

УДК 631.811.93:631.812

## КРЕМНИЕВЫЕ УДОБРЕНИЯ И МЕЛИОРАНТЫ: ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ, ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ

© 2011 г. Е.А. Бочарникова<sup>1</sup>, В.В. Матыченков<sup>2</sup>, И.В. Матыченков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН  
142290 Пущино, Россия  
E-mail: mswk@rambler.ru

<sup>2</sup>Институт фундаментальных проблем биологии РАН  
142290 Пущино, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения  
119991 Москва, Ленинские горы, Россия

Поступила в редакцию 12.10.2010 г.

В обзоре обобщены материалы по изучению влияния кремниевых удобрений и мелиорантов на растения и почву. Дана краткая история изучения этого вопроса. Кремниевые соединения влияют на урожайность сельскохозяйственных культур как прямо, повышая устойчивость растений к биотическим и абиотическим стрессам, так и путем повышения плодородия почв: оптимизируя фосфатный режим, снижая токсичность Al и тяжелых металлов, улучшая физические свойства почв. Представлена характеристика видов кремниевых удобрений и почвенных мелиорантов.

*Ключевые слова:* кремниевые удобрения, кремниевые мелиоранты, теория и практика применения.

### СОЕДИНЕНИЯ КРЕМНИЯ В ПОЧВЕ

Кремний (Si) – элемент, входящий в IV группу Периодической системы элементов Менделеева вместе с углеродом и германием. Он обладает шестью валентными электронами и проявляет валентность 4. Благодаря тесному родству кремния и кислорода, в природе Si находится в основном в виде кислородсодержащих соединений. Кремний – самый распространенный после кислорода элемент земной коры. Его кларк, по Виноградову [1], равен 29.5, массовое содержание в земной коре – 23.8%. Кислородсодержащие соединения кремния – кварц и силикаты – составляют 87% всей литосферы. Кремнезем – самое распространенное на нашей планете вещество [2]. Его содержание в литосфере составляет 58.3% [3]. В виде самостоятельных пород содержание диоксида кремния насчитывает приблизительно 12% [2].

В основном работы, посвященные исследованиям кремния в почве, связаны с изучением различных почвенных минералов. Это логично, поскольку соединения кремния в почве преимущественно представлены диоксидом кремния и различными алюмосиликатами [4, 5]. Кварц, являясь кристаллической разновидностью кремнезема, характеризуется высокой устойчивостью к выветриванию [5] и

вместе с другими крупнокристаллическими силикатами (полевым шпатом, плагиоклазом, пироксенами) и вторичными или глинистыми кремнийсодержащими минералами (каолинитом, вермикулитом, смектитом и др.) формирует скелет почвы [4].

Кроме твердых соединений, в почвенном растворе постоянно присутствуют растворимые формы Si – моно- и поликремниевые кислоты, кремний-органические соединения, обладающие высокой химической и биологической активностью [2, 6, 7].

### ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КРЕМНИЕВЫХ УДОБРЕНИЙ

История изучения активных соединений кремния в системе почва–растение насчитывает более двухсот лет. Наличие кремния в растениях было установлено в конце XVIII в. сразу несколькими естествоиспытателями – Александром Гумбольдтом, Луи Николя Вокленом, Гемфри Деви [8]. Исследования А. Гумбольдта, который считал определение кремния в растениях обязательным для естествоиспытателя, позволили получить огромный банк данных о содержании этого элемента в различных растениях Европы и Америки. В 1813 г. Г. Деви, выдающийся ученый-химик и натуралист, на основа-

нии своих данных и результатов работ Гумбольдта выдвинул гипотезу, что кремнезем позволяет растениям создавать защиту от насекомых-вредителей. Он определил, что кремний концентрируется в эпидермальных тканях растений, создавая тем самым защитный барьер. В начале XIX в. была выдвинута гипотеза о важности кремниевого питания растений для получения высоких урожаев. В 1840 г. вышел в свет первый труд по агрохимии К. Либиха, где были перечислены 4 основных питательных элемента: азот, фосфор, калий и кремний. Немецкий исследователь провел ряд тепличных экспериментов, которые доказали важность улучшения кремниевого питания сельскохозяйственных растений для получения высоких урожаев. В своей книге Либих представил большой обзор, посвященный описанию свойств подвижных кремниевых соединений [9]. Его работа послужила теоретической базой для организации полевых испытаний кремниевых удобрений на Ротамстедской станции (Rothamsted Station) в 1856 г. Данный эксперимент продолжается до сих пор [10]. На Ротамстедской станции было впервые установлено, что активные формы кремния повышают подвижность фосфатов в почве [11].

Во второй половине XIX в. были начаты исследования, посвященные химии растворимых кремниевых соединений, проведенные Д.И. Менделеевым [12]. На основании полученных данных великий химик предложил Российскому сельскохозяйственному ученому комитету начать опыты с аморфным кремнеземом как активной формой кремния для улучшения питания растений. Однако конфликт между К.А. Тимирязевым и К. Либихом, повлекший за собой игнорирование кремния как важного питательного элемента, помешал осуществить предложение Д.И. Менделеева.

В Европе агрохимические исследования кремния и кремниевых удобрений были продолжены во второй половине XIX в. в Англии, Франции, Германии [1, 13–15]. Первый патент на кремниевое удобрение был выдан в 1881 г. в США [16]. Накопленные данные свидетельствовали о необходимости начать исследование доступных для растений форм кремния в почве. В США в 1898 г. профессор W. Maxwell [17] провел первые исследования почв на содержание водорастворимого кремния. В России интерес к этому элементу проявляли такие исследователи, как А. Крылов [18], К.К. Гедройц [19], И.В. Тюрин [20]. Их работы указывали на возможную высокую активность соединений кремния в системе почва–растение. Особый интерес в то время вызывало взаимодействие растворимых кремниевых соединений с фосфором и алюминием [21]. Проблеме взаимодействия фосфора

и кремния посвятили свои работы такие исследователи в СССР, как С.В. Литкевич [22], Д.Л. Аскинази [23, 24]. Особо следует отметить работы академика В.И. Вернадского [25, 26], утверждавшего, что без кремния невозможно существование живых организмов на нашей планете. Кремний является циклическим элементом, совершающим непрерывный круговорот в природе. “Миллионы тонн этого элемента, – указывал В.И. Вернадский, – находятся в непрерывном движении – в геохимической миграции”.

## СОЕДИНЕНИЯ КРЕМНИЯ В РАСТЕНИЯХ

Кремний является неотъемлемым компонентом растений. Его содержание в золе варьирует от 0.16 до 8.4% и выше [26, 27]. Наибольшее количество Si содержится в злаках, зольность которых достигает 8–16% [7, 28]. Было показано, что у более продуктивных и устойчивых сортов злаков содержание кремния выше [29, 30]. Высокое содержание кремния установлено в древних растениях, например, хвощах.

Si поглощается растениями в форме монокремниевой кислоты и ее анионов [14, 27, 31]. Современные методы исследования позволили предположить, что транспорт кремния по растительным тканям осуществляется с помощью специальных транспортных белков [32].

