

УДК 631.811.93 : 632.91

ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ КРЕМНИЯ В ОНТОГЕНЕЗЕ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ПРИ ИХ ЗАЩИТЕ ОТ ФИТОПАТОГЕНОВ

Козлов А.В., Уромова И.П., Фролов Е.А., Мозолева К.Ю.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина», Нижний Новгород, Россия (603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 1), e-mail: a.v.kozlov_ecology@mail.ru

В работе приведен краткий обзор литературных источников в части вопросов о роли кремния в питании растительного организма, в его физиологических и биохимических процессах. Также показано значение кремния как индуктора механизмов внутренней системы устойчивости растений к абиотическим стрессам и как активатора защиты от поражения насекомыми-вредителями и болезнетворными микроорганизмами. Выявлено, что кремний и его соединения обладают ростостимулирующими свойствами, способны повышать устойчивость культурных растений к неблагоприятным факторам окружающей среды и в целом оптимизировать фитосанитарный фон сельскохозяйственных посевов. Предполагается, что современные исследования в недостаточной степени отражают понимание механизмов формирования ростостимулирующих и защитных свойств организма растений на физиологическом и биохимическом уровне.

Ключевые слова: кремний и его соединения, физиология и биохимия кремния, онтогенез растений, защита от болезней и вредителей, сельскохозяйственные культуры.

PHYSIOLOGICAL VALUE OF SILICON IN ONTOGENESIS OF CULTURAL PLANTS AND AT THEIR PROTECTION AGAINST PHYTOPATHOGENS

Kozlov A.V., Uromova I.P., Frolov E.A., Mozoleva K.U.

The Nizhniy Novgorod State Pedagogical University n.a. K. Minin, Nizhniy Novgorod, Russia (603950, Nizhniy Novgorod, the Ulyanova street, 1), e-mail: a.v.kozlov_ecology@mail.ru

In work the short review of references regarding questions of a silicon role is provided in food of a vegetable organism, in its physiological and biochemical processes. Value of silicon as inductor of mechanisms of internal system of resistance of plants to abiotic stresses and as activator of protection against defeat by insects wreckers and pathogenic microorganisms is also shown. It is revealed, that silicon and its connections possess growth stimulation properties, are capable to increase resistance of cultural plants to adverse factors of environment and in general to optimize a phytosanitary background of agricultural crops. It is supposed, that modern researches in insufficient degree reflect understanding of mechanisms of formation the growth stimulation and protective properties of an organism of plants in physiological and biochemical level.

Keywords: silicon and its connections, physiology and biochemistry of silicon, ontogenesis of plants, protection against diseases and wreckers, crops.

Введение

Вопрос о роли кремния в физиологии и питании растительного организма имеет большую историю [45]. Впервые кремнийсодержащее вещество в растениях было обнаружено в 1790 году при исследовании аморфной массы серого цвета, которая выделялась на бамбуке (*Bambusa vulgaris L.*) в местах его повреждения. Позднее, в 1814 году ученым Дэви было отмечено, что кремний может принимать участие в минеральном питании растений. Тогда предполагалось, что этот элемент формирует внутреннюю, «скелетную» основу любого рас-

тения, аккумулируясь в эпидермальных тканях и создавая защитный барьер против возбудителей болезней и насекомых-вредителей.

В середине XIX века Юстус фон Либих первым поставил вегетационный опыт с применением кремниевых удобрений на сахарной свекле. По его данным внесение кремния в почву в виде силиката натрия повышало массу корнеплода и сахаристость его мякоти.

В начале прошлого столетия начались исследования по выяснению физиологической роли кремния в растениях [41]. Так, в 1940 г. Вагнер и другие ученые в опытах с водными культурами показали, что недостаток кремния вызывает значительное угнетение роста злаковых (кукурузы, овса и ячменя) и ряда двудольных растений (огурца, томата, табака и бобовых). По мнению авторов, это позволяет считать кремний необходимым элементом в питании сельскохозяйственных культур.

Позднее интерес к кремнию сильно возрос, поскольку в многолетних опытах Ротамстедской опытной станции (Великобритания) выявилось [27], что с помощью испытуемых силикатов кальция и натрия можно повышать урожайность растений в случаях недостатка в почве фосфора. Как стало потом известно, это является результатом увеличения доступности растениям почвенных фосфатов вследствие вытеснения их силикатами из коллоидов почвы.

