

9. Солонкин А.В., Еремин Г.В., Дубравина И.В. Результаты селекции вишни в Нижнем Поволжье на качество плодов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2018. – № 136. – С. 146-156. DOI: [10.21515/1990-4665-136-013](https://doi.org/10.21515/1990-4665-136-013)
10. Ivanova I., Serdyuk M., Malkina V., Tonkha O., Tsyg O., Mazur B., Shkinder-Barmina A., Herasko T., Havryliuk O. Cultivar features of polyphenolic compounds and ascorbic acid accumulation in the cherry fruits (*Prunus cerasus* L.) in the Southern Steppe of Ukraine // Agronomy Research. – 2022. – Vol. 20. – No 3. – Pp. 588–602. DOI: [10.15159/ar.22.065](https://doi.org/10.15159/ar.22.065)
11. Mitra S., Tareq A.M., Das R., Emran T.B., Nainu F., Chakraborty A.J., Ahmad I., Talley T.E., Idris F.M., Simal-Gandara, J. Polyphenols: A first evidence in the synergism and bioactivities // Food Reviews International. – 2023. – Vol. 39. – No 7. – Pp. 4419-4441. DOI: [10.1080/87559129.2022.2026376](https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2026376)
12. Nagy P.T., Thurzó S., Szabó Z., Nyéki J., Silva A.P., Gonçalves B. Influence of foliar fertilization on mineral composition, sugar and organic acid content of sweet cherry // Acta Hort 868: VI International Symposium on Mineral Nutrition of Fruit Crops, 2010. – Pp. 353-358. DOI: [10.17660/ActaHortic.2010.868.47](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.868.47)
13. Nowak D., Gośliński M., Wojtowicz E., Przygoński K. Antioxidant properties and phenolic compounds of vitamin C-rich juices. // Journal of Food Science. – 2018. – Vol. 83. – No 8. – Pp. 2237-2246. DOI: [10.1111/1750-3841.14284](https://doi.org/10.1111/1750-3841.14284)
14. Roeva T.A., Leonicheva E.V., Leontieva L.I., Vetrova O.A., Makarkina M.A. The Features of Potassium Dynamics in 'Soil-Plant' System of Sour Cherry Orchard // Plants. – 2023. – Vol. 12. – No. 17. – Pp. 3131. – DOI: [10.3390/plants12173131](https://doi.org/10.3390/plants12173131)
15. Schuster M. Sour cherries for fresh consumption // Acta Hort. – 2019. – No. 1235. – Pp. 113–118. doi: [10.17660/ActaHortic.2019.1235.15](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1235.15)
16. Tavadyan L.A., Minasyan S.H. Synergistic and antagonistic co-antioxidant effects of flavonoids with trolox or ascorbic acid in a binary mixture // Journal of Chemical Sciences. – 2019. – 131. – No (Art.) 40. <https://doi.org/10.1007/s12039-019-1618-5>
17. Uçgun K. Effects of nitrogen and potassium fertilization on nutrient content and quality attributes of sweet cherry fruits // Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 2019. Volume 47(1). Pp. 114-118. DOI: [10.15835/nbha47111225](https://doi.org/10.15835/nbha47111225)
18. Vasylyshyna O.V. Вплив кліматичних факторів на формування вмісту сухих розчинних речовин та цукрів у плодах вишні // Agrology. – 2019. – Т. 2. – №. 1. – С. 27-30.
19. Yene H., Altuntaş Ö. Effects of potassium fertilization on leaf nutrient content and quality attributes of sweet cherry fruits (*Prunus Avium* L.) // Journal of Plant Nutrition. – 2021. – Vol. 44. – No 7. – Pp. 946–957. DOI: [10.1080/01904167.2020.1862203](https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1862203)

THE EFFECT OF MINERAL FERTILIZERS AND HYDROTHERMAL CONDITIONS OF THE GROWING SEASON ON THE CONTENT OF ASCORBIC ACID AND PHENOLIC COMPOUNDS IN CHERRY FRUITS

M.A. Makarkina, Doctor of agr. sci., O.A. Vetrova, Candidate of agr. sci., T.A. Roeva, Candidate of agr. sci., A.A. Gulyaeva, Candidate of agr. sci.

*Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding (VNIISPK)
302530 Zhilina, 1, Orel region, Orel district, makarkina@orel.vniispk.ru*

The influence of nitrogen and potash fertilizers and hydrothermal conditions of the growing season on the content of biologically active substances (ascorbic acid and phenolic compounds) in the fruits of the cherry cultivar Turgenevka was studied. The scheme of the experiment included the application of mineral fertilizers in increasing doses throughout 2017...2021. The application of nitrogen and potash fertilizers did not have a significant effect on the content of ascorbic acid, anthocyanins and the amount of P-active substances in fruits. It was found that the most important factor affecting the chemical composition of fruits was the meteorological conditions of the growing season, precipitation to a greater extent. The content of ascorbic acid, anthocyanins, leucoanthocyanins, catechins and the sum of P-active substances in cherry fruits increased significantly in years with greater moisture availability.

Key words: cherry; nitrogen and potash fertilizers, hydrothermal conditions, ascorbic acid, phenolics.