Первичная аккумуляция кремния происходит в эпидермальных тканях корней [33]. Причем корни растения способны концентрировать кремний из разбавленных растворов [34]. Оптимизация кремниевого питания растений приводит к увеличению массы корней [35, 36], их объема, общей и адсорбирующей поверхностей [14, 37].

Утолщение эпидермального кремний-целлюлозного слоя способствует механической устойчивости растений. По данным [38], при внесении кремниевых удобрений полегающие риса снижались с 40 до 1%.

Уменьшение транспирации при оптимизации кремниевого питания предположительно происходит благодаря уменьшению диаметра пор листьев [39] и уменьшению испаряющей поверхности листьев [40], а также изменению угла наклона листьев [41]. Коэффициент корреляции между интенсивностью транспирации и содержанием Si в растении составил для пшеницы  $r = 0.99$  [29].

Установлено, что чем выше концентрация кремния в растении, тем больше сухого вещества образуется на единицу использованной воды [42]. В экспериментах в водной культуре ячменя было

показано, что масса листьев при оптимальном кремниевом питании (20 мг  $\text{SiO}_2/\text{л}$ ) через 30 сут увеличивалась на 15–25% [37].

В ряде исследований было показано, что оптимизация кремниевого питания способствует увеличению стабильности молекул ДНК и РНК [7, 43]. Кремний присутствует в рибосомах [44], митохондриях, хлоропластах, микросомах [45].

Оптимизация кремниевого питания растений определяет увеличение концентрации хлорофилла в листьях кукурузы и огурцов [35]. Существуют данные о влиянии кремния на фотосинтетическую активность растений [35, 46, 47].

Таким образом, кремний, поглощаемый растениями в количествах, превышающих количества некоторых макроэлементов (фосфора, калия, а иногда и азота) [7, 27, 48, 49, 50], несомненно, играет важную роль в физиологических процессах. Однако до сих пор эти процессы изучены слабо. Крайне мало информации о самих растворимых формах кремния в тканях растений [51].

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ УДОБРЕНИЙ

О положительном влиянии кремния на рост и развитие растений известно с 1840 г., когда К. Либихом был опубликован первый научно обоснованный труд о минеральном питании растений [9]. К настоящему времени положительное влияние кремневых удобрений установлено на разных почвах для следующих сельскохозяйственных культур: риса (*Oriza sativa* L.), сахарного тростника (*Saccharum officinarum* L.), ячменя (*Hordeum vulgare* L.), пшеницы (*Triticum aestivum* L.), овса (*Avena sativa* L.), ржи (*Secale cereale* L.), сорго (*Sorghum vulgare* L.), кукурузы (*Zea mays* L.), подсолнечника (*Helianthus annuus* L.), бобов (*Vici faba* L.), сои (*Glycine max* L.), люцерны (*Medicago sativa* L.), проса (*Panicum miliaceum* L.), томатов (*Lycopersicum esculentum* L.), огурцов (*Cucumis sativus* L.), кабачков (*Cucurbita pepo* L.), салата (*Lactuca sativa* L.), табака (*Nicotiana tabacum* L.), сахарной свеклы (*Beta vulgaris* L.), лимонов (*Citrus x limon* (L.) Burm.f.), мандаринов (*Citrus reticulata* L.), винограда (*Vitis vinifera* L.), яблонь (*Malus silvestris* L.), дынь (*Cucumis melo* L.) и др. [14, 31, 38, 41, 42, 52–68].

Развитием теоретических предпосылок практического применения кремневых удобрений занимались ученые Японии, России, США и Англии, но по ряду субъективных и объективных причин в XX в. кремниевые удобрения не имели широкого применения нигде, кроме таких стран, как Япония,

Южная Корея и Индия. Лишь за последние 5 лет объем продажи и ассортимент кремневых удобрений стали ежегодно расти на 20–25%. Кроме Японии, в настоящее время кремниевые удобрения с успехом применяют в США, Бразилии, Колумбии, Мексике, Китае, Индии и других странах. Ускорению внедрения кремневых удобрений в практику способствовали новые теоретические исследования в данной области. Об этом свидетельствует ряд прошедших за последние годы международных конференций, посвященных использованию кремния в сельском хозяйстве (в США – в 1999 г., Японии – в 2002 г., России – в 2004 г., Бразилии – в 2005 г. и ЮАР – в 2008 г.).

#### ВИДЫ КРЕМНИЕВЫХ УДОБРЕНИЙ И ПОЧВЕННЫХ МЕЛИОРАНТОВ

В настоящее время можно выделить несколько типов кремневых удобрений: синтетические, удобрения на основе растительных остатков, некоторые горные породы, отходы промышленности.

К синтетическим кремневым удобрениям относят прежде всего получаемые путем химического синтеза силикаты натрия, калия, кальция, а также аморфный тонкодисперсный диоксид кремния [69]. При проведении научных экспериментов по выявлению механизмов влияния соединений кремния на систему почва–растение чаще всего используют именно этот тип кремневых удобрений.

Силикат натрия впервые начали применять в качестве кремниевого удобрения в 1856 г. на Ротамстедской станции [10]. В дальнейшем при проведении исследований с кремневыми удобрениями часто использовали аморфный тонкодисперсный диоксид кремния (“аэросил”, “белая сажа”) [70, 71]. В качестве комплексного кремний-калийного удобрения применяют легкорастворимый силикат калия [72]. Раствор силиката калия также используют для опрыскивания растений в теплицах [57].

В настоящее время наиболее известными и эффективными синтетическими кремневыми удобрениями являются Biosil (производится в Европе) и Zumsil (производится в США). По химическому составу оба препарата представляют собой концентрированный раствор монокремниевой кислоты, поэтому их применение основано на опрыскивании растений разбавленными водными растворами. Низкие дозы этих препаратов (2–6 л/га) обеспечивают высокий эффект.

В Китае более двух тысяч лет назад начали вносить в почву рисовую солому, содержание  $\text{SiO}_2$  в ко-

торой варьирует от 4 до 20% [14]. Технология, разработанная древними китайскими учеными, была закреплена специальным указом императора, обязывающим крестьян вносить часть рисовой соломы в почву. Некоторые традиционные агрохимические приемы, связанные с рисовой соломой, используют в Китае, Индонезии [73], на Филиппинах [74]. В США на болотных почвах южной Флориды оставляют стерню риса и перепашивают [30].

По своим свойствам рисовая солома является одним из наиболее эффективных кремниевых удобрений и мелиорантов [75]. Кроме увеличения количества доступного растениям кремния и улучшения физических свойств тяжелых почв [76, 77], рисовая солома способствует снижению негативного влияния солей в солонцах и увеличению микробиологической активности почв [78].

Однако большинство фермеров Азии не применяют рисовую солому в качестве кремниевого удобрения, поскольку ее используют в качестве строительного материала и корма для животных [79]. Существует также опасность распространения вместе с соломой насекомых-вредителей [80, 81]. Кроме рисовой соломы, в качестве кремниевого удобрения можно использовать солому других злаков, которая также обогащена кремнием [82]. К таким злакам относятся ячмень, рожь, пшеница [7].

