

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПРЕПАРАТОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ (ОБЗОР НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

В. В. Матыченков¹, Е. А. Бочарникова¹, Г. В. Пироговская², И. Е. Ермолович²

*¹Институт фундаментальных проблем биологии,
г. Пущино, Россия*

*²Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

ВВЕДЕНИЕ

Сельское хозяйство является важнейшей областью экономики любого государства, обеспечивая его фактическую независимость и устойчивое развитие. Климатические изменения в последние десятилетия, процессы деградации почв, обусловленные интенсивными технологиями возделывания сельскохозяйственных культур, а также политические события существенно повысили роль сельского хозяйства в безопасности населения каждой республики.

Кремний по распространенности в земной коре является вторым элементом после кислорода. В агрохимии рассматривается как условно необходимый растениям элемент, не входящий в двадцатку наиболее нужных. Однако, несмотря на высокое содержание кремния в почвах, его доступность для растений очень низкая. Вместе с тем имеются данные, свидетельствующие о важной роли этого элемента в повышении продуктивности сельскохозяйственных культур, в процессах формирования устойчивости растений к различным неблагоприятным факторам окружающей среды, положительном его влиянии на качество продукции и, в конечном итоге, на участие кремния в процессах жизнеобеспечения сельскохозяйственных животных и человека. Известно также, что в организме человека кремний восьмикратно участвует в процессах жизнеобеспечения, а в ежедневных продуктах, выделенных здоровым организмом человека, содержание кремния составляет 4,7 %, скрытый процент участия кремния в процессах жизнеобеспечения человека составляет около 38 % [1–3].

Положительное влияние кремниевых препаратов (почвенных мелиорантов, удобрений и биостимуляторов) было установлено на различных почвах и для многих культур: риса, сахарного тростника, ячменя, пшеницы, овса, ржи, сорго, кукурузы, подсолнечника, бобов, сои, клевера, люцерны, проса, томатов, огурцов, кабачков, салата, табака, сахарной свеклы, лимонов, мандаринов, винограда, яблок, дынь [4–10]. Эффективность кремнийсодержащих препаратов, по данным литературных источников, находилась в пределах от 5 до 15 % и выше. В мировой литературе в последнее время появились многочисленные работы, указывающие на возможность снижения негативного воздействия абиогенных и биогенных стрессоров на растения, обработанных препаратами на основе кремния [11, 12]. Во многих работах показано, что при совместном использовании минеральных

удобрений с кремниевыми препаратами наблюдается повышение эффективности азота, фосфора и калия [13, 14]. Указывается, что внесение активных форм кремния способствует повышению уровня почвенного плодородия [15].

Однако применение кремниевых препаратов до сих пор является нетрадиционным, и они используются весьма ограничено. Существует ошибочное убеждение о необходимости их применения только под культуру риса [16]. Распространено также мнение о специфичности почв, нуждающихся в кремниевых удобрениях [17]. Во многом это связано с низким уровнем информации о роли и функции кремния в системе «почва–растения», низкой методологической основе изучения этого элемента в природе. Цель настоящей работы – продемонстрировать перспективы использования препаратов на основе кремния в сельском хозяйстве.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПРЕПАРАТОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Впервые кремний, как важный элемент в питании растений указывается в трудах Дэви (Davey) в 1814 г. [18]. Им было сделано предположение, что кремний, аккумулируясь в эпидермальных тканях растений, создает защитный барьер против насекомых-вредителей и болезней. В 1840 г., опираясь на данные по элементному составу растений, Ю. Либих [19] пришел к выводу о необходимости применения кремниевых удобрений. Он провел первый эксперимент с силикатом натрия на сахарной свекле. Кроме увеличения массы корнеплода Ю. Либих зафиксировал повышение содержания сахара при внесении кремниевого удобрения.

Полученные Ю. Либихом результаты способствовали началу полевых испытаний кремниевых удобрений. В 1856 г. Lowes закладывает эксперимент «Grass Park» на Ротамстедской станции в Англии с использованием силиката натрия. Этот эксперимент продолжается до сих пор, и вариант с кремниевым удобрением позволяет получить самые высокие прибавки урожая [20].

Таблица 1

Содержание кремния в некоторых растениях [45]

Растения	% кремния от сухого веса	Растения	% кремния от сухого веса
Equisetum	0,7–8,99	Avena sativa	0,65–3,74
Picea excelsa	0,31–1,75	Nicotina tabacum	0,16–0,65
Beta vulgaris	0,70	Theobroma cacao	2,08–2,90
Helianthus annuus, hulls	1,23–2,27	Gossypium barbadence	0,28–0,71
Lactuca sativa	1,32	Hordeum vulgare	0,42–4,70
Oryza sativa	2,72–8,40	Secale cereale	0,46–1,23
Triticum aestivum	0,16–3,11	Zea mays	0,32–0,78

В 1870 г. великий русский химик Д. И. Менделеев [21] предложил использовать в качестве кремниевого удобрения аморфный диоксид кремния. Он рекомендовал провести первые в России полевые агрохимические опыты с этим соединением. В 1881 г. в США было запатентовано первое коммерческое кремниевое удобрение

[22]. А несколькими годами позже американский почвовед-агрохимик Maxwell [23] проводит первые исследования по обеспеченности различных почв доступным растениям кремния.

В конце девятнадцатого века активно изучается роль кремния в физиологии растений во Франции и Германии Pierre (1866), Jodin (1883), Kreuzhage and Wilf (1884) [24, 25]. Grob (1896) изучил анатомию эпидермальных тканей и подтвердил предположение Davey о роли кремния в защите растений от болезней и насекомых-вредителей [26].

В 1915–1917 г. японский исследователь Onodera [27] после посещения Кенигсбергского и Кембриджского университетов начинает работать с кремниевыми удобрениями. Итогом многочисленных испытаний, проведенных в Японии [28, 29], явилось обязательное использование кремниевых удобрений при выращивании риса.

