

А.В. КОЗЛОВ, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологического образования и рационального природопользования НГПУ им. К. Минина (Мининский университет), Нижний Новгород, e-mail: a_v_kozlov@mail.ru

А.Х. КУЛИКОВА, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующая кафедрой почвоведения, агрохимии и агроэкологии УГСХА им. П.А. Столыпина, Ульяновск, e-mail: agroec@yandex.ru

Е.А. ЯШИН, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры почвоведения, агрохимии и агроэкологии УГСХА им. П.А. Столыпина, Ульяновск, e-mail: agroec@yandex.ru

РОЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ КРЕМНИЯ И КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ ВЕЩЕСТВ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ

A.V. Kozlov, A.H. Kulikova, E.A. Yashin

ROLE AND VALUE OF SILICON AND SILICEOUS SUBSTANCES IN AGROECOSYSTEMS

В статье представлен многоплановый обзор теоретических данных и экспериментальных исследований кремниевых веществ, задействованных в биогеохимической системе «почва – растение». Рассмотренные работы описывают значение кремния и его веществ в почвенно-поглощающем комплексе, физиологию и оптимизацию питания сельскохозяйственных культур, оптимизацию экологической составляющей их при выращивании. Показано значение кремния в индуцировании (активизации) механизмов внутренней физиологической системы устойчивости растений к абиотическим стрессам и как активатора защиты от поражения насекомыми-вредителями и болезнетворными микроорганизмами. Кремний и его соединения обладают ростостимулирующими свойствами, поэтому применение силикатсодержащих стимуляторов роста способствует повышению устойчивости культурных растений к неблагоприятным факторам окружающей среды и в целом оптимизации фитосанитарного фона сельскохозяйственных посевов. В заключение работы указывается обоснование о необходимости подробного изучения влияния кремнийсодержащих веществ на почвенно-биотический комплекс агробиогеоценозов и выявления физиологических и биохимических механизмов действия соединений кремния в растительном организме в части его защиты от фитопатогенов.

Ключевые слова: кремний, кремниевые удобрения и стимуляторы роста, урожайность и качество культурных растений, экологическая безопасность растениеводческой продукции, почвенно-поглощающий и почвенно-биотический комплексы.

In the article presented multidimensional review of theoretical data and experimental researches of the silicon substances involved in biogeochemical system "the soil – the plant". The considered works describe value of silicon and its substances in the soil absorbing complex, physiology and optimization of food of agricultural cultures, optimization of their ecological component at cultivation. Value of silicon in induction (activization) of mechanisms of internal physiological system of resistance of plants to abiotic stresses and as activator of protection against defeat insects-wreckers and pathogenic microorganisms is shown. Silicon and its connections possess growth the stimulating properties therefore application the silicate containing of growth factors promotes increase of resistance of cultural plants to adverse factors of environment and in general optimization of a phytosanitary background of agricultural crops. In conclusion of work justification about need of detailed studying of influence of siliceous substances on a soil and biotic complex of agrobiogeocenoses and identification of physiological and biochemical mechanisms of action of compounds of silicon is specified in a vegetable organism regarding its protection against phytopathogens.

Keywords: silicon, silicon fertilizers and growth factors, productivity and quality of cultural plants, ecological safety of crop production, the soil absorbing and soil-biotic complexes.

Современное изучение роли кремния в физиологии культурных растений, в плодородии почвы и вопросах производства качественной и экологически безопасной растениеводческой продукции страны остается одним из актуальных и востребованных на практике. Сравнительно недавно получившая широкое развитие концепция поиска новых, альтернативных удобрительных веществ, способных также продуктивно влиять на рост и развитие растений, как и общепринятые традиционные туки, подкрепляется всевозможными результатами исследований Б.П. Лободы (2002); Е.А. Яшина (2004); Е.А. Бочарниковой, В.В. Матыченкова (2011); О.С. Дрониной (2009); В.Н. Капранова (2009); И.В. Сласти (1997); А.Х. Куликовой (2010, 2013); А.В. Козлова (2013).

