

Полифункциональный кремний в растениях

И.Г. Тараканов, Л.А. Паничкин, И.М. Коноваленко, Е.Д. Абрашкина

Представлен краткий обзор научных публикаций о роли кремния в почвообразовательном процессе, в повышении доступности для растений фосфора и азота из почвенных комплексов, стимулирующем и протекторном влиянии на растения. Показаны перспективы применения кремнийсодержащих соединений в овощеводстве.

Ключевые слова: кремний, удобрения, регуляторы роста, овощные культуры.

Кремний, Si, химический элемент IV группы Периодической системы Д.И. Менделеева, темно-серые кристаллы с металлическим блеском, плотностью 2,33 г/см³, стоек к химическим воздействиям. Составляет 29,5% массы земной коры (второе место после кислорода). Главные минералы – кремнезем и силикаты [1].

Тенденции развития сельского хозяйства, возрастающие требования к качеству с.-х. продукции, необходимость восстановления плодородия деградированных почв, поиск альтернативы химическим средствам защиты растений определяют интерес ученых к кремнийсодержащим удобрениям и почвенным мелиорантам.

«Все новое – хорошо забытое старое». Известный парадокс. Ведь еще в середине XIX века на Ротамстедской станции (Великобритания) была доказана необходимость кремниевого питания растений. Потребовалось более 100 лет, чтобы опять в этом убедиться. Вернее сказать – заставила жизнь. В судьбе кремния не все так просто. Опыты выращивания растений без кремния опровергали его необходимость, хотя установлено, что в природной среде все растения содержат кремний. Есть растения кремнефилы: сахарный тростник, рис, пшеница, ячмень (в основном однодольные) и кремнефобы (главным образом двудольные). Кремний - и микро-, и макроэлемент. К сожалению, в учебниках по физиологии растений кремний почти забыт. Вспомнить о важном значении кремния в жизни растений заставила интенсификация сельского хозяйства, поиски технологий снижения пестицидных на-

грузок, необходимость выращивания здоровых растений, дающих качественный урожай.

Для получения высоких урожаев с.-х. культур люди обеспечивают растения всеми необходимыми макро-, мезо- и микроэлементами, но, забывая о кремнии, сталкиваются с глобальной проблемой – дисбалансом между поступлением кремния в растения (в основном водорастворимых соединений) и его выносом с урожаем.

Наиболее известные примеры кремниевых удобрений, добываемых как минеральное сырье, – диатомиты и цеолиты. Эти соединения относительно хорошо растворимы и используются как в промышленности, так и в сельском хозяйстве. Кроме диатомитов и цеолитов, возможно использование и других видов природных минеральных соединений, которые по характеру воздействия на систему почва-растение можно отнести к кремниевым удобрениям: опоки, туфы, пепел, парамонова глина [2]. Также для оптимизации кремниевого питания растений используют пыль каменоломен. Для улучшения физических свойств почв эти соединения обычно вносят в очень высоких дозах, до 30% от массы верхнего почвенного горизонта [2, 3].

Распространенные синтетические кремниевые удобрения: Biosil (производится в Европе), Zumsil (США), RBS (Нидерланды), Эк-Si (Россия). По своему химическому составу это растворы концентрированной монокремниевой кислоты, используемые для опрыскивания растений. Небольшие дозы этих препаратов (2–6 л/га) обеспечивают достаточно высокую эффективность [2]. Рисовую солому, содержа-

ние SiO_2 в которой колеблется от 4 до 20%, в качестве кремниевого удобрения сейчас используют в Китае, Индонезии, Филиппинах. По своим физико-химическим свойствам рисовая солома – одно из наиболее эффективных кремниевых удобрений. Кроме увеличения количества доступного растениям кремния и улучшения физических свойств тяжелых почв показано, что рисовая солома может снижать негативное влияние солей в солонцах и увеличивать микробиологическую активность почв. Кроме рисовой, в качестве кремниевого удобрения также используют солому ячменя, ржи и пшеницы [2]. Удобрения с высоким содержанием аморфного диоксида кремния также успешно получают при переработке рисовой шелухи (лузги); в частности – это препарат диоксилик, производимый ООО «ДиОкс» (Россия). Он показал высокую эффективность при выращивании томата, огурца, капусты и салатных растений.