Одними из первооткрывателей физиологической необходимости кремния для растений были ученые Пьер, Джодин, Креужак и Вульф. Ими установлено, что кремний является не только структурным элементом проводящих и покровных тканей, но и играет существенную роль в метаболизме растений. В частности утверждается, что кремний связывает молекулы олигосахаров и мукополисахаридов и транспортирует их из листьев в корневую систему [12, 36].

В настоящее время изучение роли кремния в физиологии культурных растений и при их защите от фитопатогенных организмов остается одним из актуальных и востребованных в сельскохозяйственном производстве. Сравнительно недавно получившая широкое развитие концепция поиска новых альтернативных удобрительных веществ и средств защиты растений, способных также продуктивно влиять на их развитие и стимулировать защитные механизмы, как и общепринятые традиционные туки и пестициды, подкрепляется всевозможными результатами исследований [2, 3, 14, 19, 20, 21, 28, 29, 30, 31, 32, 38, 43, 50].

Значение кремния в физиологии и биохимии растительного организма

Кремний является макроэлементом питания растений зольного типа, а его соединения входят в группу неотъемлемых компонентов любого растительного организма. Содержание кремния в золе культурных растений колеблется в среднем от 0,16 до 8,4%. Наибольшее ко-

личество Si содержится в злаковых культурах, содержание которого достигает 8-16%, а в растении риса – до 15-20% SiO₂ [39].

Установлено, что уже минимальная, достаточная для большинства растений концентрация монокремниевых кислот в почвенном растворе (не менее 20 мг/кг агрономически спелой почвы) повышает всхожесть семян зерновых и цитрусовых культур, ускоряет рост и формирование плодов томата, созревание початков кукурузы, а также увеличивает накопление крахмала в клубнях картофеля [4, 5, 49]. Применение кремнийсодержащих веществ на зерновых культурах способствует увеличению листовой поверхности растений, стимулирует общий рост, ускоряет наступление фаз колошения (выметывания) и созревания зерна. При этом увеличивается высота растений и количество продуктивных стеблей в кусте [15]. Кремний участвует в процессах фосфорилирования углеводов, что, в свою очередь, усиливает синтез простых сахаров и способствует повышению крахмалистости зерновых, сахаристости свеклы, цитрусовых и ягодных культур [6, 25].

В целом, по выносу кремния все растения условно делятся на две группы: растения с невысоким выносом (как правило, двудольные – картофель, гречиха, клевер и т.д.) и растения с повышенным выносом (в основном однодольные семейства, например, злаковые). Также отмечено, что все растения выносят кремния несколько больше, чем других макроэлементов. Например, для картофеля величина выноса SiO₂ колеблется от 50 до 70 кг/га, для зерновых – от 100 до 300 кг/га. Максимальное количество кремния выносит сахарный тростник – до 700 кг/га в год [35, 47].

Из сельскохозяйственных культур типичными кремнефилами являются подсолнечник (*Helianthus annuus L.*), сахарный тростник (*Saccharum officinarum L.*), столовая и сахарная свекла (*Beta vulgaris L.*), зерновые колосовые (особенно рис (*Oriza sativa L.*), пшеница (*Triticum aestivum L.*) и ячмень (*Hordeum vulgare L.*)), а также некоторые ягодные культуры, например, земляника (*Fragaria ananassa D.*). Влияние кремния кремнийсодержащих удобрений изучено [5, 15, 16, 33, 39, 42, 44, 48] и выявлено их положительное действие на культурах из семейств злаковых (*Poaceae*), бобовых (*Fabaceae*), пасленовых (*Solanaceae*), тыквенных (*Cucurbitaceae*), маревых (*Chenopodiaceae*), рутовых (*Rutaceae*), виноградовых (*Vitaceae*) и других.