Вовлечение почв в сельскохозяйственное производство зачастую нарушает баланс питательных элементов, поскольку значительная их часть каждый год безвозвратно отчуждается с урожаем культурных растений. Это неблагоприятное явление касается и баланса доступного кремния в почве. Так, по расчетам В.В. Матыченкова (2008), ежегодно в мире примерно 210-224 млн т кремния безвозвратно отчуждается урожаем сельскохозяйственных культур. Поскольку данный элемент является не только питательной составляющей растений, но и конструктивным биогеохимическим веществом почвенного тела, дефицит кремния вызывает ряд негативных последствий в агроценозе. Например, отмечается [17], что дефицит монокремниевой кислоты и уменьшение содержания аморфного кремнезема в почве приводят к разрушению ее органоминерального комплекса, ускорению деградации органического вещества и ухудшению минералогического состава. Поэтому для предотвращения деградации пашни, поддержания оптимального баланса монокремниевой кислоты в ППК и с целью обеспечения уровня ее содержания, достаточного для питания растений, современные ученые и практики сельского хозяйства считают целесообразным постепенное введение в систему удобрения культур применение кремнийсодержащих удобрений.

С точки зрения биогеохимии [22] по геохимической классификации кремний относится к условно невыводимым элементам с циклически возобновляемым базисом во всех оболочках планеты, за исключением атмосферной. При этом биогеохимия кремния определяется его участием в сложном органоминеральном преобразовании вещества, переходными планетарными слоями для которого являются гидро- и педосфера.

В результате выветривания кремниевых минералов, а также минерализации растительных остатков анионы различных кремниевых кислот, в частности SiO_4^{4-} и SiO_3^{2-} , многомерные анионы мета-, орто- и полисиликатов натрия, калия, кальция, магния и других элементов переходят в почвенный раствор и грунтовые воды. При этом одна часть растворенного кремнезема вновь используется растениями и другими организмами в своем питании, другая часть осаждается в виде гидратированных аморфных осадков ($\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$), третья часть мигрирует по почвенному профилю и вымывается из почвы [2].

Роль соединений кремния в почвах почвоведение сводит к следующим основным положениям:

1) кремниевые вещества в подавляющем большинстве типов почв создают физическую основу почвенной массы, выполняя тем самым важную конструктирующую роль в сложении почвенного профиля;

2) количественное распределение силикатов по почвенному профилю служит одним из главных показателей почвообразовательных процессов, а по соотношению оксида кремния и полуторных окислов ($\text{SiO}_2 : \text{R}_2\text{O}_3$) в минералогическом составе и почвенно-поглощающем комплексе различают основные типы почвообразующих пород;

3) с соединениями кремния непосредственно связаны многие свойства почвы. От содержания и состава алюмосиликатов зависят такие агрономически важные почвенные характеристики, как связность, липкость и набухаемость, а также емкость катионного обмена. В

частности, в тяжелосуглинистых и глинистых почвах наличие инертного кварца положительно воздействует на их водно-воздушный режим, формируя рыхлость сложения.

В агрохимии кремния важным является его форма и поведение в почвенном растворе, поскольку именно это определяет доступность элемента в питании растений. Показано [19], что почвенный раствор содержит кремний в основном в виде силикат-ионов мономеров и полимеров мета- и ортокремниевой кислот, а также в виде кремнийорганических соединений. При этом снижение содержания свободной воды в жидкой фазе почвы приводит к появлению кремниевых соединений в коллоидной форме в виде гидрогеля кремниевой кислоты.

Для нормального развития растений концентрация монокремниевой кислоты в почвенном растворе должна составлять не менее 20 мг/кг почвы [17], однако ее содержание во многих почвах агробиогеоценозов редко превышает это значение. Установлено [26], что доступность кремния растениям лимитируется, прежде всего, сильно выраженной кислотностью и выщелоченностью почв, а также промывным типом водного режима. Среди прочих биофильных элементов по растворимости Si находится в одной группе с такими элементами, как фосфор и марганец, что является особенно значимым положением для агрономической химии кремния.