Дефицит активных форм кремния в агроэкосистеме приводит к снижению почвенного плодородия. Этот эффект выявлен для различных почв, но наиболее выражен на засоленных почвах, а также почвах легкого гранулометрического состава [4]. Выявлены основные механизмы влияния кремния на трансформацию труднорастворимых фосфатов в почве: повышение концентрации монокремниевой кислоты в почвенном растворе приводит к реакции замещения фосфат-аниона на силикат-анион при pH больше 2 для фосфатов кальция и при pH больше 4 для фосфатов магния. Внесение кремниевых удобрений снижает вымывание фосфора из пахотного слоя дерново-подзолистых и песчаных почв [5].

На ряде овощных культур показано, что применение кремния положительно влияет на активизацию ростовых процессов и повышает продуктивность растений [6]. Большинство исследований (в том числе – при гидропонном способе выращивания растений) проводится с использованием водорастворимых форм кремния, применение которых ограничено в органическом земледелии. Однако здесь весьма эффективным может быть применение труднорастворимых форм, например, естественного минерала волластонита [7].

Совместное применение кремниевых и азотных удобрений повышает продуктивность цветной капусты, томатов и кукурузы на 35–70% по отношению к контролю, а также

позволяет снизить содержание нитратов в плодах томатов на 25–30%. Исследование диатомита и монокремниевой кислоты при совместном и раздельном внесении с аммиачной селитрой в опытах с томатами и рассадной культурой: белокачанной и цветной капустой показало увеличение продуктивности (для томатов 70%, для белокачанной капусты 61%, для цветной капусты 226%) по сравнению с вариантами опыта без внесения кремниевых удобрений [5].

Кремний благоприятно действует на снижение токсичности минеральных элементов, нормализует баланс питательных веществ, повышает скорость фотосинтеза и темпы роста плодов, повышение устойчивости растений к разным видам абиотических стрессоров – засухе, засолению, заморозкам, жаре [6]. В условиях солевого стресса введение в систему питания активных форм кремния (жидких и твердых) повышает солеустойчивость культур.

В почве кремнийсодержащие удобрения могут активно закрепляться в составе органического вещества, включаться в органо-минеральные комплексы, теряя при этом свою активность и доступность для растений. Поэтому эффективнее использовать некорневые обработки растений кремнийсодержащими соединениями. Установлено положительное действие кремнийсодержащих хелатных микроудобрений и рассмотрены основные механизмы их фитопротекторного эффекта при действии на растения стрессирующих факторов различной природы [5]. Показано, что общее содержание кремния в листьях, инфицированных патогенными грибами, значительно выше, чем в здоровых. В ранних работах, например, было показано, что кремний подавляет развитие мучнистой росы на растениях огурца [8]. Было также показано, что в огуречных растениях присутствие кремния повышало активность ряда ферментативных белков, вовлеченных в ответные реакции на инфицирование тканей *Pythium* spp.: пероксидазы, полифенолоксидазы и хитиназы [9]. Таким образом, кремний играет важную роль в профилактике развития заболеваний, активируя защитные механизмы и повышая устойчивость растений к патогенным грибам, насекомым и клещам. Установлена положительная роль кремния в стимулировании роста и развития многих растений, повышении урожайности и улучшении качества продукции.

При этом положительный эффект кремния особенно заметен у растений именно в стрессовых условиях [2, 7].

Кремний придает растениям механическую прочность, укрепляет стенки эпидермальных клеток и предотвращает полегание, обеспечивая жесткость различных органов растения. Кремний в оптимальных дозах способствует обмену в тканях азота и фосфора, повышает потребление бора и ряда других элементов, обеспечивает снижение токсичности избыточных количеств тяжелых металлов. Оптимизация кремниевого питания растений приводит к увеличению площади листьев и создает благоприятные условия для биосинтеза пигментов [2].