Как отмечается М.П. Колесниковым [22] растения поглощают кремний из почвенного раствора в виде ионов (SiO₃²⁻) и (SiO₄⁴⁻), а также в виде собственно монокремниевых кислот (H₂SiO₃ и H₄SiO₄), которые впоследствии в клеточном соке превращаются в кремнегель SiO₂·nH₂O. Затем происходит его биохимическое связывание с полимерами клетки (белки и углеводы) и аккумуляция на поверхности клеточных стенок, в покровных тканях (поверхностные слои эпидермиса листьев и корней, кора), либо в различных видах фитолитов (орга-

номинеральные образования-глобулки, слагающие механическую ткань растений). Формирование покровных и проводящих тканей растения, по сути, сопровождается образованием двойного кутикулярного слоя в межклетниках и внутри клеток, представляющего собой кремнецеллюлозную мембрану.

На химическом уровне в растительной клетке кремний представлен ортокремниевыми эфирами простых аминокислот, оксиаминокислот, липидов, фосфолипидов, белков, пектинов, полисахаридов и лигнина [22]. Доля кремния в растениях, связанного с органическими соединениями, составляет не менее 40% от его общего содержания. При этом в большинстве растений преобладающей формой органического кремния является форма, связанная с высокомолекулярными соединениями, доля которых от общего количества органически связанного кремния достигает 80%. Например, в злаковых растениях больше половины кремния связано с белками (до 60%), около 11% – с липидами, более 9% – с клетчаткой, около 5% связано с пектинами, с лигнином – менее 3% [11].

Общее содержание кремния в надземной части растений, как правило, выше, чем в корневой системе, но, при этом, доля органического Si, наоборот, выше именно в корнях и составляет около 40% от его общего содержания по растению. Содержание кремния в растениях, как правило, меньше в первой половине вегетации, чем в более поздние фазы развития. Больше всего этого элемента содержится в листьях и стеблях, меньше в корнях и в зерне. Количество кремния в листьях верхнего яруса больше, чем в листьях среднего и нижнего ярусов, и сосредоточен он, главным образом, в эпидермисе.

Кремний является одним из главных элементов, входящих в минеральный состав коренарных клеток корневого чехлика и выделяемых корневыми волосками слизи. Вследствие этого оптимизация кремниевого питания растений приводит к увеличению биомассы корней, их объема, общей и рабочей адсорбирующей поверхности. Кроме того, применение кремнийсодержащих удобрений улучшает корневое дыхание [26, 44].

В целом отмечено, что содержание кремния уменьшается в направлении от верхушки листа к основанию, а исключение кремния из питательного раствора, в свою очередь, замедляет рост стеблей, задерживает выметывание, вызывает некроз листьев, снижает урожай зерна. Уменьшение высоты растения и слабая их кустистость наблюдаются и в почвах с низким содержанием подвижного кремния. Добавление его к питательной среде стимулирует рост, ускоряет наступление фаз выметывания и созревания. При этом увеличиваются высота растения, количество продуктивных стеблей и площадь ассимиляционной поверхности листьев. Данное стимулирующее действие кремния, по-видимому, связано с наблюдающимся в большинстве случаев влиянием его на рост потребления фосфора и молибдена растением, а также на перенос марганца в растительных тканях. Положительное влияние кремния на рост

надземных органов растения объясняется усилением фосфорилирования сахаров, что в свою очередь увеличивает поступление энергии для метаболических процессов и синтеза самих сахаров [18, 29].

Существует связь между обеспеченностью растений кремнием и его фотосинтетической деятельностью. Оптимизация кремниевого питания растений приводит к увеличению площади листьев и создает благоприятные условия для биосинтеза необходимого количества пластидных пигментов [40].

Кремний, наряду с фосфором, является основой макроэргических соединений. Он входит в состав макроэргических силикатофосфатов, что обуславливает большую эффективность биоэнергетики кремнефильных растений. Этот элемент может входить в состав нуклеотидов и тем самым образовывать в скелете нуклеиновых кислот сахаросиликатные участки, придавая им повышенную прочность. По-видимому, в растениях функционирует специфические ферменты силикатазы (силиказы), осуществляющие включение неорганического кремния в органические соединения. Кремний способен влиять на активность нитратредуктазы, пероксидазы, инвертазы и фосфатазы растений [22]. Установлено наличие кремния в рибосомах, митохондриях, хлоропластах и микросомах [10].