В настоящее время по подвижности кремниевых соединений в почве различают три основные группы веществ: монокремниевые кислоты, поликремниевые кислоты и кремнийорганические соединения [19]. При этом самыми распространенными формами монокремниевой кислоты в природе являются ортокремниевая кислота H_4SiO_4 и ее производные. Среди подвижных соединений кремния ее, как наиболее химически изученную, отличает наличие физико-химической активности и высокое влияние на биогеохимические процессы, происходящие в почвах.

Помимо решения вопроса о растворимости кремниевых соединений в почве, исследовательские изыскания касаются влияния самого кремния на доступность иных веществ. В частности известно [10, 20], что кремний почвы и удобрений влияет на подвижность некоторых элементов питания культурных растений. Так, силикат-ионы при определенных условиях способны вытеснять различные анионы фосфора (PO_3^- , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} и PO_4^{3-}) из труднорастворимых фосфатов почвы и удобрений. При этом происходит постепенный переход малоподвижных форм фосфора в доступные соединения. Кроме того, подвижные силикаты способны взаимодействовать с щелочноземельными металлами солей угольной кислоты и осаждать их карбонаты в почве по химическому типу поглощения, что явно способствует сохранению фосфора в растворенном виде. Поэтому кремнийсодержащие удобрения и мелиоранты улучшают фосфорное питание растений, что, несомненно, важно в системе удобрения культур.

Наличие в ППК анионов кремниевой кислоты способно играть экологическую роль в отношении некоторых токсичных веществ. Так, силикатные (SiO_3^{2-} , SiO_4^{4-}) ионы, связывая катионы тяжелых металлов (Hg, Pb, Cd, Zn, Ni и другие), способны образовывать нерастворимые осадки [1]. Поэтому применение кремнийсодержащих веществ имеет особую значимость при химической мелиорации земель, загрязненных радионуклидами и тяжелыми металлами.

Присутствие кремния в почве положительно сказывается и на ее основных физических свойствах. За счет химического образования кремниевых «мостиков» между микрочастицами минералов происходит связывание структурных отдельностей почвы, что повышает ее агрегированность, влагоемкость и буферность [20]. С другой стороны, за счет коагуляции почвенных коллоидов кремний увеличивает водопроницаемость почвы, что улучшает условия роста и развития растений [8]. Кроме того, кремний в почвенно-поглощающем комплексе образует активные адсорбционные и реакционно-активные центры за счет образования в мицеллах коллоидов большого количества свободных радикалов силикат-ионов, на которых, в свою очередь, способны закрепляться питательные элементы, органические соединения, микроорганизмы и ферменты.

Усвоение кремнезема из почвенного раствора живыми организмами сводится к тому, что многие из них (в частности, диатомовые водоросли, радиолярии, насекомые, низшие и высшие растения) активно поглощают кремний и используют его в своих физиологических процессах, затем полимеризуют в биогенный опал и переводят в вещество покровов, панцирей, фитолитов, кутикулы, воскового налета у плодовых культур, чешуй зерновок у злаковых растений и другие органо-минеральные биологические образования [12].

Вопрос о роли кремния в физиологии и питании растительного организма имеет большую историю. 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 Davey было отмечено, что кремний может принимать участие в минеральном питании растений. Тогда он предположил, что этот элемент формирует внутреннюю, «скелетную» основу любого растения, аккумулируясь в эпидермальных тканях и создавая защитный барьер против возбудителей болезней и насекомых-вредителей [19].

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 предполагается [12], что кремний связывает молекулы олигосахаров и мукополисахаридов и транспортирует их из листьев в корневую систему.

Являясь макроэлементом зольного типа, кремний и его соединения входят в группу неотъемлемых компонентов любого растительного организма. Его содержание в золе культурных растений колеблется в среднем от 0,16 до 8,4%. Наибольшее количество Si содержится в злаковых культурах, содержание которого достигает 8-16%, а в растении риса – до 15-20% SiO₂ [28].

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, углеводы) и аккумуляция на поверхности клеточных стенок, в покровных тканях (поверхностные слои эпидермиса листьев и корней, кора), либо в различных видах фитолитов (органо-минеральные образования-глобулки, слагающие покровные и механическую ткани растений). Скелетное формирование покровных и проводящих тканей растения, по сути, сопровождается образованием двойного кутикулярного слоя, представляющего собой кремнецеллюлозную мембрану [19].