УДК 631.811.93:581.192

DOI: 10.25680/S19948603.2024.136.07

ЗНАЧЕНИЕ КРЕМНИЯ И КРЕМНИЕВЫХ УДОБРЕНИЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ (обзор)

*Т.С. Зинковская, к.с.-х.н., Г.Ю. Рабинович, д.б.н., Е.А. Подолян, к.с.-х.н.,
Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»
119017, Москва, Пыжевский пер., д.7, стр. 2, E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru*

На основе отечественных и зарубежных публикаций обобщены материалы о роли и значимости кремния в жизни растений и почвенном плодородии. Показано влияние этого элемента на стрессоустойчивость культур к различным абиотическим и биотическим факторам. Проанализированы естественные источники пополнения кремния. Дана краткая характеристика кремнийсодержащих удобрений. Сделан вывод, что кремний является важным элементом почвенного плодородия и питания растений, повышающим урожайность и качество возделываемых культур.

Ключевые слова: кремний, плодородие, растения, кремнийсодержащие удобрения.

Для цитирования: Зинковская Т.С., Рабинович Г.Ю., Подолян Е.А. Значение кремния и кремниевых удобрений в сельском хозяйстве (обзор) // Плодородие. – 2024. – №1. – С. 26-31. DOI: 10.25680/S19948603.2024.136.07.

В последние десятилетия возрос интерес к применению кремния в сельском хозяйстве. Низкие урожаи полевых культур, обусловленные как невысоким уровнем естественного плодородия, так и социальными, климатическими и другими проблемами, вызывают необходимость искать приёмы, способствующие увеличению объема и качества продукции растениеводства. Один из таких способов - внесение удобрений, содержащих кремний.

Источником этого элемента выступают такие породы как цеолит, диатомит, трепел, опоки, доломит, а также солома риса, ячменя, ржи, пшеницы, отходы промышленности и др. [6]. Также используют получаемые при помощи химического синтеза силикаты натрия, калия, кальция, аморфный тонкодисперсный диоксид кремния. Их вносят как отдельно, так и в смеси с органическими субстратами. Синтетическим кремнием обрабатывают в

основном семена культур перед посевом и применяют для некорневой обработки растений.

Открытие специфической биологической активности соединений кремния, названных силатранами, опровергло устоявшиеся представления об их инертности. Выявлен широкий круг культурных растений, на которые силатраны действуют как биостимуляторы и средства защиты. При этом они повышают не только урожайность культур, но и их устойчивость к неблагоприятным факторам среды. Кремний укрепляет стенки эпидермальных клеток, что позволяет растениям противостоять полеганию [19].

Доказано, что кремний способствует сопротивляемости растений к различным стрессам, оказывая влияние на генетический аппарат организма, повышая стабильность нуклеиновых кислот [12, 33].

Кроме того, исследования ряда авторов [52] показали, что кремний усиливает поступление фосфора в растения в ходе замещения в почве анионов фосфата на ионы силиката при внесении активных форм данного элемента. Причем при возрастании водородного показателя почвы скорость реакции усиливается. Имеются данные [18] о положительном влиянии кремния на поглощение растениями азота. Исключение кремния из питательной среды снижает поступление азота в растения. Помимо этого, оптимизация кремниевого питания способствует более развитой корневой системе, усилению фотосинтеза и др. [19].

Цель обзора – проанализировать и обобщить роль кремния в физиологических процессах растений и формировании урожая, особенностях его потребления, дать краткую характеристику удобрениям, содержащим этот элемент и показать их влияние на продуктивность культур.

В статье представлен обзор отечественных и зарубежных публикаций, размещенных в журналах и открытом доступе в сети Интернет. Особое внимание уделялось статьям за последние пять лет.

Основная часть. Кремний (Si) широко распространен в почве, не уступая по своей важности и вкладу в плодородие таким элементам, как азот, фосфор и калий [12, 47, 52]. Среди культурных растений доля данного химического элемента в золе составляет в среднем 0,16–8,4 %. Одни из самых высоких значений установлены для злаковых культур, которые могут составлять от 8 до 16 % [13, 26]. При этом к кремнефилам относят некоторые ягодные (земляника), подсолнечник, сахарный тростник, свеклу, рис [13].

О важности кремния заговорили уже в XIX в., когда известный ученый в области питания растений Юстус Либих начал изучение силикатов в земледелии и доказал важность кремния во многих почвенных и растительных процессах. Помимо этого, он высказывал необходимость возобновления вынесенного с урожаем количества элемента в связи с его вкладом в структурированность почвы и качество плодородия. Им отмечено, что постоянный вынос кремния влияет на увеличение темпов деградации почв [18].

В почве кремний встречается в различных формах. К твердым формам относятся силикатные минералы, имеющие кристаллическую структуру (кварц, полевой шпат, слюда, различные глинистые минералы), а также микрокристаллическую или слабокристаллическую структуру (аллофан, имоголит, опал) [51]. Данные минералы формируют скелет почвы, имеют высокую