Кремний оказывает существенное влияние на поглощение и использование растениями других элементов минерального питания [46]. Например, имеются данные о положительном влиянии кремния на поглощение растениями азота [1, 9], а исключение кремния из питательной среды снижает количество поглощаемого корнями данного элемента. Под его влиянием возрастает ассимиляция растениями калия, кальция и магния. В присутствии кремния растения эффективнее используют бор и могут легче переносить избыток марганца, алюминия и железа в питательной среде. При этом предполагается, что соединения марганца, алюминия и железа, окисляясь на поверхности корней, переходят в труднорастворимые соединения, вследствие чего их дальнейшее поступление в растения ограничивается.

Роль кремния как индуктора, повышающего сопротивляемость растений к неблагоприятным условиям окружающей среды и к фитопатогенам

Нужно отметить, что современная физиология растений среди основных функций кремния, выполняемых в растительном организме, называет повышение физической устойчивости к неблагоприятным факторам, выражающееся в утолщении эпидермальных тканей (механическая защита), ускорении надземного роста и повышении активности корневой системы (физиологическая защита), а также увеличение устойчивости к абиотическим стрессам (увядание от пересыхания и перегревания), к поражению различными болезнями (биохимическая защита).

В частности, соединения кремния с белками, лигнином и полисахаридами (пектином и клетчаткой) обуславливают термоизоляцию клетки, что определяет морозостойкость растений, оптимизирует перезимовку и ускоряет весеннюю акклиматизацию озимых культур и многолетних растений [8].

Выступая в структуре клетчатки в качестве «сшивающего» агента между сахарными остатками, кремний образует силоксановые «мостики». Этот факт обуславливает высокую прочность соломины зерновых культур и устойчивость хлебов к полеганию [22]. Биометрические измерения в опытах В.Н. Капранова [18] подтвердили тенденцию к снижению длины соломины зерновых культур и увеличению ее диаметра в вариантах совместного внесения кремния в виде диатомита и возрастающих доз азота.

Подавление токсического действия избыточных количеств марганца, алюминия и железа кремнием некоторыми авторами объясняют тем, что он способствует равномерному распределению соединений этих элементов в листьях растения, предотвращая их скопление в отдельных участках в некритических концентрациях [49]. Кремний может вступить в конкуренцию с алюминием, медью, кадмием, стронцием, мышьяком и предотвратить их избыточное поступление в растения [37].

Кремниевая кислота может снижать токсическую активность гидроксидов алюминия и железа, что благоприятно действует на рост сельскохозяйственных растений [23]. Также некоторые авторы считают, что подвижный кремний влияет на доступность магния и марганца растениям [49].

Одной из важных функций кремния в растении является повышение устойчивости к неблагоприятным абиотическим условиям внешней среды. Он увеличивает устойчивость растений к поражению радиацией, влияет на механическую прочность и устойчивость к полеганию. Данный эффект объясняется пропитыванием стенки эпидермиса и сосудистых тканей аморфным кремнием [22]. Он, локализуясь под кутикулой в виде кремнийцеллюлозного слоя, предохраняет растение от излишнего испарения, снижая интенсивность транспирации. Именно этот механизм отмечают в первую очередь при исследовании влияния кремниевых удобрений на устойчивость растений к заболеваниям и насекомым-вредителям [47]. Сложный органоминеральный комплекс, который кремний образует с компонентами клеточной стенки, устойчив к действию внеклеточных энзимов грибов и таким образом препятствует проникновению их гиф внутрь клетки [9].

Кремний способен стимулировать естественные защитные реакции растений на различные процессы, выполняя тем самым биологическую функцию. Кроме того, этот элемент способствует устойчивости растений к физиологическим болезням, возникающим при комплексном воздействии пестицидов, тяжелых металлов, сероводорода, анаэробнозиса и возбуди-

телей некоторых грибковых и бактериальных болезней, а также при выращивании на деградированных почвах при недостатке или избытке элементов минерального питания [34].

Агроэкологическая роль природных кремнийсодержащих препаратов в отношении снижения пестицидной нагрузки на агробиоценоз частично изучена в работах [7, 13, 17, 24, 47, 48] и других авторов. Здесь отмечается, что эффективные дозы средств защиты растений могут быть снижены при их совместном применении с кремниевыми удобрениями и стимуляторами роста.