На химическом уровне кремний в растительной клетке представлен ортокремниевыми эфирами простых аминокислот, оксиаминокислот, липидов, фосфолипидов, белков, пектинов, полисахаридов и лигнина. 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 [12, 19], 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%.

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. 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. Биометрические измерения в опытах В.Н. Капранова [10] подтвердили тенденцию к снижению длины

соломины зерновых культур и увеличению ее диаметра в вариантах совместного внесения кремния в виде диатомита и возрастающих доз азота.

Кремний является одним из главных элементов коронарных клеток корневого чехлика и выделяемых корневыми волосками слизей. 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 питание, увеличивает сопротивляемость растений к нематодам, гифам фитопатогенных грибов и другим корневым вредителям [23].

Показано [27], 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. Применение кремнийсодержащих веществ на зерновых культурах способствует увеличению листовой поверхности растений, стимулирует общий рост, ускоряет наступление фаз колошения (выметывания) и созревания зерна. 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 [15, 18, 21, 30].

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 отмечается [19], что все растения выносят кремния несколько больше, чем других макроэлементов. Например, для картофеля величина выноса SiO_2 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.

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.*) и некоторые ягодные культуры, например, земляника (*Fragaria ananassa D.*) [19], а влияние кремния кремнийсодержащих удобрений изучается [51, 66, 68, 75] и устанавливается их положительное действие на культурах из семейств злаковых (*Poaceae*), бобовых (*Fabaceae*), пасленовых (*Solanaceae*), тыквенных (*Cucurbitaceae*), маревых (*Chenopodiaceae*), рутовых (*Rutaceae*), виноградовых (*Vitaceae*) и других.

Большой перспективный интерес для многих отраслей промышленности, в том числе и для сельского хозяйства, представляют вещества силатраны, впервые синтезированные в 1963 году выдающимся химиком М.Г. Воронковым, которые обладают высокой специфической биологической активностью. Силатраны – гетероциклические кремнийорганические эфиры трис(2-оксиалкил)аминов и их производных. В сельскохозяйственной науке силатраны изучались в комплексе со стимуляторами роста – гетероауксином (β -индолилуксусная кислота) и цитокинином (зеатин) на культурах табака, сои, картофеля, пшеницы, хрена, томата, льна и хлопчатника [4]. Установлено их положительное действие на генетическом уровне в виде повышения клеточного биосинтеза простых белков, гистонов и нуклеиновых кислот. В общем виде данные вещества обладали ростстимулирующим эффектом на начальных этапах онтогенеза в виде ускорения роста калеоптиля и повышения количества корневых волосков. Также они повышают всхожесть и энергию прорастания семян, снижают интенсивность транспирации влаги и повышают устойчивость растений к ее дефициту [2, 5].

Нужно отметить, что современная агроэкология [6, 14, 16] 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 си-

стемы (физиологическая защита), а также увеличение устойчивости к таким абиотическим стрессам, как увядание от пересыхания и перегревания, поражение неинфекционными болезнями (биохимическая защита).

В настоящее время проблемой кремниевого питания занимаются очень активно. Все возможные научные конференции, проведенные в свое время в США (1999 г.), Японии (2002 г.), России (2004 г.), Бразилии (2005 г.), ЮАР (2008 г.), все большее значение придают кремнию как неотъемлемому фактору продуктивности агробиогенеза [19]. Однако такие удобрения до сих пор остаются нетрадиционными и применяются крайне ограниченно. Так, в обязательном порядке агросиликаты используются только за рубежом (например, в США, Бразилии, Колумбии, Мексике, Китае, Японии, Индии и Южной Корее) и в основном под культуру риса и кукурузы [2].