В первой четверти XX века в США большое внимание было уделено возможности использования кремниевых удобрений на кислых почвах. В качестве кремниевых удобрений в то время применяли промышленные отходы – шлаки и золу [30, 31]. В 1936 г. Ayres [32] провел на Гавайях первые полевые испытания кремниевых удобрений на сахарном тростнике. Затем эти работы были продолжены во Флориде, где в настоящее время кремниевые удобрения успешно применяют для риса, сахарного тростника и на пастбищах [17, 33].

В Советском Союзе уделялось большое внимание изучению кремниевых удобрений и роли кремния для растений. Так, академик В. И. Вернадский указывал на общую роль кремния в природе [34]. Теоретическими исследованиями роли Si в системе «почва–растение» занимались Д. Л. Аскинази [35], И. В. Тюрин [36], В. А. Ковда [37]. С. В. Литкевич [38] установил положительное влияние кремниевых удобрений на фосфорное питание растений. Большое количество работ было посвящено использованию кремнийсодержащих отходов промышленности в сельском хозяйстве [6, 39, 40, 41].

В 70–80-х годах в СССР было как минимум 4 научных центра по изучению теории и практики кремниевых удобрений: в МГУ им. Ломоносова [42], Тимирязевской академии [43], Институте риса [44], Свердловском СХИ [45]. Итогами этих исследований явилось применение в сельском хозяйстве некоторых отходов промышленности (цементной пыли, шлаков) и кремнийсодержащих минеральных удобрений (цеолитов).

ВЛИНИЕ КРЕМНИЯ НА РАСТЕНИЯ

Кремний является неотъемлемым компонентом растений. Его содержание в золе составляет от 0,16 до 8,4 % и выше [46]. Наибольшее количество кремния содержится в злаках, где зольность достигает 8–16 % [37]. Установлено, что у более продуктивных и устойчивых сортов злаков содержание кремния выше [47, 48]; растения поглощают кремний в форме монокремниевой кислоты в виде гидрата $\text{Si}(\text{OH})_4$. В растении монокремниевая кислота аккумулируется и полимеризуется в эпидермальных тканях (коре, листьях, корнях), а также трансформируется в различные виды фитолитов [4, 37]. В эпидермальных тканях образуется двойной кутикулярный слой, который механически защищает и укрепляет растения [24, 49]. Этот же слой во многом предотвращает избыточное испарение влаги из

листьев растений [50]. Доказано, что устойчивость растений к заболеваниям и насекомым-вредителям при использовании кремниевых препаратов обеспечивается именно этим механизмом [17, 51].

Внесение кремниевых препаратов приводит к увеличению веса корней растений [7, 52] и их объема [5, 53]. Улучшение кремниевого питания растений приводит к увеличению количества вторичных и третичных корешков [54, 55].

Присутствие высоких концентраций монокремниевой кислоты (свыше 1 мМ) повышает всхожесть семян, ускоряет формирование плодов томата, огурцов, риса, созревание кукурузы, рост цитрусовых, увеличивает содержание сахара в сахарной свекле и сахарном тростнике [56, 57, 58]. Было доказано, что оптимизация кремниевого питания приводит к увеличению стабильности молекул ДНК и РНК растений [4, 59]. Установлено наличие кремния в рибосомах, митохондриях, хлоропластах, микросомах и других органеллах [60, 61]. Многочисленные исследования показывают, что внесение кремниевых препаратов существенно повышает содержание хлорофилла (а), хлорофилла (б) и каротиноидов [62, 63].

В последнее время резко увеличилось количество работ посвященных влиянию кремния на устойчивость растений к абиотическим стрессам холодоустойчивости, жароустойчивости, устойчивости растений к дефициту влаги, питательных элементов, высоким концентрациям соли, тяжелым металлам, нефтяному загрязнению [64–67]. Современные исследования показали способность кремнийсодержащих биостимуляторов повышать активность антиоксидантных ферментов, таких как: аскорбатпероксидазы, глутатионредуктазы, гваякол-пероксидазы и других ферментов, что позволяет снижать уровень перекисного окисления липидов [68, 69].

Механизмы воздействия кремния на растения изучены недостаточно. Существует мнение о том, что кремний способен стимулировать естественные защитные реакции растений на различные стрессы, тем самым выполняя биологически активную роль в растении [70, 71].

В настоящее время известно несколько кремний-опосредованных механизмов, обеспечивающих защиту растений в условиях стресса: 1) механическая защита благодаря аккумуляции кремния в эпидермальных тканях [17]; 2) физиологическая защита за счет улучшения развития корневой системы и усиления фотосинтеза [7]; 3) химическая защита посредством химического взаимодействия между монокремниевой кислотой и токсичными соединениями в тканях растений [65]; 4) оптимизация транспорта микро- и макроэлементов [72], 5) кремниевые соединения могут участвовать либо непосредственно, либо опосредованно через сигнальную систему растений в синтезе стресс-белков и ферментов или их фрагментов [68, 69]. Разнообразие испытываемых растений свидетельствует об универсальности данных механизмов как для Si аккумулятивных, так и для Si не аккумулятивных растений.

ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ НА ПЛОДОРИДИЕ ПОЧВ

Растения поглощают только монокремниевые кислоты. Расчеты показывают, что интенсивность этого процесса достигает 100–300 кг/га кремния в бореальной климатической зоне и 500–1000 и выше в тропиках в год [65, 66, 67]. В то же время содержание монокремниевых кислот в почвах редко превышает 20 кг/га кремния [77, 78, 79]. Таким образом, для удовлетворения потребности растений в кремнии необходимо дополнительное растворение минералов почвы. Большая

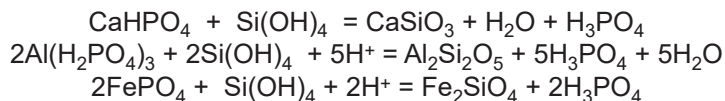
часть поглощенных растением мономеров полимеризуется и трансформируется в фитолиты (аморфный кремнезем) [80, 81]. После отмирания растений этот аморфный кремнезем попадает в почву, где служит основным источником монокремниевых кислот [81, 82].