В целом, можно резюмировать, что недостаток кремния задерживает рост и развитие растений, повышает их восприимчивость к болезням и насекомым-вредителям. Несмотря на большую историю агрохимического и физиологического изучения кремния и его роли в фитотенотических процессах, а также выявленную очевидность его положительного влияния на продуктивность сельскохозяйственных культур, сами механизмы воздействия этого элемента на внутриклеточном уровне растения остаются крайне слабо изученными. Особенно эта проблема касается высших и, в том числе, сельскохозяйственных растений [36, 39].

Заключение.

Нужно отметить, что в настоящий момент детальные физиологические исследования кремния в процессах формирования устойчивости растений к различным неблагоприятным факторам окружающей среды актуальны и востребованы на практике, поскольку современные агрохимические научные изыскания касаются поиска оптимальных вариантов повышения продуктивности сельскохозяйственных культур за счет менее дорогостоящих альтернативных удобрений с одновременной минимизацией токсического давления на агробиогеоценозы, а современные исследования наук по защите растений затрагивают вопросы снижения химической пестицидной нагрузки и поиска веществ-индукторов, стимулирующих собственную (организменную) систему защиты от фитопатогенных организмов. В рамках этой комплексной проблемы проведение физиологических и биохимических исследований по выявлению разносторонней защитной и стимулирующей роли кремния в растительном организме и по настоящее время имеет значение.

Литература:

1. Базилевич, Н.И. Биологическая продуктивность экосистем северной Евразии. – М.: Наука, 1993. – 293 с.
2. 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.
3. Бочарникова, Е.А. Кремниевые удобрения: прошлое, настоящее, будущее / Е.А. Бочарникова, В.В. Матыченков // Проблемы истории, методологии и философии почвоведения. – Пушино. – 2007. – Т. 2. – С. 397-400.

4. Бочарникова, Е.А. Сравнительная характеристика некоторых кремниевых удобрений / Е.А. Бочарникова, В.В. Матыченков, А.Г. Погорелов // *Агрохимия*. – 2011. – № 11. – С. 25-30.
5. Влияние диатомита на урожайность и качество овощной продукции / Куликова А.Х. [и др.] // *Агрохимия*. – 2004. – № 2. – С. 52-58.
6. Влияние предпосевной обработки семян диатомитовым порошком и биопрепаратами на урожайность сельскохозяйственных культур / А.Х. Куликова [и др.] // *Агрохимия и экология: история и современность* – Н.Новгород: НГСХА. – 2008. – Т. 2. – С. 122-125.
7. Воронин, Д.В. Влияние кремнийсодержащего удобрения Силипланта и регулятора роста Циркона на повышение эффективности действия пестицида Лограна и урожайность ячменя : автореф. дис...канд. с.-х. наук : 06.01.07 / Воронин Дмитрий Викторович. – Москва, 2010. – 21 с.
8. Воронков, М.Г. Кремний в живой природе / М.Г. Воронков, И.Г. Кузнецов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 156 с.
9. Воронков, М.Г. Кремний и жизнь / М.Г.Воронков, Г.Н. Зелчан, Э.Л. Лукевиц. – Рига: Зинанте, 1978. – 587 с.
10. Воронков, М.Г. Силатраны в медицине и сельском хозяйстве / М.Г. Воронков, В.П. Барышок. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 255 с.
11. Воронков, М.Г. Удивительный элемент жизни / М.Г. Воронков, И.Г. Кузнецов. – Иркутск: Вост.-Сиб. Изд-во, 1983. – 107 с.
12. Голованов, Д.Л. Кремний – незаменимый макроэлемент питания природных и культурных злаков / Д.Л. Голованов // *Удобрения и химические мелиоранты в агроэкосистемах*. – М.: МГУ, 1998. – С. 247-250.
13. Дорожкина, Л.А. Экологическая безопасность и эффективность пестицидов в интегрированной системе защиты растений при использовании кремнийсодержащих соединений : автореф. дисс...докт. с.-х. наук в виде науч. докл. : 03.00.16 / Дорожкина Людмила Александровна. – Москва, 1997. – 61 с.
14. Дронина, О.С. Эффективность предпосевной обработки семян сахарной свеклы биопрепаратами и диатомитовым порошком в условиях Среднего Поволжья : автореф. дис...канд. с.-х. наук : 06.01.04 / Дронина Ольга Сергеевна. – Ульяновск, 2009. – 18 с.
15. Ермолаев, А.А. Кремний в сельском хозяйстве / А.А. Ермолаев // *Химия в сельском хозяйстве*. – 1987. – № 6. – С. 45-47.
16. Ермолаев, А.А. Кремний в сельском хозяйстве. – М.: Линф, 1992. – 256 с.
17. Зейрук, В.Н. Применение силипланта для снижения пестицидной нагрузки и повышения урожая картофеля / В.Н. Зейрук, О.В. Абашкин, Л.А. Дорожкина // *Агрохимический вестник*. – 2010. – № 2. – С. 20-21.
18. Капранов, В.Н. Влияние диатомита и минеральных удобрений на фенотипические признаки растений и урожайность зерновых культур / В.Н. Капранов // *Агрохимия*. – 2009. – № 7. – С. 34-43.
19. Капранов, В.Н. Использование природных агрохимических средств в качестве источников минерального питания полевых культур : автореф. дис...докт. с.-х. наук : 06.01.04 / Капранов Владимир Николаевич. – Москва, 2009. – 43 с.
20. Козлов, А.В. Экологическая оценка влияния диатомита на фитоценоз и состояние почвенно-биотического комплекса светло-серой лесной легкосуглинистой почвы : автореф. дис...канд. биол. наук : 03.02.08 / Козлов Андрей Владимирович. – Москва, 2013. – 24 с.
21. Козлов, Ю.В. Эффективность соединений кремния при возделывании зерновых культур в условиях Смоленской области : автореф. дис...канд. биол. наук : 06.01.04 / Козлов Юрий Владимирович. – Москва, 2010. – 18 с.
22. Колесников, М.П. Формы кремния в растениях / М.П. Колесников // *Успехи биологической химии*. – 2001. – Т. 41. – С. 301-322.
23. Корбридж, Д. Фосфор. Основы химии, биохимии, технологии. – М.: Мир, 1982. – 165 с.