Зола растений была самым первым комплексным минеральным удобрением человечества [83]. Благодаря высокому содержанию аморфного диоксида кремния, ее можно считать кремниевым удобрением. В Древнеримской империи золу растений применяли для повышения плодородия истощенных почв. Широко использовали золу и в Китае, где ее называли “огненным навозом” и вносили под пшеницу и бобы [84]. Несмотря на такой длительный опыт применения, в настоящее время в сельском хозяйстве золу растений почти не используют [85].

Наиболее известным примером кремниевых удобрений, добываемых как минеральное сырье, являются диатомиты и цеолиты [52, 86, 87]. Эти соединения имеют относительно хорошую растворимость, и их используют как в промышленности, так и в сельском хозяйстве [88, 89]. Эффективные дозы внесения таких природных мелиорантов варьируют от 1 до 6 т/га [52, 53, 86].

Кроме диатомитов и цеолитов можно использовать и другие типы природных минеральных соединений, которые по характеру воздействия на систему почва–растение относятся к кремниевым удобрениям и мелиорантам: опоки, туфы, пепел, парамонову глину [90], доломиты [91], дуниты [22]. Также для оптимизации кремниевого пита-

ния растений можно использовать пыль каменоломен [92]. С целью улучшения физических свойств почв эти соединения обычно вносят в очень высоких дозах: до 30% от массы верхнего почвенного горизонта [87, 93]. В среднем данные препараты предлагают вносить в дозах 1–6 т/га и больше [52, 90].

Утилизация промышленных отходов даже в развитых странах низкая и составляет от 10 до 30% [94]. Значительная их часть не содержит поллютантов и канцерогенов [95]. Обычно в их состав входят оксиды кремния, алюминия, кальция и другие экологически безопасные соединения [96, 97]. Высокое содержание  $\text{SiO}_2$  и большая дисперсность некоторых отходов дают возможность использовать их в качестве кремниевых удобрений. Первый патент на применение отходов доменного производства в сельском хозяйстве был выдан в США в 1881 г. [15].

В качестве кремниевых удобрений используют шлаки черной, цветной и алюминиевой металлургии, а также фосфорной промышленности. Чаще всего в качестве кремнийсодержащих мелиорантов применяют шлаки черной металлургии, поскольку проблема их утилизации стоит наиболее остро. Ежегодно только в России черная металлургия производит 71 млн. т шлаков [95]. Было показано, что 23 млн. т, т.е. 32%, могут быть использованы в качестве экологически безопасных кремниевых удобрений [97]. Наиболее распространенная доза внесения шлаков – 2 т/га [54, 59, 67].

Отход алюминиевой промышленности – бентонитовый шлам – также может быть использован в качестве кремниевого удобрения [98]. Проведенные исследования показали высокую эффективность шлаков заводов цветных металлов [14, 67, 99, 100].

В практике сельского хозяйства фосфшлаки активно применяют в России [101], США [54], Японии [102], что объясняется не только высокой эффективностью данных отходов в качестве кремниевых удобрений, но и возможностью их использования как источника фосфора [96, 103].

## ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЕВЫХ УДОБРЕНИЙ И МЕЛИОРАНТОВ НА РАСТЕНИЯ

Особенность кремниевых соединений заключается в их многофункциональности. Различают два типа воздействия кремниевых удобрений на урожайность сельскохозяйственных растений: прямое влияние на растения и опосредованное – через почву или почвенное плодородие [65, 104–106].

**Таблица 1.** Примеры положительного влияния кремниевых удобрений на растения, инфицированные насекомыми-вредителями

Вредитель	Источник
Рис	
Стеблевой сверлильщик, <i>Chilo suppressalis</i> , <i>Scirpophoga incertulas</i>	31, 75, 119
Зеленая цикада, <i>Nephotettix bipunctatus cincticeps</i>	120
Черно-белая саранча, <i>Sogetella furcifera</i>	121
Листовой паучок, <i>Tetranychus</i> spp.	31
Клещ	122
<i>Deroceras reticulatum</i>	123
Бабочка-огневка, <i>Chilo zacconius</i>	124
Сорго	
Корневой бороздовик, <i>Scrophu lariaceae</i>	33
Ячмень	
Плесень, <i>Erysiphe graminis</i> DC. F. sp. <i>Hordei</i> Em. Marchal	125
Огурец	
Паразиты, <i>Sphaerotheca fuliginea</i> (Schlech.: Fr.) Pollacci	66
Итальянская рожь	
Стеблевой сверлильщик, <i>Oscinella frut</i>	126
Виноград	
Растрескивание ягод	127

Прямое влияние кремниевых удобрений на растения. Наиболее изученное прямое действие кремниевых удобрений на сельскохозяйственные растения связано с повышением устойчивости растений к биогенным и абиогенным стрессам. Изучение влияния кремниевых удобрений на защитные свойства растений начали в 1934 г. Упрочнение кремнецеллюлозной мембраны при использовании кремниевых удобрений является одним из важнейших механизмов повышения сопротивляемости растений к внешним неблагоприятным факторам – болезням, насекомым-вредителям, засухе, ветрам и т.д. Разнообразие как растений, так и заболеваний, при которых растения положительно отзываются на внесение соединений кремния (табл. 1, 2), позволяет говорить об универсальности данного механизма. Предполагают, что основную защитную роль при этом играет кремнезем, аккумулирующийся в эпидермальных тканях [107, 108] и внешних волосках листовых пластин [33]. На практике наиболее эффективным средством защиты растений от болезней и вредителей является совместное использование кремниевых препаратов и пестицидов [59].

Показано, что кремниевые удобрения повышают содержание сахара в сахарной свекле [9, 109, 110] и сахарном тростнике [111, 112]. Кремниевые