устойчивость к выветриванию [20]. В то же время существуют более подвижные виды соединений кремния в почве, представленные аморфной, активной и водорастворимой формами. Водорастворимые формы могут быть непосредственно доступны растениям, в то время как остальная часть сначала превращается в водорастворимую форму при благоприятных условиях, а затем становится легкодоступной для растений [45]. Аморфный кремнезем включает кремний как минералогического происхождения, входящий в состав педогенных оксидов (например, оксидов железа), так и биогенный (диатомовые водоросли, фитолиты) [51]. Все они могут подвергаться растворению при различных условиях и скоростях, становясь источником доступных для растений монокремниевых и поликремниевых кислот. Обе кислоты, в свою очередь, могут адсорбироваться на частицах почвы (например, оксидах и гидроксидах железа или алюминия). Поликремниевая кислота мобилизуется при растворении богатых кремнием твердых веществ, тогда как в равновесии кремний в растворе находится в виде монокремниевой кислоты [39]. Однако на ранних стадиях растворения присутствие полимерных частиц может составлять примерно 50 % от общего количества растворенного кремнезема [42]. Поликремниевая кислота со временем превращается в монокремниевую, если ее концентрация намного ниже насыщения. Однако с увеличением концентрации кремниевой кислоты в растворе происходит полимеризация монокремниевой кислоты в поликремниевую кислоту. Абсорбция поликремниевой кислоты минеральными поверхностями идет значительно быстрее, чем сорбция монокремниевой кислоты, и является обратимой. Следовательно, монокремниевая кислота более распространена в поровых водах почвы, чем поликремниевая кислота [37]. Благодаря мономерной или монокремниевой (H_4SiO_4) природе, в почвенном растворе кремний легко поглощается корневой системой и накапливается в растениях [44]. Однако на биодоступность кремния и транспортировку в растение существенно влияют различные эдафические факторы. Большое количество осадков приводит к вымыванию Si, подкислению почвы, что оказывает негативное воздействие на запасы Si в почве и вызывает уменьшение его биодоступности для растений [53].

Кремний может влиять на почвенные характеристики, улучшая воздушный и водный режимы, увеличивая содержание питательных веществ (азота, фосфора и калия), изменяя pH, снижая токсичность тяжелых металлов за счет улучшения характеристик почв и образования новых силикатных комплексов [37, 51, 58]. Замечено влияние кремния на микробную среду, что приводит к улучшению свойств почвы и доступности большего количества органического вещества и минералов для корней растений [49].

Воздействие кремния на растения, как напрямую, так и опосредованно через почву, многогранно. Поглощенный кремний уменьшает поступление тяжелых металлов и их транслокацию от корня к побегу, активируя антиоксидантную систему, хелатирование, компартментацию, а также регулируя экспрессию генов - переносчиков тяжелых металлов [37, 41]. В исследованиях с различными видами культур, таких как пшеница, кукуруза, рис, арахис и хлопчатник, доказано значительное улучшение их роста в присутствии Si при стрессе тяжелыми металлами [47]. В частности, наблюдалось усиление устойчивости культур к повышенному содержанию кадмия в почве [4]

в опытах по внесению кремнийорганического удобрения, полученного при обработке бурого угля раствором монокремниевой кислоты. Причём данный приём по сравнению с раздельным действием бурого угля и монокремниевой кислоты обеспечивал спад концентраций кадмия в надземной части растений.

Устойчивость к различным стрессам под действием кремния может проявляться за счет влияния данного элемента на генетический аппарат растения [38, 43, 49]. В частности, повышается стабильность молекул нуклеиновых кислот, которая, по всей видимости, основана на свойствах кремния, схожих с атомом фосфора, что позволяет также встраиваться в ДНК и РНК [3]. Такие соединения кремния создают сахаросиликатные участки в каркасе молекул нуклеиновых кислот, повышая их прочность [13]. Кроме того, выявлено сокращение G₁-периода и повышение средних значений концентрации ДНК в опытах с применением аморфного кремнезема [5]. Отмечена обратная зависимость протяженности G₁-периода от содержания активного кремния в почве и монокремниевой кислоты.

Установлено, что большая часть кремния также встраивается в образования внутри или между клеточными стенками [40], при этом положительно влияя на морфологические показатели растительных организмов. Химические соединения, в состав которых входит кремний, встраиваясь в клетки, способствуют изменению угла наклона листовых пластинок. При этом обеспечивается сокращение испарения воды, развиваются засухоустойчивая способность растения и его антиоксидантная защита [20]. Также усиливается фотосинтетическая активность, улучшается корневая система, уменьшается полегание зерновых за счет увеличения прочности стенок эпидермальных клеток. Кроме того, происходит ограничение переноса через плазматическую мембрану и связывание тяжелых металлов путем образования прочных кремнеземных барьеров [39].

Исследования [21] по внесению активных форм кремния доказывают его влияние на поглощение такого важного элемента, как фосфор путём реакции замещения фосфат-анионов на силикат-анионы в почвах. Интенсивность этой реакции увеличивается с возрастанием pH системы. Полученные результаты показали перспективность использования кремниевых удобрений для повышения содержания доступного фосфора для растений. Имеются данные [13] о положительном влиянии кремния на поглощение растениями азота и других элементов.

Применение удобрений с кремнием способно улучшать иммунитет растений, увеличивать продуктивность культур, повышать качество получаемой продукции [14].

Недостаток кремниевого питания имеет ряд последствий: снижение качества продукции растениеводства, резистентности культур к неблагоприятным факторам среды. За этим фактом следует повышение доз пестицидов и минеральных удобрений [16]. При оптимальном содержании кремния в почве растения могут противодействовать негативному влиянию вредителей [18, 57].

Эксперименты в области земледелия, связанные со значением соединений кремния в системе почва-растение, способствовали расширению роли его применения в виде различных удобрений. Включение кремния в физиологические процессы растений настолько велико, что с урожаем ежегодно выносятся довольно большие его

количество [2]. Поэтому в почвах складывается, как правило, отрицательный баланс кремния, и чтобы его уравновесить, важно пополнение этого элемента с удобрениями [10]. В частности, источником кремния могут выступать естественные породы – кремнеземы – как сырьё растворимого кремния [10]. Находят широкое применение природные минеральные образования: диатомиты, цеолиты, трепел и другие, которые различаются своим происхождением.