Одной из важнейших функций активных форм кремния является стимуляция развития корневой системы. Исследования на злаковых, цитрусовых, овощных культурах и кормовых травах показали, что при улучшении кремниевого питания растений у них на 20–100% увеличивается количество вторичных и третичных корешков. Дефицит усвояемого кремния, напротив, служит одним из лимитирующих факторов роста корней. Оптимизация кремниевого питания повышает эффективность фотосинтеза и активность корневой системы [2].

Основная транспортная форма кремния – ортокремниевая кислота (H_4SiO_4). При избыточном поступлении в ткани растения она трансформируется в коллоидную форму и осаждается в виде твердого аморфного вещества ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) – неупотребляемого фитолита, укрепляющего стенки клеток и придающего жесткость тканям [10]. Установлена прямая корреляция между аккумуляцией кремния в растениях и интенсивностью транспирации. Содержание кремния больше около замыкающих клеток устьиц, в трихомах и шипах. Органы и части растений, подверженные стрессовым воздействиям, аккумулируют кремний интенсивнее [10].

Доказано, что кремний играет важную роль в защите растений от вредителей. Упрочнение клеточных стенок путем биоминерализации кремниевых соединений является одним из механизмов, действующих как физический барьер для насекомых, патогенных микроорганизмов, а иногда и травоядных животных [10].

Роль кремния в химической защите растений связывают с его участием

в синтезе вторичных защитных метаболитов, соединений, которые не являются жизненно необходимыми в обмене веществ в растении, но играющая роль в адаптации и противодействию стрессовым условиям [2].

Таким образом, результаты фундаментальных и прикладных исследований доказывают необходимость использования кремниевых удобрений для эффективной борьбы с различными стрессами в жизни растений: биотическими (вредители, грибковые и бактериальные болезни) и абиотическими (засуха, высокие и низкие температуры, полегание, засоление, УФ-излучение) [11].

Литературные данные [2] свидетельствуют о том, что растение более продуктивно использует влагу при внесении активных форм кремния. Известно, что 20–30% находящегося в растении кремния может участвовать в процессе сохранения внутреннего резерва воды и это является одним из механизмов, который позволяет растениям выжить в условиях ее острого недостатка. Одним из факторов повышения засухоустойчивости является способность кремния снижать транспирацию и изменять угол наклона листьев растений, обеспечивая меньший уровень испарения влаги; при этом также возрастают возможности антиоксидантной защиты растения [2, 11].

Вместе с тем доля кремния на рынке минеральных удобрений все еще невелика. Мировое производство кремниевых удобрений составляет примерно 4 млн т в год при потребности 700 млн т; в России производится 0,5 млн т при потребности 175 млн т. В США, Китае, Индии, Бразилии и ряде других стран выпуск кремниевых удобрений ежегодно увеличивается на 20–30%.

В России в овощеводстве используют следующие кремниевые удобрения: Силиплант – удобрение в хелатной форме с микроэлементами; минеральный препарат НаноКремний – удобрение с высоким содержанием биологически активного кремния; Биокремний – органическое удобрение; хелатные микроудобрения КХМ, КХМ-Г и КХМ-А.

В «Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации», внесены также регуляторы роста на основе соединений кремния. Они применяются в существенно меньшей дозировке, чем удобрения, и используются, как правило, для обра-

ботки посевного (посадочного) материала и вегетирующих растений. Препарат Мивал Агро (действующее вещество – триэтаноламмониевая соль ортокрезоксиуксусной кислоты + 1-хлорметилсилатран) рекомендован для применения на картофеле (предпосадочная обработка клубней, опрыскивание вегетирующих растений в начальный период роста и в фазу бутонизации), горохе, томате, сладком перце, луке репчатом, капусте. Аналогичный препарат Энергия М рекомендуется также для обработки посевов моркови, редиса, цветной капусты, баклажана, а также предпосевной обработки семян зеленных культур; помимо активизации роста и повышения продуктивности и устойчивости растений показано, что применение данного препарата снижает накопление в продукции тяжелых металлов (свинца и кадмия). Препарат Черказ (действующее вещество – 1-этилсилатран) применяют на картофеле для повышения выхода товарных клубней и повышения устойчивости к болезням при хранении (обработка клубней перед высадкой и опрыскивание вегетирующих растений в фазу бутонизации и за две недели до уборки). В препарате Экост наряду с гидрофильным диоксидом кремния включены также микроэлементы (медь, цинк, марганец и бор); его применяют при выращивании лука (предпосевной/предпосадочной обработке семян и севка), капусты белокочанной.