Периодичность биологического круговорота, связанная с сезонными колебаниями температуры и влажности, как правило, приводит к накоплению кремнийсодержащих фитолитов и, следовательно, к увеличению концентрации монокремниевых кислот в естественных почвах [80, 82]. Наиболее активно этот процесс протекает под луговыми и травянистыми системами [74, 75]. Для экосистем с высокой круглогодичной биологической активностью, а также для почв с ярко выраженным процессом лессиважа (например дерново-подзолистыми почвами) не характерно накопление доступного растениям кремния [83]. Эти экосистемы постоянно испытывают дефицит доступного кремния.

Использование почв в сельском хозяйстве нарушает баланс питательных элементов, поскольку значительная их часть безвозвратно отчуждается с урожаем. Обычно растения выносят кремния больше, чем азота, фосфора и калия [17, 73, 74, 88]. Так, например, картофель выносит от 50 до 70 кг/га кремния, зерновые – от 100 до 300 кг/га [73, 88]. На основе литературных данных по выносу кремния различными культурами, а также справочных данных по урожайности было подсчитано, что ежегодно в мире 210–224 млн т кремния безвозвратно выносятся с урожаем [76].

Нарастающий дефицит кремния в сельскохозяйственных почвах вызывает ряд негативных последствий, так как он является не только питательным, но и конструктивным элементом. Дефицит монокремниевой кислоты и уменьшение содержания аморфного кремнезема приводят к разрушению органоминерального комплекса, ускоряют деградацию органического вещества, ухудшают минералогический состав [85, 86]. Таким образом, внесение кремнийсодержащих препаратов необходимо для обеспечения достаточного питания растений кремнием и предотвращения деградации почв. Однако существует еще ряд специфических механизмов влияния кремниевых удобрений на плодородие почв.

Наиболее изученным эффектом кремниевых удобрений на свойства почв является их влияние на содержание доступного для растений фосфора [42, 87]. Термодинамические расчеты показывают возможность реакции вытеснения фосфат-аниона силикат-анионом из труднорастворимых фосфатов с образованием соответствующих силикатов [35, 88].



Для ряда почв была выявлена линейная зависимость между повышением количества монокремниевой кислоты при внесении кремниевых удобрений и увеличением доступного растениям фосфора. Коэффициент корреляции между содержанием монокремниевой кислоты и подвижных фосфатов для обыкновенного чернозема и каштановой почвы составил 0,63 и 0,75 соответственно [89].

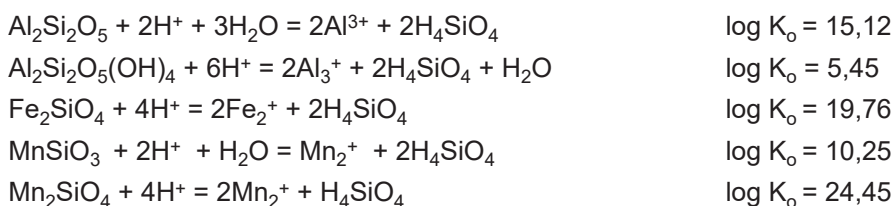
Таким образом, кремниевые удобрения способствуют переходу не доступных растениям почвенных фосфатов в доступные формы, а также препятствуют трансформации фосфорных удобрений в не доступные для растений соединения.

Расчеты показывают, что кремниевые удобрения могут позволить снизить расход фосфорных удобрений на 30–50 % [90, 91].

Для легких почв с промывным водным режимом весьма актуальна проблема выноса фосфора из корнеобитаемого слоя и загрязнение им примесями, содержащимися в фосфорных удобрениях, природных вод [92]. Для этих регионов более важна возможность адсорбции фосфора на поверхности кремнезема или кремнийсодержащих минералов. Как показывают исследования, внесение кремниевых удобрений или почвенных мелиорантов позволяет существенно снизить вынос фосфора и сохранить его в доступной для растений форме [93].

В последнее время было замечено, что внесение кремниевых препаратов повышает эффективность азотных удобрений [94, 95]. Полевые испытания показали, что совместное применение кремниевых и азотных удобрений позволяет снизить дозы последних на 30 % и выше без снижения урожайности выращиваемых растений [96]. Предполагается несколько механизмов, объясняющих этот эффект: 1) снижение выноса аммонийного и нитратного азота вниз по почвенному профилю [93]; 2) увеличение популяции азотфиксирующих микроорганизмов [97]; 3) обеспечение более полого процесса нитрификации и денитрификации [98].

Другим наиболее изученным аспектом влияния кремниевых удобрений на плодородие почв является снижение токсичности алюминия и повышение уровня pH в кислых почвах [6, 7, 99]. Многочисленные лабораторные и полевые эксперименты показали, что использование кремниевых удобрений или почвенных мелиорантов для снижения алюминиевой токсичности более эффективно, чем применение извести или доломита [100, 101]. Предполагается существование нескольких механизмов снижения токсичного действия Al, а также Mn и Fe с помощью кремнийсодержащих препаратов. Во-первых, растворимый кремнезем адсорбируется на гидроокислах Al и Fe, снижая их растворимость [102]. Во-вторых, монокремниевые кислоты могут образовывать с ионами Al, Fe и Mn труднорастворимые соединения [88]:



Уменьшение алюминиевой токсичности кремниевыми удобрениями также может быть обусловлено прочной адсорбцией анионов Al на аморфном кремнеземе. При этом возможна модификация поверхности диоксида кремния, приводящая к более прочной хемосорбции Al [103].

Необходимо также учитывать, что кремниевые удобрения обычно имеют нейтральную или слегка щелочную реакцию, так как в качестве кремниевых препаратов используют силикат кальция. Поэтому такие препараты могут повышать pH кислых почв [104, 105].

Степень и направленность влияния кремниевых удобрений и почвенных мелиорантов на физические свойства почв зависит как от свойств почв, так и от вносимых удобрений. Munk [106] сообщает об улучшении физических свойств почвы

при дозе кремнезема 200–800 кг/га в год. Поликремниевые кислоты, образующиеся при внесении кремниевых препаратов способны связывать почвенные частицы и способствовать улучшению структуры почв за счет образования кремниевых мостиков между зернами ила [102, 107]. При этом повышаются агрегированность, влагоемкость, емкость обмена и буферность легких почв [93].