**Таблица 2.** Примеры положительного влияния кремниевых удобрений на устойчивость растений к болезням

Болезнь, возбудитель	Источник
Ячмень	
Плесень, <i>Erysiphe graminis</i>	125, 128, 129
Огурец	
Болезнь корней, <i>Pythium aphanidermatum</i>	130
Болезнь корней, <i>Pythium ultimum</i>	131
Загнивание ствола, <i>Penicillium oxalicum</i>	132
Стволовые пятна, <i>Botrytis cineria</i>	132
Огурец, дыня	
Плесень, <i>Sphaerotheca fuliginea</i>	66, 35, 133
Виноград	
Плесень, <i>Oidium tuckeri</i>	134
Плесень, <i>Uncinula necator</i>	135
Рис	
Грибковый вредитель, <i>Piricularia oryzae</i>	136
Коричневые листовые пятна, <i>Helminthosporium oryzae</i>	137
Коричневые листовые пятна, <i>Cochiobolus miyabeanus</i> , <i>Pyricularia oryzae</i>	58, 138, 139, 140
Обесцвечивание зерна, <i>Bipolaris</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Epicoccum</i> ets	138, 141
Листовой и стеблевой вредитель, <i>Magnaporthe grisea</i> , <i>Pyricularia grisea</i>	58, 83, 108, 139, 141
Листовая парша, <i>Gerlachia oryzae</i>	142, 138, 141
Грибковый вредитель, <i>Thanatephorus cucumeris</i> ( <i>Rhizoctonia solani</i> )	142, 143
Грибковый вредитель, <i>Corticium saskii</i> (Shirai)	144
Гниение стебля, <i>Magnaporthe salvanii</i> ( <i>Sclerotium oryzae</i> )	142
<i>Fibrobacter succinogenes</i> S85	80
Дикий рис ( <i>Zizania palustris</i> )	
Грибковые коричневые пятна, <i>Bipolaris oryzae</i>	145
Сахарный тростник	
Ломкость листьев	60
Ржавчина, <i>Puccinia melanocephala</i> H. Syd & P. Syd.	146
Пятна, <i>Leptosphaeria sacchari</i> Breda de Hann	147
Томат	
Грибковое заболевание, <i>Sphaerotheca fuliginea</i>	35
Плесень, <i>Septoria nodorum</i>	129
Кабачок	
Плесень, <i>Erysiphe cichoracearum</i>	66

удобрения способствуют увеличению содержания витаминов в плодах растений [14, 45, 113].

Важно отметить, что внесение кремниевых удобрений под citrusовые ускоряло рост деревьев на

30–80% и созревание плодов на 2–4 нед, а также увеличивало количество плодов [114, 115]. Причем скорость роста и число побегов увеличивались как у молодых, так и у взрослых растений после внесения кремниевых удобрений [114]. Кремниевые удобрения также усиливают морозоустойчивость лимонов [116] и жизнеспособность молодых сосен [117].

Механизмы воздействия Si на растения изучены крайне слабо. Существует мнение, что Si способен стимулировать естественные защитные реакции растений на различные стрессы, выполняя биологически активную роль в растениях [14, 118].

Таким образом, основной функцией Si в растении является повышение устойчивости к неблагоприятным условиям, выражающееся в утолщении эпидермальных тканей (механическая защита), ускорении роста и усилении активности корневой системы (физиологическая защита) и увеличении устойчивости к стрессам (биохимическая защита). Разнообразие испытываемых растений свидетельствует об универсальности данных механизмов как для Si-аккумулирующих, так и для Si-неаккумулирующих растений.

Наиболее отзывчивыми на кремниевые удобрения культурами являются различные злаковые [29, 42, 62, 104]. Картофель, томаты, кукуруза также нуждаются в повышенном кремниевом питании [69, 93, 104]. В ряде работ было показано, что даже растения с низким содержанием кремния, например огурцы, могут положительно реагировать на внесение кремниевых удобрений и мелиорантов [57, 110].

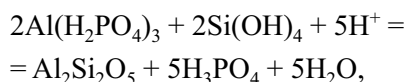
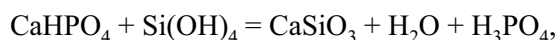
*Косвенное влияние кремниевых удобрений на растения. 1. Взаимодействие с фосфором.* В 1856 г. были заложены первые полевые эксперименты по использованию кремниевых удобрений на Ротамстедской сельскохозяйственной станции [10]. Эти, а в дальнейшем и многие другие опыты показали повышение содержания доступного для растений фосфора в почве при внесении кремниевых удобрений. Гипотеза о возможности реакции обмена силикат-иона на фосфат-ион при внесении кремниевых удобрений впервые была высказана в 1906 г. Hall и Morison.

В 30-е годы С.В. Литкевич провел комплексные исследования по изучению влияния кремнегеля на почву и растения [21, 148]. Добавление в бедную фосфором почву кремнегеля или легкорастворимых фосфатов приводило к увеличению содержания фосфора в растениях. Внесение труднорастворимых фосфатов не влияло на содержание фосфора в растениях, тогда как одновременное внесение труднорастворимых фосфатов и кремнегеля суще-

ственно увеличивало содержание фосфора в растениях.

Вегетационные и полевые испытания показали, что повышение концентрации монокремниевой кислоты в почве коррелирует с увеличением содержания водорастворимого фосфора в почве. Коэффициенты корреляции для различных почв составили от 0.67 до 0.81 [149, 150].

Было высказано несколько гипотез о механизмах влияния кремниевых соединений на фосфаты. Д.Л. Аскинази [23] развил идею о вытеснении анионом кремниевой кислоты фосфат-аниона из труднорастворимых фосфатов. Было установлено наличие прямой зависимости между концентрацией монокремниевой кислоты в почве и содержанием фосфора в растениях. Результаты фракционного анализа фосфора при внесении в почву монокремниевой кислоты показали, что происходит трансформация труднорастворимых фосфатов в более подвижные формы. Упрощенно реакция замещения фосфат-аниона силикат-анионом из труднорастворимых фосфатов кальция, железа и алюминия при повышении концентрации монокремниевой кислоты в почве может происходить согласно следующим уравнениям:



Была высказана гипотеза, что силикат-анион является конкурирующим по отношению к обмену фосфору. Увеличение концентрации монокремниевой кислоты в почвенном растворе приводит к нарушению соотношения адсорбированных фосфат- и силикат-ионов. Концентрация фосфат-ионов в почвенном растворе растёт и соответственно усиливается поглощение фосфора растениями [151, 152].

*2. Взаимодействие с азотом.* Растворимые формы кремния могут влиять на поступление нитратов в растения. Использование кремниевых удобрений на бедной нитратами почве приводило к увеличению в ней содержания  $\text{NO}_3^-$  [148]. При внесении кремнезема увеличивалась популяция аммонификаторов [153], что усиливало процесс нитрификации [154].

Азотные удобрения обычно снижают устойчивость сельскохозяйственных растений к внешним неблагоприятным условиям: болезням, насекомым-вредителям, экстремальным температурам и влажности [108]. Одной из причин является то, что при внесении нитратов происходит снижение поглоще-

ния Si растениями, что было установлено для ряда культур: сахарного тростника [155], риса [156, 157], пшеницы, ячменя [29], томатов и кукурузы [158]. Применение фосфорных удобрений совместно с азотными также приводило к снижению содержания кремния в растениях [159].

Улучшение кремниевого питания повышало устойчивость растений к неблагоприятным условиям [160, 161]. Было показано, что негативное влияние на растения высокой концентрации нитратов в почве можно уменьшить путем внесения кремниевых удобрений [162].

*2. Взаимодействие с другими питательными элементами.* Кремниевые соединения оптимизируют питание растений не только фосфором и азотом. Внесение кремнезема на рисовые чеки и в тепличные грунты увеличивало поступление кислорода в растения [90]. Обладая высокой адсорбционной способностью, кремниевые удобрения снижали подвижность и вымывание K и других питательных веществ из пахотного слоя [63]. В настоящее время на основе данного принципа разработаны некоторые медленно действующие удобрения [164, 165].