24. Коробейникова, О.В. Эффективность фунгицидов и удобрений в смеси с силикатом натрия в защите от болезней и повышении урожайности яровой пшеницы в Среднем Предуралье : автореф. дис...канд. с.-х. наук : 06.01.11 / Коробейникова Ольга Валентиновна. – Москва, 2005. – 21 с.
25. Кремниевые удобрения как фактор повышения засухоустойчивости растений / В.В. Матыченков [и др.] // *Агрохимия*. – 2007. – № 5. – С. 63-67.
26. Кудинова, Л.И. Влияние кремния на рост, величину площади листьев и адсорбирующую поверхность корней растений / Л.И. Кудинова // *Агрохимия*. – 1975. – № 10. – С. 117-120.
27. Кук, Дж. Регулирование плодородия почвы. – М.: «Колос», 1970. – 520 с.
28. Куликова, А.Х. Перспективы использования нетрадиционных источников минерального сырья в качестве удобрения сельскохозяйственных культур / А.Х. Куликова // *Нетрадиционные источники и приемы организации питания растений*. – Н. Новгород: НГСХА. – 2011. – С. 116-119.
29. Куликова, А.Х. Роль кремния в жизни растений и диатомит как кремниевое удобрение / А.Х. Куликова // *Инновационные технологии в аграрном образовании, науке и АПК России*. – Ульяновск: УГСХА, 2003. – С. 88-91.
30. Куликова, А.Х. Эффективность кремнийсодержащих препаратов в защите посевов ячменя и получении экологически безопасной продукции / А.Х. Куликова, Е.А. Яшин, В.С. Смывалов // *Вестник УГСХА*. – 2013. – № 4 (24). – С. 17-24.
31. Куликова, А.Х. Эффективность предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур биопрепаратами и диатомитовым порошком в условиях Среднего Поволжья / А.Х. Куликова, О.С. Дронина, С.А. Никифорова. – Ульяновск: УГСХА, 2010. – 211 с.
32. Лобода, Б.П. Оптимизация агрохимического состояния и продуктивности дерново-подзолистых почв центрального Нечерноземья : автореф. дис...докт. с.-х. наук : 06.01.04 / Лобода Борис Павлович. – Немчиновка, 2002. – 45 с.
33. Логинов, С.В. Изучение кремнийорганического препарата Энергия-М / С.В. Логинов, В.Н. Петриченко // *Агрохимический вестник*. – 2010. – № 2. – С. 22-24.
34. Мазиров, М.А. О стабильности почвенного плодородия в центральной нечернозёмной зоне России / М.А. Мазиров, Г.Н. Ненайденко // *Мат-лы Международн. научн.-практ. конф. «Агрохимия и экология: история и современность»*. Т. 3. – Н. Новгород: Нижегородская ГСХА. – 2008. – С. 142-146.
35. Матыченков, В.В. Биогеохимический цикл Si в системе почва – растение / В.В. Матыченков, Е.А. Бочарникова // *Функции почв в биосферно-геосферных системах: Материалы междунар. симпозиума, Москва, 27 – 30 авг., – М. – 2001. – С. 100-101.*
36. Матыченков, В.В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и в системе почва-растение : автореф. дис...докт. биол. наук : 03.00.12, 03.00.27 / Матыченков Владимир Викторович. – Пушкино, 2008. – 34 с.
37. Моисеев, И.Т. Влияние внесения в почву кремнекислого и трёхзамещённого фосфорнокислого натрия на накопление ⁹⁰Sr в урожае сельскохозяйственных растений / И.Т. Моисеев, Р.М. Алексахин, С.Г. Рыдкий // *Агрохимия*. – 1969. – № 4. – С. 71-79.
38. Осипов, А.И. Применение цеолитов в сельском хозяйстве / А.И. Осипов, Р.Н. Гадаборшев. – С.-Пб.: АМА НЗ РФ, 2009. – 55 с.
39. 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.
40. Потатуева, Ю.А. О биологической роли кремния (обзор) / Ю.А. Потатуева // *Агрохимия*. – 1968. – № 9. – С. 128-139.
41. Рассел, Э. Почвенные условия и рост растений. – М.: Изд. иностр. лит-ры, 1955. – 624 с.
42. Сластя, И.В. Агроэкологические аспекты применения соединений кремния в защите ячменя и кормовой свеклы : автореф. дис...канд. с.-х. наук : 06.01.15 / Сластя Ирина Васильевна. – Москва, 1997. – 60 с.