ТИПЫ КРЕМНИЕВЫХ ПРЕПАРАТОВ

Особенность кремнийсодержащих препаратов заключается в их многофункциональности. В настоящее время можно выделить три группы кремниевых препаратов, используемых в сельском хозяйстве.

1. Кремниевые почвенные мелиоранты в основном воздействуют на свойства почвы, такие как адсорбционная способность, структура, pH и другие. Их обычно вносят в дозах более 500 кг/га. К ним относятся силикат кальция, цеолит, диатомит и другие. Эти препараты влияют как на свойства почв, так и на кремниевое питание растений. Однако они обладают низкой эффективностью, требуют очень высоких доз внесения, перевозить их на большие расстояния экономически невыгодно. Для их внесения требуется специальная техника. В то же время большинство исследований посвящено именно этому классу кремниевых препаратов [93, 108]

2. Кремниевые удобрения применяют для обеспечения питания растений кремнием. Их вносят в дозах от 50 до 500 кг/га. К данной группе можно отнести аморфный диоксид кремния (микросилика, пирогенная двуокись кремния), кремниевый гель, силикаты натрия и калия [59, 91]. Эти препараты влияют в основном на кремниевое питание возделываемых растений. Они обладают высокой эффективностью, перевозить их можно на большие расстояния. Однако таким препаратам уделяется меньше внимания в научной литературе, так как наиболее часто эти кремниевые удобрения представлены аморфным диоксидом кремния, представляющим собой тонкодисперсный пылеватый порошок, который трудно вносить существующей техникой. Возможно их смешивание с традиционными минеральными удобрениями на этапе их производства (гранулирования), что позволило бы решить эту задачу. Установлено, что с экономической точки зрения именно эти препараты должны преобладать в практическом сельском хозяйстве и им необходимо уделять большее внимание.

3. Кремниевые биостимуляторы – новый класс кремниевых агрохимикатов. Их применяют для опрыскивания растений в дозах менее 10 кг/га [109, 110]. К данной группе относятся вещества, которые способны улучшать рост и продуктивность растений, качество урожая, устойчивость к биотическим и абиотическим стрессам [69]. В отличие от гормонов и биорегуляторов, биостимуляторы влияют на скорость процессов метаболизма растений, не изменяя при этом конечные продукты биохимических реакций [111]. Важно, что эффективность биостимуляторов проявляется при малых дозах. Дозы биостимуляторов в среднем составляют от нескольких сотен граммов на гектар и не превышают нескольких килограммов на гектар. Кремниевые биостимуляторы уже активно применяются в США, Китае, Индии, Японии, Франции и других странах. Низкие дозы позволяют получить наибольший экономический эффект как для производителей таких биостимуляторов, так и для их потребителей.

КРЕМНИЕВЫЙ СТАТУС ПОЧВ

Несомненно, что общее содержание кремния в почве не позволяет оценивать его активность. Поэтому для определения уровня дефицита активных форм кремния в почве важно знать содержание его растворимых форм, а именно мономеров и полимеров кремниевой кислоты [79]. При растворении кремнийсодержащих минералов образуются только ортокремниевая кислота (монокремниевая кислота). Часть мономеров в присутствии тонкодисперсной твердой фазы может формировать полимерные формы кремниевой кислоты [77]. Равновесие между моно- и поликремневыми кислотами в почвенном растворе достигается в течение 2–3 недель после увлажнения сухой почвы [79]. Содержание этих форм кремния, определенное в водной вытяжке из сырой почвы, характеризует актуальное содержание растворимого кремния [79].

Скорость растворения минералов по кремнию довольно значительна при условии постоянного удаления монокремниевой кислоты из системы (например, при поглощении растениями или почвенными микроорганизмами). Поэтому важно знать потенциальное количество активных форм кремния, которое может быть растворено в процессе онтогенеза растений. Данный параметр лучше характеризуется концентрацией кремниевой кислоты в почвенной 0,1 н HCl вытяжке [42, 79]. Таким образом кремниевое состояние почв может быть оценено совокупностью параметров актуального и потенциального кремния. Было показано, что существует тесная взаимосвязь между содержанием актуального и потенциального Si. Для оценки уровня дефицита доступного для растений кремния (Si) в почвах необходимо иметь информацию об обеих его формах, однако на практике более удобно пользоваться одним параметром. Таким комплексным параметром может быть содержание **активного Si**. Была предложена следующая формула определения активного Si в почве:

Активный Si = 10 x Актуальный Si + Потенциальный Si

Анализ данных о содержании различных форм кремния в почвах позволил предложить следующую градацию почв по дефициту доступного для растений Si (табл. 2).

Отсутствие дефицита кремния характерно для почв с высоким уровнем плодородия (пойменные, вулканические, некультивируемые черноземы). Кремниевые удобрения или почвенные мелиоранты на этих почвах могут быть использованы для оптимизации фосфорного и азотного питания растений.

Низкий уровень дефицита кремния характерен для некультивируемых почв с высоким и средним уровнем плодородия (серая лесная, бурая лесная, серая почвы). К почвам, имеющим низкий уровень дефицита кремния, относятся также черноземы и другие почвы с высоким уровнем плодородия, но интенсивно используемые в сельском хозяйстве. Кремниевые удобрения и мелиоранты на этих почвах позволяют увеличить обеспеченность растений кремнием и повысить эффективность применяемых минеральных и органических удобрений, а также средств защиты растений.

Дефицит кремния характерен для деградированных сельскохозяйственных земель, почв с низким уровнем плодородия (дерново-подзолистые почвы). Кремниевые удобрения и мелиоранты обеспечивают снижение скорости деградации и эрозии сельскохозяйственных почв, а также необходимый уровень кремниевого питания растений.

Высокий уровень дефицита кремния характерен для сильно деградированных почв, песчаных почв. Недостаток активных форм Si существенно снижает урожайность сельскохозяйственных культур и эффективность вносимых агрохимикатов.