В настоящий момент прикладная агрохимия изучает не только природные виды кремнийсодержащего сырья, но и специальные вещества, выпускаемые в качестве сложных минеральных, органоминеральных или нанокompозитных кремнийсодержащих удобрений. К таким веществам относятся Агросил, Кремневит, Метасиликат натрия, Мивал-агро, Силацин, Силиплант, Энергия-М, Pro-Sil, Zap-Sil, Zumsil и другие. Их действие на урожайность и качество получаемой продукции, а также на агрохимическую сторону почвы, также имеет положительный эффект [3, 7, 21]. Особенно это касается таких удобрений, как Силиплант и Агросил, от действия которых урожайность картофеля повышается в среднем на 30-40%, а зерновых культур – в среднем на 15-20%.

В ряду природных полиминералов, содержащих кремний и другие элементы питания, в настоящее время активно изучаются давно известные во многих других отраслях промышленности осадочные породы морского и озерного происхождения. К разновидностям таковых относят диатомиты, кизельгур (диатомитовая земля), молерова земля (диатомиты с высоким содержанием глины (до 30%), цеолиты, трепелы, опоки и прочие [1, 7, 9, 14, 16, 24]. Все они обладают рядом полезных свойств, за счет которых большее использование приобрели в строительстве, металлургии, высокочистой химии, лакокрасочной и пиротехнической промышленности, а также в военном деле.

Агрохимическое изучение природных полиминеральных ископаемых показало положительный эффект в отношении состояния плодородия почвы [9, 27], урожайности и показателей качества сельскохозяйственных культур [10, 14, 18]. Эффективные дозы таких веществ в зависимости от почвенно-климатических условий и особенностей выращиваемой культуры варьируют от 1 до 6 т/га.

Агроэкологическая роль природных кремнийсодержащих препаратов в отношении снижения пестицидной нагрузки на агробиогенез частично изучена в работах Л.А. Дорожкиной (1997), Н.В. Шмаковой (2003), О.В. Коробейниковой (2005), Д.В. Воронина (2010) и других авторов.

Также отмечается [29], что многие кремнийсодержащие вещества способны снижать излишнюю кислотность почвы. Этот факт является одним из ключевых для растениеводства, поскольку зачастую именно от оптимизации кислотности почвенного раствора зависит продуктивность агрофитоценоза. За счет наличия в составе природных кремниевых руд многих элементов питания, а также за счет таких физико-химических характеристик, как легкость и низкая теплоемкость, высокая пористость и, соответственно, большая удельная поверхность, высокая сорбционная активность и слабощелочная реакция среды, – они могут характеризоваться не только как агрохимическое сырье, но и как мелиоранты, имеющие свойства комплексного улучшения плодородия почвы и, тем самым, оптимизации роста и развития растений.

Из всех опал-кристобалитов весьма перспективным в отечественном сельском хозяйстве является использование высококонцентрированных кремнийсодержащих пород диатомитов и, в частности, диатомитов Инзенского месторождения, вырабатываемых в промышленных масштабах компанией «Diamix», созданной в 2009 г. на базе ООО «Диатомовый

комбинат» (Ульяновская область, г. Ульяновск). Их использование в системах удобрения является одним из перспективных подходов при разработке высокоинтенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур.

Вещества, содержащие в своем составе кремний, пока относятся именно к нетрадиционным удобрениям, поскольку в теоретической агрохимии еще недостаточно точных количественных данных о выносе и коэффициентах использования кремния растениями из почвы и удобрений, о пролонгировании их действия во времени, а также о реакции почвенно-биотического комплекса на привнесение кремниевых веществ в почву. Кроме того, степень внедренности в сельскохозяйственное производство диатомовых руд и подобных им кремнийсодержащих туков в настоящее время, к сожалению, не занимает такой же первостепенной позиции как, например, применение сложных минеральных удобрений [17].