43. Сластя, И.В. Влияние кремния на рост растений и баланс эндогенных фитогормонов ярового ячменя / И.В. Сластя, В.Н. Ложникова // *Агрохимия*. – 2010. – № 3. – С. 34-39.
44. Соединения кремния в сельском хозяйстве / Дьяков В.М. [и др.]. – М.: Минхимпром, 1990. – 32 с.
45. Шеуджен, А.Х. Биогеохимия. – Майкоп: ГУРИПП «Адыгея», 2003. – 1028 с.
46. Шеуджен, А.Х. Влияние цеолитов на агрохимические показатели плодородия лугово-черноземной почвы и урожайность риса / А.Х. Шеуджен, А.К. Шхапацев, Т.Ф. Бочко // *Агрохимия*. – 2002. – № 8. – С. 14-20.
47. Шмакова, Н.В. Применение кремнийсодержащих соединений для защиты яровых зерновых культур от болезней / Н.В. Шмакова, Т.А. Строт // *Сб. науч. тр.* – Екатеринбург: УГСХА, 2001. – Т. 2. – С. 132-142.
48. Шмакова, Н.В. Эффективность применения соединений кремния и их смесей с фунгицидами на яровой пшенице в Среднем Предуралье : автореф. Дис...канд. с.-х. наук : 06.01.11 / Шмакова Надежда Васильевна. – Москва, 2003. – 18 с.
49. Янишевская, О.Л. Влияние кремния, марганца и хрома на продуктивность и некоторые показатели качества товарной продукции овощных культур / О.Л. Янишевская, Б.А. Ягодин // *Агрохимия*. – 2000. – № 5. – С. 47-51.
50. Яшин, Е.А. Эффективность использования диатомита и его смесей с куриным пометом в качестве удобрения сельскохозяйственных культур на черноземе выщелоченном Среднего Поволжья : автореф. дис...канд. с.-х. наук : 06.01.04 / Яшин Евгений Александрович. – Саранск, 2004. – 18 с.