Таблица 2

Градации почв по дефициту доступного для растений кремния

Уровень дефицита Si в почве	Формы кремния, Si мг/кг		
	Актуальный Si	Потенциальный Si	Активный Si
Отсутствие дефицита	>40	>600	>1000
Низкий уровень дефицита	20–40	300–600	500–1000
Дефицит	10–20	100–300	200–500
Высокий уровень дефицита	0–10	0–100	0–200

ВЫВОДЫ

1. Кремний – важный элемент, активно участвующий в биологическом круговороте элементов системы «почва–микроорганизмы–растение».

2. Кремний влияет на ряд физиологических и биохимических процессов растений, в основном обеспечивая максимальную эффективность защиты от биотических и абиотических стрессов различной природы.

3. Внесение кремнийсодержащих препаратов положительно влияет на микробную активность почв, что способствует повышению почвенного плодородия.

4. Активные и инертные формы кремния участвуют в формировании почвенного плодородия, влияя и контролируя многие почвенные процессы, включая подвижность и активность таких элементов как фосфор, азот, алюминий, железо, тяжелые металлы.

5. Оценки объемов и интенсивности кремниевого цикла в природных и антропогенных системах позволяют сделать вывод, что во многих случаях нехватка доступного для растений кремния является лимитирующим фактором продуктивности экосистемы и ее экологической устойчивости.

6. Кремнийсодержащие почвенные мелиоранты, кремниевые удобрения и кремнийсодержащие биостимуляторы повышают урожайность сельскохозяйственных культур на 5–15 %, при одновременном улучшении качества продукции.

7. Применение кремниевых препаратов может существенно улучшить биодоступность фосфора и азота в почве, повысить эффективность фосфорных и азотных удобрений и снизить дозы их внесения (на 30–40 %), без уменьшения урожайности сельскохозяйственных культур.

8. Кремниевые препараты не являются специфическими. Их целесообразно использовать совместно с традиционными удобрениями. Многообразие фиксируемых эффектов кремниевых соединений на растения и почвенное плодородие показывает, что во многих случаях именно дефицит подвижного Si является основным лимитирующим фактором получения урожая.

Работа выполнена:

– при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103–6;

– в рамках ГПНИ (РБ) «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность», подпрограмме «Плодородие почв и защита растений», заданию 1.2.6 «Изучение миграции и трансформации кремния в дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава в системе «почва–удобрение–растение» (по данным лизиметрических исследований), 2021–2023 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронков, М. Г.* Кремний и жизнь. Биохимия, фармакология и токсикология соединений кремния / М. Г. Воронков. – Рига: ЗИНАТНЕ, 1987. – 587 с.

2. *Ермолаев, А. А.* Кремний в сельском хозяйстве / А. А. Ермолаев. – М., 1992. – 253 с.

3. *Куликова, А. Х.* Кремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур / А. Х. Куликова, А.В. Карпов, Е.А. Яшин; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина». – Ульяновск, 2020. – 174 с.

4. *Алешин, Н. Е.* Содержание кремния в РНК риса / Н. Е. Алешин // Доклады ВАСХНИЛ. – 1982. – № 6. – С. 6–7.

5. *Кудинова, Л. И.* Влияние кремния на вес растений ячменя / Л. И. Кудинова // Агрохимия. – 1974. – № 1. – С. 142–144.

6. *Тарановская, В. Г.* Силикатирование субтропических питомников и плантаций / В. Г. Тарановская // Советские субтропики. – 1939. – № 7. – С. 32–37.

7. *Adatia, M. H.* The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution / M. H. Adatia, R. T. Besford // Ann.Bot. – 1986. – Vol.58. – P.343–351.

8. *Artyszak, A.* Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality – A literature review in Europe / A. Artyszak // Plants. – 2018. – Vol. 7(3). – P. 54.

9. Soluble silicon sprays inhibit powdery mildew development on grape leaves / P. Bowen [et al.] // J. Am. Soc. Hortic. Sc. – 1992. – Vol. 117(6). – P. 906–912.

10. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives / B. S. Tubana [et al.] // Soil Science. – 2016. – Vol. 181(9/10). – P. 393–411.

11. Enhancing drought tolerance in wheat through improving morpho-physiological and antioxidants activities of plants by the supplementation of foliar silicon / Z. Ahmad [et al.] // Phyton Int. J. Exp. Bot. – 2020. – Vol. 89. – P. 529.

12. Silicon and nano-silicon: New frontiers of biostimulants for plant growth and stress amelioration / M. M. Sarkar [et al.] // Silicon and Nano-silicon in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement. – Academic Press, 2022. – С. 17–36.

13. Combined silicon-phosphorus fertilization affects the biomass and phytolith stock of rice plants / Z. Li [et al.] // Frontiers in plant science. – 2020. – Vol. 11. – P. 67.

14. Silicon promotes agronomic performance in Brassica napus cultivated under field conditions with two nitrogen fertilizer inputs / P. Laîné [et al.] // Plants. – 2019. – Vol. 8. – №. 5. – P. 137.

15. Effects of silicon and phosphatic fertilization on rice yield and soil fertility /

L. Wang [et al.] // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. – 2020. – Vol. 20. – № 2. – P. 557–565.

16. International Fertilizer Association (IFA). Rice. IFA World Fertilizer Use Manual. Paris. France. 1992.

17. Silicon management and sustainable rice production / N.K. Savant [et al.] // Advan. Agron. Acad. Press. San Diego, CA, USA. – 1997. – Vol. 58. – P. 151–199.

18. Davey, H. The Elements of Agricultural Chemistry / H. Davey. – New York: Estburn, Kirk & C, 1814.

19. Liebig, J. Organic Chemistry in Its Application to Agriculture and Physiology. 1840.

20. Rothamsted Experimental Station Guide the Classical Experiment, Lawes Agricultural Trust, Rapide Printing, Watton, Norfolk, 1991.

21. Менделеев, Д. И. Основы химии / Д. И. Менделеев. – Вып. 3. – С.-Петербург: Типография тов. «Общественная польза», 1870. – 392с.

22. Zippicotte, J., Zippicotte. J. Fertilizer. USA. Pat. №238240. 1881.

23. Maxwell, W. (Ed). Lavas and Soils of the Hawaiian Islands // Hawaii. Honolulu: Hawaiian Sugar Planters' Association. – 1898. – 186 p.