Диатомиты обладают высокими показателями пористости, устойчивости к кислотности почв и колебаниям температур, также значительной поглотительной способностью. Данная порода содержит более 80 % SiO₂, располагается между опок объемными линзами и образована из панцирей мелких диатомей [31]. Одним из наиболее перспективных для использования в сельском хозяйстве является диатомитовое Камышловское месторождение Свердловской области, где добывают кремнийсодержащую породу в больших объемах [10]. Существует технология использования диатомита в земледелии, когда он вносится в измельченном состоянии порошка и имеет вид тонкозернистой легкой породы. Такой прием ускорял распад полотен льняной ткани до 38 % при возделывании ячменя на черноземе выщелоченном [31]. На Урале диатомит вносят в чистом виде, что оказывает существенное действие на плодородие почвы, в частности, усиливает микробную активность и другие показатели, увеличивая урожай овощных культур [10]. Так, в вариантах, где вносили диатомит до 4 т/га, продуктивность столовой свеклы достоверно повышалась относительно контроля на 19 %.

Ещё одним источником пополнения кремния в почве выступает природный минерал цеолит, который имеет осадочное происхождение и вид серой крошки. Цеолит образован кремнийсодержащими остатками скелетов радиолярий, диатомовых водорослей, морских игл и губок и состоит из клиноптилолита (36 %), монтмориллонита (20–25 %), оксида алюминия (до 10 %), оксида железа (до 4 %). Доля подвижного кремния варьирует от 7 до 9 %. Кроме того, цеолиты могут содержать микро- и макроэлементы в подвижной форме, например, бор, медь, молибден, цинк, которые имеют важное значение в формировании плодородия дерново-подзолистых почв [29]. Ценное качество цеолита заключается в способности адсорбировать аммиак и высвобождать его постепенно, обеспечивая тем самым постоянное пополнение почвы азотом [9].

Одно из мест добычи цеолита – Хотынецкое месторождение Орловской области. Исследование [36] удобрения на его основе в дозе 0,5 т/га показало, что в клетках яровой пшеницы сорта Любава происходили изменения в структуре хлорофилла при выращивании на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве. Так, наблюдался спад образования хлорофилла b и в то же время происходило повышение синтеза хлорофилла a. При этом соотношение хлорофилла, а к хлорофиллу b увеличилось относительно контроля до 6 раз. Также наблюдалось повышение урожайности яровой пшеницы сорта Дарья от применения цеолита в аналогичной дозе при засушливых условиях – на 34 % [29]. В вариантах с внесением удобрения (по сравнению с контролем) в растительных клетках отмечалось повышение доли связанной воды ввиду перестройки её структуры. При этом связанная вода в условиях засухи имела тенденцию к высвобождению. Данное свойство является фактором

приспособления растений к меняющимся условиям влагообеспеченности в связи с тем, что обводненность клеток выступает главным условием для протекания жизненно важных физиологических процессов [27, 29]. Выявлено воздействие кремния на механизмы стабилизации продукционного процесса в меняющихся условиях выращивания сельскохозяйственных культур через индукцию активности антиоксидантных ферментов каталазы и пероксидазы [30]. Во время цветения между активностью пероксидазы и продуктивностью пшеницы установлена тесная (при менее благоприятных погодных условиях) положительная корреляция.

Как отмечают отечественные авторы [32], состав цеолитов может меняться в зависимости от месторождения, что отражается на колебаниях их эффективности и требует изучения для каждого конкретного месторождения в разных почвенно-климатических условиях. При внесении цеолита Хотынецкого месторождения наблюдалось повышение содержания кремния в растениях яровой пшеницы и овса: в зерне – на 6,7-7,5 %, в соломе – на 5,5-6,0 % относительно контроля [32].

По мнению некоторых исследователей [14], удобрения на основе как диатомитов, так и цеолитов содержат кремний в виде малодоступных для растений соединений. В связи с этим ведутся поиски технологий производства препаратов, содержащих наночастицы кремния. Образования размером до 100 нм обладают новыми специфическими характеристиками [52]. Кроме того, в исследованиях нанопрепарата с содержанием кремния, наиболее эффективное влияние оказывало совмещение некорневой подкормки вегетирующих растений с предпосевной обработкой семян [8]. Такой приём способствовал повышению урожая зерна овса на 31 %, пшеницы – на 33 %.

Установлено положительное действие кремнийсодержащего удобрения «НаноКремний» на такие характеристики полевых культур, как урожайность, рост и развитие в экспериментах с однократным и двукратным применением препарата [52]. В данном препарате содержатся наночастицы кремния размером 5 нм, поэтому он практически полностью усваивается растениями [35, 52]. Предпосевная обработка зерна яровой пшеницы способствовала снижению семенной инфекции с 12,6 % (контроль) до 7,8 % (с удобрением) [35]. Под действием препарата отмечалось повышение интенсивности роста побегов. В удобренных вариантах средняя высота яровой пшеницы составила 91,7 см, что на 9,2 см превышало высоту растений с контрольных участков [52]. Образование хлорофилла повышалось на 20-30 %, а уровень чистой продуктивности фотосинтеза – на 60-80 % [35]. Биологическая продуктивность зерновых культур повышалась за счет увеличения длины колоса на 0,25 мм, и как следствие, наблюдалось возрастание количества зёрен в колосе на 1,6 шт., что составляло 20,7 шт/колос. Также увеличилась биологическая урожайность яровой пшеницы на 16,6 % по сравнению с контролем и повысилось содержание сырой клейковины [14, 35]. В контрольном варианте опыта без обработок доля сырой клейковины составила 28,2 %, что соответствует первому сорту, а в варианте с применением препарата НаноКремний – 30,8 %, что соответствует высшему сорту¹.