Внесение растворимых форм кремния повышало обеспеченность растений железом и марганцем [166].

Кремниевая кислота влияет на направленность минералогических трансформаций. Окисление железа (II) в отсутствие кремниевой кислоты ведет к образованию лепидоскрита. Наличие же кремниевой кислоты приводит к формированию хорошо окристаллизованного ферригидрида [167].

При взаимодействии растворимых кремниевых соединений с выветрелыми породами, представленными гетитами, происходит образование состоящих из кремнезема пленок и мостиков между почвенными частицами, способствующих оструктуренности почв и оптимизации их водно-воздушных свойств [168].

Степень и направленность влияния кремниевых удобрений на физические свойства почв зависит как от самих почв, так и от вносимых удобрений. Munk [169] сообщает об улучшении физических свойств почвы при дозе кремнезема 200–800 кг/га в год. Поликремниевые кислоты могут связывать почвенные частицы [170]. Улучшение структуры осуществляется за счет образования кремниевых мостиков между зернами ила [171]. При этом повышаются агрегированность, влагоемкость, емкость обмена и буферность легких почв. При совместном внесении кремниевых удобрений с оксидом кальция на песчаных почвах происходило скрепление

песчинок [172]. Этот процесс можно использовать при борьбе с ветровой эрозией и для закрепления песков.

*3. Взаимодействие кремния с органическим веществом почвы.* Не вызывает сомнения, что аморфный кремнезем повышает устойчивость гумусовых соединений [18, 173]. Рядом исследователей было доказано, что кремниевые соединения ускоряют гумификацию органических отходов промышленности, остатков растений, навоза, куриного помета [174]. При этом уменьшается агрессивность органического вещества по отношению к растениям, что дало возможность разработать эффективные кремнийорганические удобрения. По-видимому, кремниевая составляющая этих удобрений активизирует микробиологическую трансформацию органической части почвы.

*4. Взаимодействие кремния с алюминием.* Одно из важнейших свойств кремниевых соединений связано со способностью снижать токсичность алюминия – одного из основных факторов, лимитирующих урожай на кислых почвах [114, 116, 175]. Предполагают, что главной причиной алюминиевой токсикации является низкая величина pH почвенного раствора, определяющая высокую подвижность алюминия [4, 175]. Внесение физиологически кислых, а также калийных удобрений приводит к возниконовению или усилению алюминиевой токсикации [114].

Для уменьшения токсического действия алюминия обычно используют различные Са-содержащие препараты (известь, доломиты, мел), которые повышают pH почвенного раствора [4]. Однако иногда известкование, приводящее к раскислению почвы, не оказывает положительного действия на урожайность сельскохозяйственных культур. В то же время внесение в кислую (pH 5.5) тропическую почву кремниевых удобрений приводило к снижению в верхнем горизонте подвижного алюминия, хотя pH при этом не менялся [176].

Многочисленные лабораторные и полевые эксперименты показали возможность и эффективность использования кремниевых соединений для снижения алюминиевой токсикации [62, 177]. Применение цементной пыли [178], шлака электростанций [112], доменных шлаков [114, 116] было значительно эффективнее известкования.

Токсичное действие на растения Fe и Mn [179] также можно снизить путем внесения кремниевых удобрений. Установлено, что кремнийсодержащие отходы промышленности позволяют снизить поступление Fe, Mn в растения в 3–4 раза [14]. Механизмы, лежащие в основе данного явления, могут быть аналогичны тем, что обуславливают сниже-

ние алюминиевой токсикации кремниевыми соединениями.

Наибольший эффект при использовании кремниевых удобрений и мелиорантов проявляется на деградированных почвах или почвах, имеющих низкий уровень плодородия [99, 113, 116]. Это связано с тем, что оптимизация содержания растворимых форм кремния способствует повышению уровня плодородия почв посредством влияния на физические, физико-химические и биологические свойства почвы [71, 78, 99, 153]. Проведенные лабораторные и полевые исследования показали эффективность кремниевых удобрений и на таких почвах, как черноземы [100, 110].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщение данных по влиянию кремниевых удобрений на растения и плодородие почв позволяет сделать следующие выводы.

1. Кремниевые удобрения обеспечивают защиту растений на механическом, физиологическом и биохимическом уровнях.

2. Использование почв в сельском хозяйстве приводит к возникновению дефицита доступного растениям кремния и способствует деградации почвенного покрова.

3. Кремниевые удобрения оптимизируют фосфорное питание растений.

4. Кремниевые соединения можно применять в качестве известкового материала на кислых почвах.

5. Кремниевые удобрения способны оптимизировать физические свойства почв.

Анализ литературных данных показал, что изучением роли и функций кремния в почве и системе почва–растение занимаются более двухсот лет. При этом в XIX в. данному элементу уделяли намного больше внимания, чем в XX в. Торможение исследований кремния как важного биогеохимического элемента во многом связано с отсутствием в течение долгого времени хорошего метода определения растворимых форм кремния в почве и в растениях. Приемлемый для почвенных исследований метод появился только в середине XX в. Отставание в изучении кремния в системе почва–растение также обусловлено сложностью общей химии кремния, включающей процессы взаимодействия различных форм кремния между собой, которые стали изучать только в конце XX в. Отсутствие необходимых знаний затрудняло интерпретацию получаемых результатов. Все эти факторы привели к недостаточной изученности поведения такого элемента, как кремний, в природе и в системе почва–растение в частности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А.П.* Химический элементарный состав организмов моря. Ч. 1–3 // Тр. Биогеохим. лаборатории АН СССР. Л.-М., 1935. Вып. 3. С. 5–30.
2. *Iler R.K.* The Chemistry of Silica. N.Y.: John Wiley & Sons, 1979. 886 p.
3. *Баранов В.Ф.* Геохимия. М.: Недра, 1985. 340 с.
4. *Орлов Д.С.* Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 362 с.
5. *Оллиер К.* Выветривание. М.: Недра, 1990. 348 с.
6. *Варшалл Г.М., Драчева Л.В., Замокина Н.С.* О формах кремнекислоты и методах их определения в природных водах // Химический анализ морских осадков. М.: Наука, 1980. С. 156–188.
7. *Воронков М.Г., Зелчан Г.И., Лукевиц А.Ю.* Кремний и жизнь. Рига: Зинатне, 1978. 578 с.
8. *Davy H.* Elements of Agricultural Chemistry. London, 1813. 324 p.
9. *Либих Ю.* Химия в приложении к земледелию. СПб., 1864. 443 с.
10. Rothamsted Experimental Station Guide to the Classical Experiment. Watton, Norfolk: Rapide Printing, 1991. 31 p.
11. *Hall A.D., Morrison C.G.T.* On the function of silica in the nutrition of cereals // Proc. of the Royal Soc. of London. 1906. Ser. B. V. LXXVII. P. 455–477.
12. *Менделеев Д.И.* Основы химии. СПб.: Типография тов. “Общественная польза”, 1870. Вып. 3. 392 с.
13. *Germer B.* Some functions of silicic acid in cereals with special reference to resistance to mildew // Pflanzenemahr Dung Bodenkn. 1934. V. 35. P. 102–115.
14. *Ma J.F., Takahashi E.* Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. The Netherlands: Elsevier, 2002. 281 p.
15. *Zippicotte J., Zippicotte J.* Fertilizer. Pat. № 238240. 1881. USA.
16. *Maxwell W.* Lavas and soils of the Hawaiian Islands // The American Naturalist. 1898. V. 32. № 378. P. 537–539.
17. *Крылов А.* Подзол Могилевской губ. и происхождение его и растительных биолитов Эренберга вообще // Зап. Импер. минеролог. об-ва. 1873. Сер. 2. Ч. 8. С. 12–19.
18. *Гедройц К.К.* Почвенные коллоиды и поглотительная способность почв. Избр. соч. М., 1955. Т. 1. 560 с.
19. *Тюрин И.В.* О биологическом накоплении кремнекислоты в почвах // Проблемы советского почвоведения. 1937. Т. 3. С. 29–35.
20. *Birchall J.D., Exley C., Chappell J.S.* Acute toxicity of aluminium to fish eliminated in silicon-rich acid waters // Nature. 1989. V. 338. № 6211. P. 146.
21. *Литкевич С.В.* Влияние кремнекислоты на развитие растений. Сообщ. 2. По вопросам фосфатных и калийных удобрений и известкования. Л., 1936. С. 29–53.
22. *Аскинази Д.Л., Санникова Н.М.* Пути повышения на красномземе доступности растениям  $P_2O_5$  // Новое в удобрениях. М.: Сельхозгиз, 1937. С. 88–103.