В отношении изучения влияния диатомовых и иных природных кремнийсодержащих удобрений на биологическую активность почвы и, в частности, на изменение в ней численности агрономически ценных микроорганизмов и ее ферментативной активности, актуальность данных вопросов на сегодняшний день сопоставима с ранее рассмотренными вопросами агрохимической ценности кремниевых агроруд [11]. Кроме того, сопоставление результатов изменений некоторых характеристик биокосной и живой составляющих почвы от кремнийсодержащих материалов, применяемых в конкретных почвенно-климатических условиях [25], на данный момент малоубедительно для выведения закономерностей более высокого уровня – это возможное микробиологическое и биохимическое преобразование С-, N-, P-, K- и Si- циклов вещества. Подобные вопросы и по нынешний день определяют необходимость проведения микробиологических и биохимических исследований влияния кремнийсодержащих природных и синтетических веществ на систему «почва – растение» в различных почвенно-климатических условиях страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов, В.С. Цеолитсодержащие породы Краснодарского края в качестве инактиваторов тяжелых металлов в почве / В.С. Белоусов // Агрохимия. – 2006. – № 4. – С. 78-83.
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. 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.
4. Воронков, М.Г. Силатраны / М.Г. Воронков, В.М. Дьяков. – Новосибирск: Наука, 1978. – 207 с.
5. Догадина, М.А. Эффективность биокремнийорганического стимулятора Мивал-агро при возделывании овощных культур / М.А. Догадина // Аграрная наука – сельскому хозяйству. – Курск, 2009. – Ч. 3. – С. 173-175.
6. 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.
7. 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.
8. Ермолаев, С.А. Эффективность применения силикатных форм химических мелиорантов / С.А. Ермолаев, И.А. Шильников, Н.И. Аканова // Плодородие. – 2004. – № 2. – С. 13-16.

9. Камский, А.В. Эффективность кремнийсодержащего сырья – диатомита при возделывании зерновых культур на дерново-подзолистых почвах : автореф. дис...канд. с.-х. наук : 06.01.04 / Камский Андрей Викторович. – Немчиновка, 2007. – 21 с.
10. 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.
11. 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.
12. Колесников, М.П. Формы кремния в растениях / М.П. Колесников // Успехи биологической химии. – 2001. – Т. 41. – С. 301-322.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Никифорова, С.А. Эффективность предпосевной обработки семян ячменя биопрепаратами и диатомитовым порошком в условиях Среднего Поволжья : автореф. дис...канд. с.-х. наук : 06.01.04 / Никифорова Светлана Александровна. – Саранск, 2009. – 18 с.
19. 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.
20. Самсонова, Н.Е. Роль кремния в формировании фосфатного режима дерново-подзолистых почв / Н.Е. Самсонова // Агрохимия. – 2005. – № 8. – С. 11-18.
21. 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.
22. Шеуджен, А.Х. Биогеохимия. – Майкоп: ГУРИПП «Адыгея», 2003. – 1028 с.
23. 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.
24. 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.
25. Kozlov, A.V. The microbiological transformation compounds of silicon and phosphorus components to the light-gray forest light loamy soil and production of cereals under the influence of diatomite / A.V. Kozlov, N.N. Copoulos, I.P. Uromova, O.V. Shtyrlina // The collection includes of 4-th International Conference on Science and Technology from 25-26 October 2014 (Held by SCI-EURO in London). – 2014. – № 10. – P. 48-59.

26. Ma, J.F. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan / J.F. Ma, E. Takahashi // The Netherlands. – Elsevier, 2002. – 281 p.
27. Matichenkov, V.V. Nutrients leaching reduction by Si-rich substances in the model experiments / V.V. Matichenkov, D.V. Calvert, G.H. Snyder et al // Proc. 7th Inter. Conf. Wetland Systems for Water Pollution Control. Lake Buena Vista. – Florida. – 2000. – P. 569-572.
28. Savant, N.K. Silicon management and sustainable rice production / N.K. Savant // Advan. Agron. Acad. Press. – San Diego: CA (USA). – 1997. – Vol. 58. – P. 151-199.
29. Silicon interaction with manganese and aluminum toxicity of sorghum / Galver L. et al // Plant nutrition. – 1980. – V. 10. – № 9-16. – P. 1139.
30. Silverman, M.P. Biological and organic chemical decomposition of silicates / M.P. Silverman // Biogeochemical cycling of mineral forming elements. – 1979. – P. 445-453.

© Козлов А.В., Куликова А.Х., Яшин Е.А., 2015