вычислены коэффициенты корреляции (табл. 4).

Проведенные вычисления показали тесную корреляцию между содержанием монокремниевой кислоты и кислоторастворимого кремния в почве и такими параметрами как урожайность, средний вес одного плода, содержание сахара в плодах, а также содержание кислоторастворимого фосфора в серой лесной почве и кварцевом песке. Содержание водорастворимого кремния лучше коррелировало с количеством плодов с одного растения, выращенного на песке, чем в растениях на серой лесной почве. Зависимость между содержанием нитратов в плодах томатов и

содержанием монокремниевой кислоты и кислоторастворимого кремния в обоих грунтах характеризовалась отрицательными коэффициентами корреляции. Во всех вариантах концентрация монокремниевой кислоты лучше коррелировала с исследованными параметрами по сравнению с концентрацией кислоторастворимого кремния. Отсюда можно сделать вывод, что именно монокремниевая кислота является основным фактором, влияющим на продуктивность и качественные характеристики томатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что улучшение кремниевого питания томатов существенно повысило их урожайность на 52–70%. Также было установлено улучшение качества плодов в результате снижения содержания нитратов на 20–40% и увеличения содержания сахара на 12.9–50.9%. Статистический анализ полученных данных выявил, что концентрация монокремниевой кислоты в обработанных диоксидом кремния почвах тесно положительно коррелировала с урожайностью томатов, а также содержанием сахара в плодах и отрицательно коррелировала с содержанием нитратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Villareal R.L. Tomatoes in the tropics. CRC Press, 2019 p.
2. Ye L., Zhao X., Bao E., Li J., Zou Z., Cao K. Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization im-

- proves soil fertility and enhances tomato yield and quality // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 1–11.
3. Bertin N., Génard M. Tomato quality as influenced by preharvest factors // *Sc. Horticult.* 2018. V. 233. P. 264–276.
 4. Coyago-Cruz E., Corell M., Moriana A., Mapelli-Brahm P., Hernanz D., Stinco C.M., Meléndez-Martínez A.J. Study of commercial quality parameters, sugars, phenolics, carotenoids and plastids in different tomato varieties // *Food Chem.* 2019. V. 277. P. 480–489.
 5. Sayed E.G., Mahmoud A.W.M., El-Mogy M.M., Ali M.A., Fahmy M.A., Tawfic G.A. The effective role of nano-silicon application in improving the productivity and quality of grafted tomato grown under salinity stress // *Horticulturae*. 2022. V. 8. № 4. P. 293.
 6. Khomyakov D.M., Wei Xiao, Xiong Ying, Bocharnikova E.A., Matichenkov V.V. Nature-like agricultural chemicals in food safety and soil fertility // *Mosc. Univ. Soil Sci. Bul.* 2020. V. 75. № 2. P. 87–93.
 7. Matichenkov V., Bocharnikova E. Si in horticultural industry // *Plant mineral nutrition and pesticide management*. Amsterdam: Elsevier, 2004. V. 2. P. 217–228.
 8. Матыченков В.В. Градация почв по дефициту доступного растениям кремния // *Агрохимия*. 2007. № 7. С. 22–27.
 9. Рябинина О.В., Матвеева Н.В. Химические, физические и биологические методы исследования почв. Иркутск: ИрГАУ им. А.А. Ежовского, 2017. 129 с.
 10. Prakash N.B., Savant N.K., Sonar K.R. Silicon in Indian agriculture. New Delhi: West Publishing House, 2018. 198 p.
 11. Wallace A. Relationships among nitrogen, silicon, and heavy metal uptake // *Soil Sci.* 1989. V. 147. № 6. P. 457–460.
 12. Mehrabanjoubani P., Abdolzadeh A., Sadeghipour H.R., Aghdasi M. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants // *Pedosphere*. 2015. V. 25. № 2. P. 192–201.
 13. Wei W., Ji X., Saihua L., Bocharnikova E., Matichenkov V. Effect of monosilicic and polysilicic acids on Cd transport in rice, a laboratory test // *J. Plant Growth Regul.* 2022. V. 41. P. 818–829.
 14. Anderson D.L., Jones D.B., Snyder G.H. Response of a rice-sugarcane rotation to calcium silicate slag on Everglades Histosols // *Agron. J.* 1987. V. 79. № 3. P. 531–535.
 15. Artyszak A. Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality – A literature review in Europe // *Plants*. 2018. V. 7. № 3. P. 54.
 16. Soppelsa S., Kelderer M., Testolin R., Zanutelli D., Andreotti C. Effect of biostimulants on apple quality at harvest and after storage // *Agronomy*. 2020. V. 10. № 8. P. 1214.
 17. Elkhatib H., Gabr S.M., Roshdy A.H., Al-Haleem A., Mostafa M. The impacts of silicon and salicylic acid amendments on yield and fruit quality of salinity stressed tomato plants // *Alexandria Science. Exchange J.* 2017. V. 38. P. 933–939.
 18. Матыченков И.В., Пахненко Е.П. Изменение содержания подвижных фосфатов почвы при внесении активных форм кремния // *Вестн. Ульяновск. ГСХА*. 2013. № 3. С. 24–28.
 19. Matichenkov V., Bocharnikova E., Campbell J. Reduction in nutrient leaching from sandy soils by Si-rich materials: Laboratory, greenhouse and field studies // *Soil Till. Res.* 2020. V. 196. 104450.

Effect of Amorphous Silicon Dioxide on Productivity and Quality of Tomato

E. A. Bocharnikova^{a, #}, A. A. Kasatskii^b, and B.B. Matichenkov^a

^a*Institute of Basic Biological Problems, RAS
Institutskaya ul. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

^b*LLC “Ecoproject”
Shipilovsky prosp. 39 bldg. 1, room/ 1, office 6, Moscow 115551, Russia*

[#]*E-mail: mswk@rambler.ru*

Tomatoes are one of the most popular vegetables, improving their taste and biochemical quality is possible as a result of reducing the content of nitrates and increasing the sugar content. The effect of amorphous fine silica on the productivity and quality of tomatoes was studied in vegetation experiments. Silica was introduced into a mixture of gray forest soil and washed sand in doses of 0.1, 0.2 and 0.3 g/vessel, which corresponded to 100, 200 and 300 kg/ha, against the background of complex mineral fertilizers. It was shown that the improvement of silicon nutrition of tomatoes significantly increased their yield by 52–70%. There was also an improvement in fruit quality as a result of a 20–40% reduction in nitrate content and an increase in sugar content by 12.9–50.9%. Statistical analysis of the obtained data revealed that the concentration of monosilicon acid in soils treated with silicon dioxide was closely positively correlated with the yield of tomatoes, as well as the sugar content in fruits and negatively correlated with the content of nitrates.

Keywords: amorphous silica, productivity, quality, tomatoes.