24. Epstein, E. Silicon / E. Epstein // Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. – 1999. – № 50. – P. 641–664.

25. Sommer, A. L. Studies concerning the essential nature of aluminum and silicon for plant growth / A. L. Sommer // Agric. Sci. Univ. of Calif. Pub. – 1926. – № 5. – P. 57–81.

26. Grob, A. Beitrage zur anatomie der epidermis der gramineenblätter / A. Grob // Bibl. Bot., Bd, Ht. – 1896. – Vol. 36. – P. 1–96.

27. Onodera, I. Chemical studies on rice blast. J. of the Scientific Agric. Soc. – 1917. – № 180. – P. 606.

28. Miyake, K. Chemische untersuchungen uber die widerstands fahigkeit der reisarten gegen die «Imochi krankheit» / K. Miyake, M. Adachi // J. Biochemistry. Tokyo. – 1922. – Vol. 1. – № 2. – P. 223–229.

29. Suzuki, H. Studies on the Influence of some environmental factors on the susceptibility of the rice plant to blast and hemlminthosporim diseases, and on the anatomical characters of the plant / H. Suzuki // J. Coll. Agric. – 1934. – Vol. 13. – №1. – P. 45–108.

30. Ames, J. W. Liming and lime requirement of soil / J. W. Ames, C. J. Schollenberger // Ohio Agr.Exp. Sta. – 1916. – Bul. 306.

31. Cowles, A. H. Calcium silicates as fertilizers / A. H. Cowles // Metal. Chem. Engin. – 1917. – № 17. – P. 664–665.

32. Ayres, A. S. Calcium silicate slag as a growth stimulator for sugarcane on low silicon soils / A. S. Ayres // Soil Sci. –1966. – Vol. 101. – № 3. – P. 216–227.

33. Anderson, D. L. Soil and leaf nutrient interactions following application of calcium silicate slag to sugarcane / D. L. Anderson // Fertilizer Research. – 1991. – № 30. – P.9–18.

34. Вернадский, В. И. Биогеохимическая роль Al и Si в почвах / В. И. Вернадский // Докл. АН СССР. – 1938. – Т. 21. – № 3. – С. 127–130.

35. Аскинази, Д. Л. Фосфатный режим почвы и известкование почв с кислой реакцией / Д. Л. Аскинази. – М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1949. 216с.

36. Тюрин, И. В. О биологическом накоплении кремнекислоты в почвах / И. В. Тюрин // Проблемы советского почвоведения. – 1937. – Т. 3. – С. 29–35.

37. Ковда, В. А. Минеральный состав растений и почвообразование / В. А. Ковда // Почвоведение. – 1956. – № 1. – С. 6–38.
38. Литкевич, С. В. Влияние кремнекислоты на развитие растений. Сообщение второе / С. В. Литкевич // По вопросам фосфатных и калийных удобрений, и известкования. – Л., 1936. – С.29–53.
39. Клечковский, В. М. Применение силикатов в земледелии / В. М. Клечковский, А. В. Владимиров // Химизация социалистического земледелия. – 1934. – № 7. – С. 55.
40. Ратнер, Е. И. Применение природных силикатов-отходов горнорудной промышленности и некоторых металлургических шлаков в качестве удобрений. Новое в удобрении / Е. И. Ратнер. – М.: Сельхозгиз., 1937. – Вып. 2. – С. 110–128.
41. Кошельков, П. Н. Влияние золя гуминовой кислоты, гумата Na и коллоидной кремнекислоты на подвижность P₂O₅ почв и фосфорных удобрений / П. Н. Кошельков // Почвоведение. – 1938. – № 2. – С. 163–180.
42. Матыченков, В. В. Влияние аморфного кремнезема на некоторые свойства дерново-подзолистых почв / В. В. Матыченков, Я. М. Аммосова // Почвоведение. – 1994. – № 7. – С.52–61.
43. Васильева, М. В. Отзывчивость растений ячменя и кукурузы на удобрение кремнием // Проблемы повышения плодородия почв в условиях интенсивного земледелия: тез. докл. Всес. науч. конф. – М., 1988. – С. 38–39.
44. Содержание и вынос элементов минерального питания риса / Е. П. Алешин [и др.] // Агрохимия. –1986. – № 9. – С. 82–87.
45. Роль аморфной кремниевой кислоты в явлениях солонцеватости почв / Н. П. Панов [и др.] // Вестн. с.-х. науки. – 1982. – № 11. – С. 18–27.
46. Кремний и жизнь / М. Г. Воронков [и др.]. – Рига: Zinatne, 1978. – 578 с.
47. Климашевский, Э. Л. Реакция различных сортов злаковых культур на уровень корневого питания и содержание в растениях кремния / Э. Л. Климашевский, Н. Ф. Чернышева // Доклады ВАСХНИЛ. – 1981. – № 3. – С. 5–7.
48. Silicon concentration, disease response and yield components of rice genotypes grown on flooded organic Histosols / C. W. Deren [et al.] // Crop Sci. – 1994. – Vol. 34. – P. 733–737.
49. Yoshida, S. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. Bull. Nat. Inst. Agric. Sci. –1965. – Ser.B. – № 15.
50. Ефимова, Г. В. Анатомо-морфологическое строение эпидермиса листьев риса и повышение его защитной функции под влиянием кремния / Г. В. Ефимова, С. А. Докучан // Сельскохозяйственная биология. – 1986. – № 3. – С. 57–61.
51. Silicon fertilization for disease management of rice in Florida / L. E. Datnoff [et al.] // Crop Protec. –1997. – Vol. 16. – № 6. – P. 525–531.
52. Emadian, S. F. Growth enhancement of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings by silicon / S. F. Emadian, R. J. Newton // J. Plant Physiol. – 1989. – Vol. 134. – № 1. – P. 98–103.
53. Relationship between root respiration and silica:calcium ratio and ammonium concentration in bleeding sap from stem in rice plants during the ripening stage / T. Yamaguchi [et al.] // Japan J. Crop Sci. – 1995. –Vol. 64. – № 3. – P. 529–536.
54. Silicon fertilizers for citrus in Florida / V. V. Matichenkov [et al.] // Proc. Flo. State Hort. Soc. – 1999. – Vol. 112. – P. 5–8.
55. Prospective of silicon fertilization for citrus in Florida / V. V. Matichenkov [et al.]