При двукратной обработке препаратом НаноКремний, заключавшейся в протравливании семян и опрыскивании вегетирующих растений, прибавка урожая пшеницы к контролю составила 6,7% [52]. При этом наблюдается стимуляция развития корневой системы, способствующая усилению всхожести семян [35]. Попадая в клетку растения, биологически активные соединения влияют на обмен веществ, образование ферментов и гормонов, таким образом активизируют гены аквапорина, ускоряющие митоз и рост органов растения [48].

Наночастицы металлов менее токсичны и характеризуются пролонгированным воздействием на биологические объекты [11]. Тем не менее, существует риск их отрицательного влияния на плодородие почвы и продуктивность возделываемых культур [55]. По данным зарубежных авторов [42, 46, 54], наночастицы кремния могут иметь негативные последствия, которые напрямую зависят от повышения концентрации и химической природы соединения, а также от вида растений.

Полевые опыты [25] с наночастицами (НЧ) оксида кремния (SiO_2), полученными методом плазмохимического синтеза (ООО «Передовые порошковые технологии», г. Томск), в разных концентрациях показали, что на начальных этапах нанометалл тормозил рост растений картофеля, но к вегетации оказывал стимулирующее действие на развитие при концентрации 0,18 г/кг. Масса одного клубня при этом превышала контроль в 3 раза. Более высокая концентрация НЧ SiO_2 (0,36 г/кг) вызывала снижение массы стеблей, листьев и продуктивности картофеля.

В тепличном производстве овощей питательный капельный раствор с содержанием кремния способен обеспечить с поливом повышение продуктивности культур [24]. В опытах [22] с замачиванием перед посевом семян огурца в растворе кремнийсодержащего удобрения (силикат натрия) в концентрации 0,01 % в течение 4 ч, а также шестикратной вегетативной обработкой растений проявился высокий эффект стимуляции роста и развития.

Силикат натрия способен благоприятно влиять и на полевые культуры. Предпосевная обработка семян обеспечивала достоверную прибавку массы соломы 10-16 % к контролю в почвах с повышенным содержанием кадмия [17]. В то время как обработка селенитом натрия такого действия не оказывала.

Кремний может входить в состав органических удобрений, что положительно сказывается на физиологических процессах растений. Так, предпосевная обработка семян овса в растворе гуматов (4 мл/л) и кремния в хелатной форме (2 мл/л) дала повышение всхожести семян по сравнению с контролем на 29,2 %, в то время как в растворе одних лишь гуматов – на 4,2 % [34].

В настоящее время существуют такие коммерческие препараты, как ДиаГум, Келик Калий-Кремний, Мивал-Агро и др. ДиаГум представляет собой гранулированное кремнийорганическое удобрение длительного действия. По экспериментальным данным [23], ДиаГум повышает урожайность яровой пшеницы в среднем на 17 %, картофеля – на 19, кукурузы – 22, томата – 25, сахарной свеклы – 25, семян подсолнечника – 24, моркови – на 14 %. Аморфный кремний, входящий в состав удобрения,

¹ ГОСТ Р 52189-2003 «Мука пшеничная. Общие технические условия». – М.: Госстандарт России, 2003. – 8 с.

совместно с витаминами, гуминовыми и аминокислотами усиливает механические ткани растительного организма, способствуя укреплению побегов. Также повышаются число стеблей и их высота, площадь листовых пластинок и устойчивость к неблагоприятным абиотическим факторам среды.

Органоинеральный препарат Келик Калий-Кремний, обладающий характеристиками иммунопротектора, в своем составе имеет хелатные формы калия и кремния ($15 \text{ K}_2\text{O}=10 \text{ SiO}_2$). Данное удобрение способно корректировать дефицит калия и кремния в почве. Имея жидкую форму, оно приспособлено как для некорневых обработок, так и для различных типов капельного полива. По данным производителя ООО «ГК «Агроплюс», удобрение способствует увеличению урожайности и повышению качества продукции, в том числе увеличению содержания сахаров [28].

Мивал-Агро – кремнийорганический регулятор роста растений. Как заявляет производитель ООО «АгроСил», препарат содержит 80 % кремнийорганического вещества мивал, а 20 % составляет крезацин – ауксиноподобное соединение. Содержание непосредственно кремния – 2,38 % [29]. Мивал-Агро обладает широким спектром биологического действия, адаптогенными и антиоксидантными свойствами. При этом [31] предпосевная обработка данным препаратом клубней картофеля ранне-спелого сорта Алёна повышала урожайность на 34 %. Выявлено его положительное действие на микрофлору с повышением общего числа микроорганизмов в черноземной среднесуглинистой среднегумусной почве на 8,5 %. Поражение клубней картофеля такими заболеваниями, как ризиктония снижалось на 66 %, фитофтороз – на 50, парша – на 25 %. Также повышалась активность целлюлозолитических микроорганизмов на 32-35 % в опытах на черноземе выщелоченном [29]. Отечественные исследования показали, что препараты, содержащие кремний, оказывают стимулирующее воздействие на деятельность протеолитических, амилолитических бактерий и олигонитрофилов и снижают численность фитопатогенных грибов и актиномицетов [31].