23. Аскинази Д.Л. Фосфатный режим почвы и известкование почв с кислой реакцией. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. 216 с.
24. Вернадский В.И. Биосфера. Л.: Хим. техн. изд-во, 1926. 146 с.
25. Вернадский В.И. Биогеохимическая роль Al и Si в почвах // Докл. АН СССР. 1938. Т. 21. № 3. С. 127–130.
26. Башкин В.Н. Биогеохимия. М.: Научн. мир, 2004. 584 с.
27. Epstein E. Silicon // Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 1999. V. 50. P. 641–664.
28. Ковда В.А. Минеральный состав растений и почвообразование // Почвоведение. 1956. № 1. С. 6–38.
29. Климашевский Э.Л., Чернышева Н.Ф. Реакция различных сортов злаковых культур на уровень корневого питания и содержание в растениях кремния // Докл. ВАСХНИЛ. 1981. № 3. С. 5–7.
30. Deren C.W., Datnoff L.E., Snyder G.H. Variable silicon content of rice cultivars grown on everglades histosols // Plant Nutr. 1992. V. 15. № 11. P. 2363–2368.
31. Yoshida S. The physiology of silicon in rice // Bull. Food Fert. Tech. Centr. Taipei, Taiwan, 1975. № 4. P. 34–78.
32. Ma J.F., Tamai K., Yamaji N., Mitani M., Konishi S., Katsuhara M., Ishiguro M., Murata Y., Yano M. Silicon transporter in rice // Nature. 2006. V. 440. P. 688–691.
33. Hodson M.J., Sangster A.G. X-ray microanalysis of the seminal root of sorghum bicolor with particular reference to silicon // Annal. Bot. 1989. V. 64. № 6. P. 659–675.
34. Okuda A., Takahashi E. The role of silicon // The Mineral Nutrition of the Rice Plant. Baltimore: John Hopkins Press, 1965. P. 126–146.
35. Adatia M.H., Besford R.T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution // Annal. Bot. 1986. V. 58. P. 343–351.
36. Savant N.K., Korndorfer G.H., Datnoff L.E., Snyder G.H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review // J. Plant Nutr. 1999. V. 22. № 12. P. 1853–1903.
37. Кудинова Л.И. Влияние кремния на вес растений ячменя // Агрохимия. 1974. № 1. С. 142–144.
38. Алешин Н.Е. Содержание кремния в РНК риса // Докл. ВАСХНИЛ. 1982. № 6. С. 6–7.
39. Ефимова Г.В., Декучан С.А. Анатомо-морфологическое строение эпидермиса листьев риса и повышение его защитной функции под влиянием кремния // Сел.-хоз. биология. 1986. № 3. С. 57–61.
40. Aston M.J., Jones M.M. A study of the transpiration surfaces of *Avena sterilis* L. var. *algerian* leaves using monosilicic acid as a tracer for water movement // Planta. 1976. V. 130. № 2. P. 121–129.
41. Баба И. Сельское хозяйство за рубежом // Растениеводство. 1962. № 10. С. 22–31.
42. Алешин Н.Е. О биологической роли кремния у риса // Вестн. с.-х. науки. 1988. № 10. С. 77–85.
43. Алешин Н.Е., Авакян Э.Р., Лебедев Е.В. Стабилизация митохондрий риса кремнием // Докл. ВАСХНИЛ. 1990. № 2. С. 12–13.
44. Richter W., Suntheim L. Significance of silicon implant nutrition // Archiv fur Ackerund Pflanz. und Boden. 1986. V. 30. № 12. P. 737–744.
45. Воронков М.Г., Кузнецов И.Г. Удивительный элемент жизни. Иркутск: Вост.-Сиб. изд-во, 1983. 256 с.
46. Agarie S., Agata W., Kubota F., Kaufman P.B. Physiological roles of silicon in photosynthesis and dry matter production in rice plants // Japan J. Crop Sci. 1992. V. 61. P. 200–206.
47. Kwon T.O., Lee S.B., Lee J.H., Park K.H. The influence of low temperature at the boot stage on yield and nutrient uptake of rice with application of soil improves // Research Report of Rural Development Admin., Plant Environ., Micol. Farm Prod. Util., Korea Rep. 1989. V. 31. № 1. P. 14–23.
48. Базилевич Н.И., Родин Л.Е., Розов Н.Н. Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах // Ресурсы биосферы. 1975. Вып. 1. С. 5–33.
49. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
50. Aston S.R. Silicon Geochemistry and Biogeochemistry. N.Y.: Academic Press, 1985. 244 p.
51. Ma J.F. Studies on beneficial effects of silicon on rice plants. Ph. D. Thesis, Kyoto University, 1990. 178 p.
52. Ермолаев А.А. Кремний в сельском хозяйстве // Химия в сел. хоз-ве. 1987. Т. 25. № 6. С. 45–47.
53. Дьяков В.М., Матыченков В.В., Чернышев Е.А., Аммосова Я.М. Соединения кремния в сельском хозяйстве. М.: Минхимпром, 1990. 32 с.
54. Anderson D.L. Soil and leaf nutrient interactions following application of calcium silicate slag to sugarcane // Fert. Res. 1991. V. 30. P. 9–18.
55. Anderson D.L., Matichenkov V.V., Snyder G.H. Silicon in the soil and plant (Part II) // Sugar J. 1995. June. P. 8–10.
56. Бочарникова Е.А., Матыченков В.В. Влияние кремниевоего мелиоранта на цитрусовые // Агрохимия. 2007. № 10. С. 39–45.
57. Cherif M., Menzies J.G., Ehret D.L., Bogdanoff C., Belanger R.R. Yield of cucumber infected with *Pythium aphanidermatum* when grown with soluble silicon // Hort. Sci. 1994. V. 29. № 8. P. 896–897.
58. Datnoff L.E., Snyder G.H., Deren C.W. Influence of silicon fertilizer grades on blast and brown spot development and on rice yields // Plant Dis. 1992. V. 76. P. 1011–1013.
59. Datnoff L.E., Deren C.W., Snyder G.S. Silicon fertilization for disease management of rice in Florida // Crop Protec. 1997. V. 16. № 6. P. 525–531.
60. Fox R.L., Silva J.A., Younge O.R., Plucknett D.L., Sherman G.D. Soil and plant silicon and silicate response by sugar cane // Soil Sci. Soc. Amer. 1967. V. 31. P. 775–779.
61. Fox R.L., Silva J.A., Plucknett D.L., Teranishi D.Y. Soluble and total silicon in sugar cane // Plant and Soil. 1969. V. 30. № 1. P. 81–92.