// Soil Crop Sci. Florida Proc. – 1999. – Vol. 59.

56. Effect of biostimulant and silica application on sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) production / L. W. Anggraeni [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 974. – №. 1. – P. 012077.

57. Effects of intercropping with peanut and silicon application on sugarcane growth, yield and quality / X. F. Shen [et al.] // Sugar Tech. – 2019. – Vol. 21. – №. 3. – P. 437–443.

58. Effect of silicon and nitrogen on *Diatraea tabernella* Dyar in sugarcane in Panama / R. Atencio [et al.] // Sugar Tech. – 2019. – Vol. 21. – №. 1. – P. 113–121.

59. The effect of optimization of silicon nutrition on the stability of barley DNA / Bocharnikova E. A. [et al.] // Moscow Univ Soil Sci Bull. – 2014. – Vol. 69(2). – P. 84–87.

60. *Воронков, М. Г.* Удивительный элемент жизни / *М. Г. Воронков, И. Г. Кузнецов.* – Иркутск: Восточно-Сибирское изд., 1983. – 107 с.

61. Root silicon treatment modulates the shoot transcriptome in *Brassica napus* L. and in particular upregulates genes related to ribosomes and photosynthesis / P. Etienne [et al.] // Silicon. – 2021. – Vol. 13. – № 11. – С. 4047–4055.

62. Silicon nanoparticles mitigate oxidative stress of in vitro-derived banana (*Musa acuminata* 'Grand Nain') under simulated water deficit or salinity stress / L. M. Mahmoud [et al.] // South African Journal of Botany. – 2020. – Vol. 132. – P. 155–163.

63. Silicon increases leaf chlorophyll content and iron nutritional efficiency and reduces iron deficiency in sorghum plants / G. C. M. Teixeira [et al.] // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. – 2020. – Vol. 20. – № 3. – P. 1311–1320.

64. *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 // Ecotoxicology and environmental safety. – 2018. – Vol. 147. – P. 881–896.

65. Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants / J. A. Bhat [et al.] // Plants. – 2019. – Vol. 8. – № 3. – P. 71.

66. Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants / B. Liu [et al.] // Plants. – 2019. – Vol. 8. – № 9. – P. 307.

67. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system / S. M. Zargar [et al.] // 3 Biotech. – 2019. – Vol. 9. – № 3. – P. 1–16.

68. Silicon modulates nitro-oxidative homeostasis along with the antioxidant metabolism to promote drought stress tolerance in lentil plants / S. Biju [et al.] // Physiologia Plantarum. – 2021. – Vol. 172. – № 2. – P. 1382–1398.

69. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review / Y. H. Kim [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2017. – Vol. 8. – P. 510.

70. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives / M. Luyckx [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2017. – Vol. 8. – P. 411.

71. Silicon and plants: current knowledge and future prospects / Z. Souiri [et al.] // Journal of Plant Growth Regulation. – 2021. – Vol. 40. – № 3. – P. 906–925.

72. Silicon improves chilling tolerance during early growth of maize by effects on micronutrient homeostasis and hormonal balances / N. Moradtalab [et al.] // Frontiers in plant science. – 2018. – Vol. 9. – P. 420.

73. *Bocharnikova, E. A.* Influence of plant associations on the silicon cycle in the soil-plant ecosystem / E. A. Bocharnikova, V. V. Matichenkov // Applied Ecology and Environmental Research. – 2012. – Vol. 10. – № 4. – P. 547–560.

74. *Базилевич, Н. И.* Биологическая продуктивность экосистем северной Евразии / Н. И. Базилевич; РАН Институт географии. – М.: Наука, 1993.

75. Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах / Н. И. Базилевич [и др.] / Ресурсы биосферы. – 1975. – Вып. 1. – С. 5–33.

76. *Bocharnikova, E. A.* Silicon soil state and biogeochemical balance in forest and grass ecosystems / E. A. Bocharnikova, V. V. Matichenkov // Sustainable Development: the View from the Less Industrialized Countries. San Jose, Costa Rica: UNED. – 1994. – P.453–466.

77. Влияние механической плотности почв на состояние и формы доступного кремния / В. В. Матыченков [и др.] // Почвоведение. – 1994. – № 11. – С. 71–76.

78. Подвижность силикатов, показатели плодородия дерново-подзолистой почвы, биоаккумуляция кремния и продуктивность сельскохозяйственных культур под действием цеолита / А. В. Козлов [и др.] // Сельскохозяйственная биология. – 2021. – Т. 56. – № 1. – С. 183–198.

79. Подвижные кремниевые соединения в системе почва–растение и методы их определения / И. В. Матыченков [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 17. – Почвоведение. – 2016. – № 3. – С. 37–46.

80. Опаловые фитоциты таежного биогеоценоза средней тайги / Г. В. Добровольский [и др.] // Биологические науки. – 1988. – № 2. – С. 96–101.

81. *Кутузова, Р. С.* Освобождение растительного кремнезема и SiO₂ минералов при минерализации растительного опада / Р. С. Кутузова // Почвоведение. – 1969. – № 5. – С. 56–66.

82. *Ковда, В. А.* Основы учения о почвах / В. А. Ковда. – М.: Наука, 1973. – Т. 2. – 915 с.

83. *Матыченков, В. В.* Подвижные соединения кремния в некоторых почвах юга Флориды / В. В. Матыченков, Г. С. Шнайдер // Почвоведение. – 1996. – № 12. – С. 1448–1453.

84. *Anderson, D. L.* Soil and leaf nutrient interactions following application of calcium silicate slag to sugarcane / D. L. Anderson // Fertilizer Research. – 1991. – № 30. – P. 9–18.

85. *Karmin, Z.* Formation of ferric drite by inhibition of grun rust structures in the presence of silicon / Z. Karmin // Soil Sci. Soc. Amer. J. – 1986. – Vol. 50. – Vol. 1. – P. 247–254.