Заключение. Кремний является важным компонентом почвенного плодородия и питания растений. Обладая рядом ценных качеств, он способствует повышению иммунитета у растений и устойчивости к неблагоприятным факторам среды в условиях изменяющегося климата. Кроме того, кремниевый компонент удобрений увеличивает урожайность и качество культур, что особенно важно в условиях необходимости интенсификации АПК.

Использование кремнийсодержащих мелиорантов представляет собой безопасные методы повышения обменных процессов в организме растений [1, 15]. Дальнейшее развитие сельскохозяйственного производства, внедрение чистых, так называемых экологических, технологий выращивания растений и обеспечение продовольственной безопасности затруднены без применения кремниевых удобрений [20].

Литература

1. Аллахвердиев С.Р. Современные технологии в органическом земледелии / С.Р. Аллахвердиев, В.И. Ерошенко // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 1. – С. 76–79.
2. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах / Н.И. Базилевич, Л.Е. Родин, Н.Н. Розов // Ресурсы биосферы. – 1975. – Вып. 1. – С. 5-33.

3. Бочарникова Е.А. Кремниевые удобрения и мелиоранты: история изучения, теория и практика применения / Е.А. Бочарникова, В.В. Матыченков, И.В. Матыченков // Агрохимия – 2011. – № 7. – С. 84-96.
4. Бочарникова Е.А. Влияние бурого угля, монокремниевой кислоты и кремнийорганического мелиоранта на их основе на поглощение кадмия ячменем и горохом / Е.А. Бочарникова, В.В. Матыченков, В.П. Сафронов, С.И. Носенко // Агрохимия. – 2016. – № 5. – С. 41-46.
5. Бочарникова Е.А. Влияние оптимизации кремниевого питания на устойчивость ДНК ячменя / Е.А. Бочарникова, Е.П. Пахненко, В.В. Матыченков, И.В. Матыченков // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2014. – № 2. – С. 40-43.
6. Воронков М.Г. Силатраны в медицине и сельском хозяйстве / М.Г. Воронков, В.П. Барышник. – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2005. – 255 с.
7. Егоров Н.П. Перспективы использования нанотехнологий в земледелии и растениеводстве / Н.П. Егоров, О.Д. Шафранов, Д.Н. Егоров // Актуальные проблемы земледелия Нижегородской области: Мат. науч.-практ. конф. 30.10.2007 г. – Н. Новгород, 2008. – С. 34-44.
8. Забегалов Н.В. Влияние кремнийсодержащего нанопрепарата на урожайность и содержание кремния в зерновых культурах / Н.В. Забегалов, Е.В. Дабахова // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 12. – С. 22-24.
9. Исакова В. Г. Влияние биогумуса и цеолита на динамику питательных веществ / В. Г. Исакова // Бюллетень науки и практики. – 2022. – №11. – Т.8. – С. 158-167.
10. Карпунин М.Ю. Эффективность применения диатомита Камышловского месторождения Свердловской области при возделывании столовой свеклы / М.Ю. Карпунин // Аграрный вестник Урала. – 2014. – № 8 (126). – С. 58-60.
11. Коваленко Л.В. Биологически активные нанопорошки железа / Л.В. Коваленко, Г.Э. Фолманис. – М.: Наука, 2006. – 124 с.
12. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова / В.А. Ковда. – М.: Наука, 1985. – 263 с.
13. Козлов А.В. Физиологическое значение кремния в онтогенезе культурных растений и при их защите от фитопатогенов / А.В. Козлов, И.П. Уромова, Е.А. Фролов, К.Ю. Мозолева // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 1. – С. 54-47.
14. Косачев, И.А. Влияние кремнийсодержащего препарата Нанокремний на рост, развитие и продуктивность сельскохозяйственных культур в условиях Алтайского края / И.А. Косачев, В.Н. Чернышков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 9 (167). – С. 23-28.
15. Кузьмицкая Г.А. Экологически безопасные методы повышения продуктивности огурца / Г.А. Кузьмицкая, Н.В. Кулякина // Аграрная наука. – 2011. – № 8. – С. 19-20.
16. Куликова А.Х. Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур / А.Х. Куликова. – Ульяновск: Изд-во Ульяновской ГСХА, 2012. – 167 с.
17. Лапушкина А.А. Агроэкологическая оценка изменения содержания кадмия в растениях ярового ячменя под влиянием селена и кремния / А.А. Лапушкина, А.Д. Аленичева, И.В. Верниченко, О.А. Щуклина, И.Н. Ворончихина // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2021. – Т. 29. – № 2. – С. 138-146.
18. Матыченков В.В. Кремниевые удобрения как фактор повышения засухоустойчивости / В.В. Матыченков, А.А. Кособрухов, И.И. Шабанова, Е.А. Бочарникова // Агрохимия. – 2007. – № 5. – С. 63-67.
19. Матыченков И.В. Изменение содержания подвижных фосфатов почвы при внесении активных форм кремния / И.В. Матыченков, Е.П. Пахненко // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 3 (23). – С. 24-28.
20. Олива Т.В. Влияние стимуляторов роста на морфометрические показатели к началу фазы плодоношения тепличного огурца / Т.В. Олива, С.Д. Лицуков, С.И. Панин // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 62-67.
21. Официальный сайт ООО «НПК ГидроИнТех». – Режим доступа: <http://gidrointech.ru/> (дата обращения 25.09.2023).
22. Панова Г.Г. Фитопротекторная роль кремнийсодержащих хелатных микроудобрений / Г.Г. Панова // Вестник РАСХН. – 2009. – № 2. – С. 19-21.
23. Пашина Т.А. Биометрические изменения картофеля (*Solanum tuberosum*) под влиянием наночастицы SiO_2 / Т.А. Пашина, А.А. Мушинский, Е.В. Аминова, Д.М. Муслимова, Т.П. Багадиди // Животноводство и кормопроизводство. – 2018. – Т. 101. – № 4. – С. 210-216.
24. Пашкевич, Е.Б. Роль кремния в питании растений и в защите сельскохозяйственных культур от фитопатогенов / Е.Б. Пашкевич, Е.П. Кирюшин // Проблемы агрохимии и экологии. – 2008. – № 2. – С. 52-57.
25. Рабинович Г.Ю. Получение новых кремнийорганических удобрений и их апробация при моделировании водных стрессов / Г.Ю. Рабинович, Ю.Д. Смирнова, Н.В. Фомичева // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2020. – Т. 10. – № 2 (33). – С. 284-293.
26. Радчевский П.П. Влияние некорневой подкормки минеральными удобрениями нового поколения на агробиологические и