62. Haak E., Siman G. Field experiments with Oyeslag (Faltlorsok med Oyeslag). Rep. 185. Uppsala, 1992. 29 p.
63. Khalid R.A., Silva I.A. Residual effects of calcium silicate in tropical soils: II Biological extraction of residual soil silicon // Soil Sci. Soc. Am. J. 1978. V. 42. № 1. P. 94–97.
64. Khalid R.A., Silva J.A. Residual effect of calcium silicate on pH, phosphorus, and aluminium in tropical soil profile // Soil Sci. Plant Nutr. 1980. V. 26. P. 87–98.
65. Ma I.F., Takahashi E. Effect of silicate on phosphate availability for rice in a P-deficient soil // Plant and Soil. 1991. V. 133. P. 151–155.
66. Menzies J.G., Ehret D.L., Glass A.D.M., Helmer T., Koch C., Seywerd F. Effects of soluble silicon on the parasitic fitness of *Sphaerotheca fuliginea* on *Cucumis sativus* // Phytopathol. 1991. V. 81. P. 84–88.
67. Savant N.K., Snyder G.H., Datnoff L.E. Silicon management and sustainable rice production // Advan. Agron. San Diego, USA: Acad. Press, 1997. V. 58. P. 151–199.
68. Snyder G.H., Matichenkov V.V., Datnoff L.E. Silicon // Handbook of Plant Nutrition. Massachusetts University Press, 2006. P. 551–568.
69. Wolly J.T. Sodium and silica as nutrients for the tomato plants // Plant Physiol. 1957. V. 32. № 4. P. 317–321.
70. Барсукова А.Г., Рочев В.А. Влияние кремнегельсодержащих удобрений на подвижность кремнекислоты в почве и доступность ее растениям. Контроль и регулирование содержания макро- и микроэлементов в почве и растениях на Среднем Урале // Тр. Свердл. СХИ. 1979. Т. 54. С. 84–88.
71. Матыченков В.В., Аммосова Я.М., Бочарникова Е.А. Влияние кремниевых удобрений на растения и почву // Агрехимия. 2002. № 2. С. 30–38.
72. Kang Y.S., Tang E.S., Nam M.H., Jung Y.T. Effect of cultural practices on reduction of flooding injury of rice // Res. Rep. Rural Develop. Admin., Rice, Korea Rep., 1988. V. 30. № 1. P. 77–82.
73. Ismunadji M. Utilization of cereal crop residues and its agricultural significance in Indonesia // Contr. Centr. Res. Inst. Agric. Bogor. Indonesia, 1978. V. 37. P. 1–14.
74. De Datta S.K. Principles and practices of rice production. N.Y.: John Wiley & Sons, 1981. 371 p.
75. Sawant A.S., Patit V.H., Savant N.K. Rice hull ash applied to seedbed reduces deadhearts in transported rice // Inter. Rice Res. 1994. Not. 19. P. 19–45.
76. Kubota M. Reasonable application of rice straw to wet and semiwet paddy fields with heavy clay soil in Niigata // J. Niigata Agr. Exp. Stat. Nagaoha, 1992. № 39. P. 1–90.
77. Semburg H., Raun N.R., Johnson G.V., Boman R.K. Effect of wheat straw inversion on soil water conservation // Soil Sci. 1995. V. 159. № 2. P. 81–89.
78. Нелудов С.Н. Влияние соломы на микробиологическую активность почвы и урожайность риса: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Алма-Ата, 1980. 25 с.
79. Amarasiri S.L., Wickramasingke K. Use of rice straw as a fertilizer material // Tropical Agricult. 1977. V. 133. P. 39–49.
80. Boe H.D., McAllister T.A., Kokko E.G., Leggett F.L., Yankee L.J., Jakober K.D., Ha J.K., Shin H.T., Cheng K.J. Effect of silica on colonization of rice straw by ruminal bacteria // Animal Feed Sci. Technol. 1997. V. 65. № 1–4. P. 165–182.
81. Ponamperyma F.N. Straw as a source of nutrients for wetland rice // Organic Matter and Rice. Philippines: Inter. Rice Res. Inst., 1984. P. 117–136.
82. Zhang Z. An analysis of effect of yield increase by returning wheat straw to the fields from soil betterment // Agric. Res. Arid Areas. 1991. № 1. P. 52–58.
83. Kumbhar C.T., Nevase A.G., Savant N.K. Rice hull ash applied to soil reduces leaf blast incidence // Inter. Rice Res. Newsl. 1995. Not. 20. P. 23–24.
84. Крупеников И.А. История почвоведения. М.: Наука, 1971. 328 с.
85. Ohno T., Erich M.S. Chemistry of wood ash amended soils // Am. Soc. Agron. Annu. Meet. Minneapolis, 1992. P. 51.
86. Мустафаев Ю.Х. Эффективность минеральных удобрений на фоне цеолита под озимым ячменем на эродированных горных серо-коричневых почвах юго-восточного склона Большого Кавказа: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Баку: Ин-т почвоведения и агрохимии, 1990. 23 с.
87. Цилу Б.К. Эффективность использования природных цеолитов при возделывании земляники с целью повышения ее продуктивности и снижения уровня загрязнения тяжелыми металлами: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: НИИ Нечерноземной полосы РАСХН, 1992. 26 с.
88. Владимиров В.Л., Кирилов М.П., Фантин В.М. Обмен веществ и продуктивные качества бычков при скормливании комбикормов с цеолитом // Докл. РАСХН. 1998. № 4. С. 38–40.
89. Просяникова О.И. Использование цеолита для очистки почв от пестицидов // Химия в сел. хоз-ве. 1994. № 5. С. 4–5.
90. Игнатьев Н.Н., Гречин П.И., Кобяков А.А. Влияние вулканических пород на поглощение кислорода тепличным грунтом и корнями огурца // Изв. ТСХА. 1994. Вып. 3. С. 92–99.
91. Takijima Y.H., Wijayaratna M.S., Soneviratne C.J. Nutrient deficiency and physiological disease of lowland rice in Ceylon. 3. Effect of silicate fertilizers and dolomite for increasing rice yield // Soil Sci. Plant Nutr. 1970. V. 16. P. 11–16.
92. Stenicka S., Narovec V. The effect of amphibolite rock meal from the stone mine at Marcovice village on selected physical and chemical properties of podzolic forest soils in the laboratory test // Zpravy Leshicheho Vyzkumu. 1994. № 3. P. 13–16.
93. Царев А.П., Коюда С.П., Чиженков В.Н. Влияние цеолитов на продуктивность // Кукуруза и сорго. 1995. № 4. С. 15–16.
94. Мотузова Г.В. Принципы и методы почвенного химического мониторинга. М.: Изд-во МГУ, 1988. 101 с.