86. *Marsan, F. A.* Fragipan bonding by silica and iron oxides in a soil from northwestern Italy / F. A. Marsan, J. Torrent // Soil Sci. Soc. Amer. J. – 1989. – Vol. 53. – № 4. – P. 1140–1145.

87. *Schaller, J.* et al. Silicon increases the phosphorus availability of Arctic soils // Scientific reports. – 2019. – Vol. 9. – № 1. – P. 1–11.

88. *Lindsay, W.L.* Chemical Equilibria in Soil. New York: John Wiley & Sons. 1979.

89. *Matichenkov, V. V.* The using of silicon metal-industry wastes in environment friendly agrotechnologies. XVI World Congress on Soil Science / В. В. Матыченков. – Acapulco, Mexico. – 1994. – Vol. 9. – P. 345–346.

90. *Матыченков, В.В.* и др. Комплексное кремний-фосфорное удобрение. №97121543. 1997. Россия.

91. *Матыченков, И. В.* Изменение содержания подвижных фосфатов почвы при внесении активных форм кремния / И. В. Матыченков, Е. П. Пахненко // Вест-

ник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 6.

92. Minimizing phosphorus release from newly flooded organic soils amended with calcium silicate slag: a pilot study / M. J. Chimney [et al.] // *Wetlands ecology and management*. – 2007. – Vol. 15. – № 5. – P. 385–390.

93. Reduction in nutrient leaching from sandy soils by Si-rich materials: Laboratory, greenhouse and filed studies / V. Matichenkov [et al.] // *Soil and Tillage Research*. – 2020. – Vol. 196. – C. 104–450.

94. Silicon promotes agronomic performance in Brassica napus cultivated under field conditions with two nitrogen fertilizer inputs / P. Laîné [et al.] // *Plants*. – 2019. – Vol. 8. – № 5. – C. 137.

95. *Malav, J. K.* Effect of silicon on nitrogen use efficiency, yield and nitrogen and silicon contents in rice under loamy sand soil / J. K. Malav, V. Ramani // *Res J Chem Environ*. – 2017. – Vol. 21. – № 4.

96. *Matichenkov, V., Xiao, W.* (2019) Reduction Cd in soil-rice by Si: theory and practice. Nova Publisher, New York

97. *Etesami, H.* Can interaction between silicon and non-rhizobial bacteria help in improving nodulation and nitrogen fixation in salinity-stressed legumes? A review / H. Etesami, S. M. Adl // *Rhizosphere*. – 2020. – Vol. 15. – C. 100–229.

98. Effect of silicon on barley growth and N₂O emission under flooding / T. Włodarczyk [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 685. – C. 1–9.

99. *Кинтаналья, М.Г.* Влияние разового внесения кремнийсодержащего шлама на свойства темно-каштановых почв под рисом на юге Украины: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / М. Г. Кинтаналья; Университет дружбы народов. – М., 1987. – 17с.

100. Silicon amelioration of aluminum toxicity in teosinte (*Zea mays L. ssp. mexicana*) / J. Barcelo [et al.] // *Plant Soil*. – 1993. – Vol. 154. – № 1. – P. 249–255.

101. *Foy, C.D.* Soil chemical factors limiting plant root growth / C.D. Foy // *Advances in Soil Sci*. – 1992. – Vol. 19. – P. 97–149.

102. Роль аморфной кремниевой кислоты в явлениях солонцеватости почв / Н. П. Панов [и др.] // *Вестн. с.-х. науки*. – 1982. – № 11. – С. 18–27.

103. *Zuciuk, G. M.* Effect of monosilicic acid on hydrolytic reactions of aluminum / G. M Zuciuk., P. M. Huang // *Soil Sci. Soc. Amer. Proc*. – 1974. – Vol. 38. – № 2. – P. 235–244.

104. Ameliorative effects of silicon fertilizer on soil bacterial community and pakchoi (*Brassica chinensis L.*) grown on soil contaminated with multiple heavy metals / B. Wang [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2020. – Vol. 267. – C. 115–411.

105. *Sreenivasan, S. T.* Evaluation of Calcium Silicate, Rice Hull and Rice Hull Ash as Silicon Sources in Wetland Rice on Acidic and Alkaline Soils / S. T. Sreenivasan, N. B. Prakash // *Journal of the Indian Society of Soil Science*. – 2017. – Vol. 65. – № 4. – P. 428–434.

106. *Munk, H.* Zur bedeutung silikatisher stoffe bei der oungeung landwirtschaftflecker rulturpflanzen / H. Munk // *Landwirt Forsch*. – 1982. – Vol. 34. – № 38. – P. 264–277.

107. Влияние механической плотности почв на состояние и формы доступного кремния / В. В. Матыченков [и др.] // *Почвоведение*. – 1994. – № 11. – С. 71–76.

108. Роль и значение кремния и кремнийсодержащих веществ в агроэкосистемах / А. В. Козлов [и др.] // *Вестник Мининского университета*. – 2015. – № 2(10). – С. 23.

109. Effect of silica ions and nano silica on rice plants under salinity stress/

- M. E. F. Abdel-Haliem [et al.] // Ecological Engineering. – 2017. – Vol. 99. – С. 282–289.
110. The effect of silicon application on growth of spring wheat under organic farming / J. Kowalska [et al.] // Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. – 2018. – Vol. 63. – № 3.
111. Biostimulants and crop responses: a review / R. Bulgari [et al.] // Biological Agriculture & Horticulture. – 2015. – Vol. 31. – № 1. – С. 1–17.

**PROSPECTS FOR THE USE OF SILICON
PREPARATIONS IN AGRICULTURE
(REVIEW OF SCIENTIFIC LITERATURE)**

V. V. Matichenkov, E. A. Bocharnikova, G. V. Pirogovskaja

Summary

The article provides a review of the scientific literature on the use of silicon-containing preparations in agriculture, including: a brief history of the use of silicon-containing preparations in agriculture, the effect of silicon on plants, soil fertility, silicon status of soils. The types of silicon preparations are given, conclusions are drawn from the review of scientific literature.

Поступила 16.05.2022