- технологические показатели винограда сорта Шардоне / П.П. Радчевский, Н.В. Матузок, С.С. Базоян // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – №115. – 89-94.
27. Самсонова Н.Е. Влияние соединений кремния и сложного NPK-удобрения на водный режим листьев и урожайность яровой пшеницы / Н.Е. Самсонова, З.Ф. Зайцева, М.В. Капустина, Н.А. Антонова // Агрохимия. – 2014. – №9. – С. 58-66.
28. Самсонова Н.Е. Влияние соединений кремния и минеральных удобрений на урожайность яровых зерновых культур и содержание в них антиоксидантных ферментов / Н.Е. Самсонова, М.В. Капустина, З.Ф. Зайцева // Агрохимия. – 2013. – № 10. – С. 66-74.
29. Смывалов В.С. Влияние кремнийсодержащих материалов и минерального удобрения на биологическую активность чернозема выщелоченного / В.С. Смывалов, Д.А. Захарова, А.Е. Яшин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 3 (39). – С. 19.
30. Титова В.И. Сравнительное изучение влияния цеолита и минеральных удобрений на продуктивность зерновых культур и агрохимическую характеристику светло-серой лесной легкосуглинистой почвы / В.И. Титова, Н.В. Забегалов // Почвоведение и агрохимия. – 2014. – № 1 (52). – С. 190-198.
31. Уромова И.П. Влияние кремнийсодержащей агоруды на продуктивность и качество злаковых культур / И.П. Уромова, Н.Н. Колосова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6-5. – С.908-911.
32. Хамитова Д.М. Влияние стимуляторов роста на фотосинтетическую деятельность у растений овса сорта «Рысак» / Д.М. Хамитова, И.Т. Садертдинова, А.А. Сергеева // Сборник научных статей 2-й Всероссийской конференции «Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодежи ученых». – Т. 5. – 2021. – С. 272-277.
33. Хорошилов А.А. Фотосинтетическая продуктивность и структура урожая яровой пшеницы под влиянием нанокремния в сравнении с биологическим и химическим препаратами / А.А. Хорошилов, Н.Е. Павловская, Д.Б. Бородин, И.В. Яковлева // Сельскохозяйственная биология. – 2021. – Т. 56, № 3. – С. 487-499.
34. Шупинская, И.А. Влияние корневого и foliarного питания растений минеральными удобрениями и соединениями кремния на показатели фотосинтетической деятельности и урожайность зерна яровой пшеницы / И.А. Шупинская, Н.Е. Самсонова, Н.А. Антонова // Агрохимия. – 2017. – № 2. – С. 11-18.
35. Adrees M. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review / M. Adrees, S. Ali, M. Rizwan, M. Zia-Ur-Rehman, M. Ibrahim, F. Abbas, M. Farid, M.F. Qayyum, M.K. Irshad // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2015. Vol. 119. P.186-197.
36. Belanger R.R. Understanding the benefits of silicon feeding in plants through transcriptomic analyses / R.R. Belanger // Proc. 4th Intern. Conf. Silicon in Agriculture. South Africa, 2008.
37. Bhat J.A. Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants / J.A. Bhat, S.M. Shivaraj, P. Singh, D.B. Navadagi, D.K. Tripathi, P.K. Dash, A.U. Solanke, H. Sonah, R. Deshmukh // Plants. 2019. Vol. 8. P. 71. DOI:10.3390/plants8030071
38. Currie H.A. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies / H.A. Currie, C.C. Perry // Annals of Botany. 2007. Vol. 100. P. 1383-1389. DOI:10.1093/aob/mcm247
39. Etesami H. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants / H. Etesami, B.R. Jeong // Ecotoxicol. Environ. Saf., 2018. Vol. 147. P. 881-896. DOI:10.1016/j.ecoenv.2017.09.063
40. Ghosh S.K. In vitro study of lysis of cell wall preparation from phomopsisvexans by lytic enzyme from some biocontrol agents / S.K. Ghosh, S. Pal, S. Banerjee, N. Chakraborty // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2015. Vol. 4 (10). P. 153-157.
41. Gong H.J. Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different development stages / H.J. Gong, K.M. Chen, Z.G. Zhao // Biol. Plant. 2008. Vol. 52. P. 592-596.
42. Hodson M.J. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants / M.J. Hodson, P.J. White, A. Mead, M.R. Broadley // Annals of Botany. 2005. Vol. 96. P. 1027-1046. DOI:10.1093/aob/mci255
43. Khan I. Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review / I. Khan, S.A. Awan, M. Rizwan, S. Ali, M. J. Hassan, M. Brestic, X. Zhang // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2022. Vol. 222. P. 54-61. DOI:10.1016/j.ecoenv.2021.112510