Учитывая, что Россия располагает необходимыми природными ресурсами для широкомасштабного производства полноценных кремниевых удобрений, необходимо развивать работы в этом направлении, для чего необходима государственная программа.

Библиографический список

1. Советский энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983. 1600 с.
2. Матющенков И.В. Взаимное влияние кремниевых, фосфорных и азотных удобрений в системе почва-растение: дис. ... канд. биолог. наук. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. М., 2014. 136 с.
3. Рочев В.А. Влияние кремниевых удобрений на плодородие почв // Плодородие и рациональное использование почв Нечерноземья. Пермь: Пермский с.-х. институт, 1988. С. 111–118.
4. Панов Н. П., Гончарова Н.А., Родионова Л.П. Роль аморфной кремниевой кислоты в явлениях солонцеватости почв // Вестник с.-х. науки. 1982. № 11. С. 18–27.
5. Панова Г.Г., Аникина Л.М., Канаеш Е.В., Удалова О.Р., Шибанов Д.В. Кремнийсодержащие микроудобрения в повышении устойчивости растений к действию стрессовых факторов // Агрофизика. 2012. № 3 (7). С. 31–40.
6. Liang Y., Miroslav N., Belanger R.R., Gong H., Song A. Silicon in Agriculture: From Theory to Practice. Dordrecht: Springer Science + Business Media, 2015. 245 p.

7. Dorais M., Theriault M. Beneficial effects of using silicon for organic greenhouse cucumber. Acta Horticulturae. 2018. Vol. 1227. Pp. 443–448.

8. Wagner F. The importance of silicic acid for the growth of some cultivated plants, their metabolism and their susceptibility to true mildews. Phytopathology. 1940. Vol. 12. Pp. 427–479.

9. Cherif M., Asselin A., Belanger R.R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. Phytopathology. 1994. Vol. 84. Pp. 236–242.

10. Самсонова Н.Е. Кремний в растительных и животных организмах // Агрохимия. 2019. № 1. С. 86–96.

11. Ma J. F. Function of silicon in higher plants. Prog. Mol. Subcell. Biol. 2003. Vol. 33. Pp. 127–147.

Об авторах

Тараканов Иван Германович, доктор биол. наук, профессор, зав. кафедрой физиологии растений, ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева.

E-mail: plantphys@rgau-msha.ru.

Паничкин Леонид Александрович, доктор биол. наук, профессор кафедры физиологии растений, ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева.

E-mail: leon.pani4kin09@yandex.ru.

Коноваленко Иван Михайлович, исполнительный директор, Ассоциация независимых российских семенных компаний.

E-mail: info@anrsk.ru

Абрашкина Екатерина

Дмитриевна, канд. с.-х. наук, доцент кафедры земледелия и методики опытного дела, ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева.

E-mail: abrashkina@rgau-msha.ru

Plant and multifunctional silicon

I.G. Tarakanov, DSc, professor, Head of the Department of Plant Physiology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy.

E-mail: plantphys@rgau-msha.ru.

L.A. Panichkin, DSc, professor, Department of Plant Physiology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy.

E-mail: leon.pani4kin09@yandex.ru

I.M. Konovalenko, executive director, Association of Independent Russian Seed Companies. E-mail: info@anrsk.ru

E.D. Abrashkina, PhD, associate professor, Department of Agriculture and methodology of field experiment.

E-mail: abrashkina@rgau-msha.ru

Summary. A review on the role of silicon in soil formation and conservation, phosphorus and nitrogen availability, growth promoting effects and stress tolerance in plants is presented. Perspectives of silicon compounds application in vegetable crops production are discussed.

Keywords: silicon, fertilizers, plant growth regulators, vegetable crops.