44. Le V.N. Uptake, transport, distribution and bio-effects of SiO₂ nanoparticles in Bt-transgenic cotton / V.N. Le, Y. Rui, X. Gui, X. Li, S. Liu, Y. Han // Journal of Nanobiotechnology. 2014. Vol. 5. P. 12-50. DOI:10.1186/s12951-014-0050-8
45. Liang Y. Christie Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review / Y. Liang, W. Sun, Y.G. Zhu, P. // Environ. Pollut. 2007. Vol. 147. P. 422-428. DOI:10.1016/j.envpol.2006.06.008
46. Liu P. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Soeghumbicolor* L. / P. Liu, L. Yin, S. Wang, M. Zhang, X. Deng, S. Zhang, K. Tanaka // Environmental and Experimental Botany. 2015. Vol. 111. P. 42-51. DOI:10.1016/j.envexpbot.2014.10.006
47. Ma C. Impacts of exogenous mineral silicon on cadmium migration and transformation in the soil-rice system and on soil health / C. Ma, K. Ci, J. Zhu, Z. Sun, Z. Liu, X. Li, Y. Zhu, C. Tang, P. Wang, Z. Liu // Sci. Total Environ. 2021. Vol. 10. P. 759. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143501
48. Ma J.F. Role of silicon in enhancing the resistance of plant to biotic and abiotic stresses / J.F. Ma // Soil Sci. Plant Nutr. 2004. Vol. 50 (1). P. 11-18/ DOI:10.1080/00380768.2004.10408447
49. Matichenkov V. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties / V. Matichenkov, E. Bochamnikova // Studies in Plant Science, Elsevier. 2001. Vol. 8. P. 209-219. DOI:10.1016/S0928-3420(01)80017-3
50. Rasoolizadeh A. Silicon protects soybean plants against Phytophthora-sojae by interfering with effector-receptor expression / A. Rasoolizadeh, C. Labbé, H. Sonah, R.K. Deshmukh, F. Belzile, J.G. Menzies, R.R. Bélanger // BMC Plant Biol. 2018. Vol. 18. P. 97. DOI:10.1186/s12870-018-1312-7
51. Schaller J. Silicon cycling in soils revisited / J. Schaller, D. Puppe, D. Kaczorek, R. Ellerbrock, M. Sommer // Plants (Basel, Switz.). 2021. Vol. 10. P. 295. DOI:10.3390/plants10020295
52. Siddiqui M.H. Role of nano-SiO₂ in germination of tomato / M.H. Siddiqui, M.H. Al-Wahaibi // Saudi Journal of Biological Sciences. 2014. Vol. 21 (1). P. 13-17. DOI:10.1016/j.sjbs.2013.04.005
53. Simonin M. Impact of engineered nanoparticles on the activity, abundance, and diversity of soil microbial communities: a review / M. Simonin, A. Richaume // Environmental Science and Pollution Research. 2015. V. 22 (18). P. 13710-13723. DOI:10.1007/s11356-015-4171-x
54. Sommer M. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes – a review / M. Sommer, D. Kaczorek, Y. Kuzyakov, J. Breuer // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2006. Vol. 169 (3). P. 310-329. DOI:10.1002/jpln.200521981
55. Wang L. Biosilicified structures for cooling plant leaves: a mechanism of highly efficient midinfrared thermal emission / Wang L., Nie Q., Li M. Zhang F., Zhuang J., Yang W. // Applied Physics Letters. 2005. Vol. 87(19). P. 194105-194105-3. DOI:10.1063/1.2126115
56. Zhu Y.-X. Role of silicon in mediating salt tolerance in plants: a review / Y.-X. Zhu, H.J. Gong, J.L. Yin // Plants. 2019. Vol. 8 (6). P. 147. DOI:10.3390/plants8060147

THE IMPORTANCE OF SILICON AND SILICON FERTILIZERS IN AGRICULTURE

T.S. Zinkovskaya, G. Yu. Rabinovich, E.A. Podolyan
Federal Research Centre V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
Pyzhevsky per., 7, bld. 2, 119017, Moscow, Russia,
E-mail: E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

The article, based on domestic and foreign publications, summarizes materials on the role and importance of silicon in plant life and soil fertility. The influence of this element on the stress resistance of crops to various abiotic and biotic factors is shown. Natural sources of silicon replenishment have been analyzed. A brief description of silicon-containing fertilizers is given. It is concluded that silicon is an important element of soil fertility and plant nutrition, increasing the yield and quality of cultivated crops.

Key words: silicon, fertility, plants, silicon-containing fertilizers.