95. Черепанов К.А., Черныш Г.И., Динельт В.М., Сухарев Ю.И. Утилизация вторичных материальных ресурсов в металлургии. М.: Металлургия, 1994. 224 с.
96. Сулейманов И.С. Отходы горно-рудной промышленности в качестве микроудобрений // Химия в сел. хоз-ве. 1988. № 11. С. 70–71.
97. Тавровская О.Л. Роль кремния в почвах и растениях // Химизация сел. хоз-ва. 1992. № 2. С. 103–106.
98. Дзикович К.А., Кожемяко З.В., Андреев В.И., Чиннова Л.Б. Агрохимическая оценка белитового шлама как химического мелиоранта кислых почв // Агрохимия. 1993. № 2. С. 73–80.
99. Матыченков В.В., Аммосова Я.М. Влияние аморфного кремнезема на некоторые свойства дерново-подзолистых почв // Почвоведение. 1994. № 7. С. 52–61.
100. Матыченков В.В., Бочарникова Е.А. Использование некоторых отходов металлургической промышленности для улучшения фосфорного питания и повышения засухоустойчивости растений // Агрохимия. 2003. № 5. С. 50–56.
101. Стюндюкова Э.Х., Джакишев Е.Г., Чабанов Н.С., Щербаков В.Д. Фосфошлак на полях Казахстана // Химия в сел. хоз-ве. 1993. № 3–4. С. 13–14.
102. Takahashi K., Nonaka K. Available silicates in paddy soils. Part 2. Development of method of measuring available silicates and its application to soil silicate analysis // Bull. Shikoku Agric. Exp. Station. 1986. № 47. P. 16–39.
103. Матыченков В.В., Абишева З.С., Бектурганов Н.С., Бочарникова Е.А. Кремниевые удобрения на основе отходов металлургических и химических промышленных предприятий // ДАН Республики Казахстан. 2006. № 2. С. 27–31.
104. Васильева М.В. Отзывчивость растений ячменя и кукурузы на удобрение кремнием // Проблемы повышения плодородия почв в условиях интенсивного земледелия. Тез. докл. Всесоюз. научн. конф. М., 1988. С. 38–39.
105. Рочев В.А. Влияние кремниевых удобрений на плодородие почв // Плодородие и рациональное использование почв Нечерноземья. Пермь: Изд-во Пермского СХИ, 1988. С. 111–118.
106. Suntheim R.W.L. Significance of silicon in plant nutrition // Archiv fuer. Acherund Pflanzum und Boden. 1986. V. 30. № 12. P. 737–744.
107. Алешин Н.Е., Авакян Э.Р. Накопление кремнезема в различных частях зерновки риса // Изв. вузов СССР. Пищ. технология. 1985. № 2. С. 12–14.
108. Алешин Н.Е., Авакян Э.Р., Дюкунчак С.А., Алешин Е.П., Барушок В.П., Воронков М.Г. Роль кремния в защите риса от болезней // Докл. АН СССР. 1987. Т. 291. № 2. С. 217–219.
109. Ключковский В.М., Владимиров А.В. Применение силикатов в земледелии // Химизация соц. земледелия. 1934. № 7. С. 55.
110. Куликова А.Х., Яшин Е.А., Данилова Е.В., Юдина И.А., Доронина О.С., Никифорова С.А. Влияние диатомита и минеральных удобрений на урожайность и качество корнеплодов сахарной свеклы // Агрохимия. 2007. № 6. С. 27–31.
111. Ande B., Ande P., Bocharnikova E.A., Calvert D.V., Matichenkov V.V. Effect of Si-rich slag and lime on P leaching in sandy soil // J. Amer. Soc. Sugarcane Technol. 2002. V. 22. P. 9–15.
112. Ayres A.S. Calcium silicate slag as a growth stimulator for sugarcane on low silicon soils // Soil Sci. 1966. V. 101. № 3. P. 216–227.
113. Кюева Б.К., Ермолаев А.А. Кремний, почва, урожай. Орджоникидзе: Изд-во Горского СХИ, 1990. 107 с.
114. Тарановская В.Г. Силикатирование субтропических питомников и плантаций // Сов. субтропики. 1939. № 7. С. 32–37.
115. Бочарникова Е.А., Матыченков В.В. Влияние кремниевое мелиоранта на цитрусовые // Агрохимия. 2007. № 10. С. 39–46.
116. Тарановская В.Г. Значение силикатирования для цитрусовых, тунга и сидератов // Сов. субтропики. 1940. № 5. С. 38–43.
117. Emadian S.F., Newton R.J. Growth enhancement of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings by silicon // Plant Physiol. 1989. V. 134. № 1. P. 98–103.
118. Belanger R.R. The role silicon in plant-pathogen interaction: toward universal model // III Silicon in Agriculture Conference / Ed. Korndorfer G.H. Umlandia: Universodade Federal de Uberlandia, 2005. P. 34–40.
119. Djamin A.S., Pathak M.D. Role of silica in resistance to asiatic rice borer, *Chilo suppressalis* (Walker), in rice // Econ. Entomol. 1967. V. 60. P. 347–351.
120. Maxwell F.G., Jenkns J.N., Parrott W.L. Resistance of plants to insects // Advan. Agron. 1972. V. 24. P. 187–265.
121. Salim M., Saxena R.C. Iron, silica, and aluminum stresses and varietal resistance in rice: Effects on whitebacked Planthopper // J. Agron. Crop Sci. 1992. V. 32. P. 212–219.
122. Tanaka A., Park Y.D. Significance of the absorption and distribution of silica in the rice plant // Soil Sci. 1966. V. 12. P. 191–195.
123. Wadham M.D., Parry P.W. The silicon content of *Oryza sativa* L. and its effect on the grazing behavior of *Agriolimax reticulatus* Muller // Ann. Bot. 1981. V. 48. P. 399–402.
124. Ukwungwu M.N. Effect of silica content of rice plants on damage caused by the larvae of *Chilo zacconius* (Lepidoptera: Pyralidae) // WARDA Tech. Newslett. 1984. № 5. P. 20–21.
125. Jiang D., Zeyen R.J., Russo V. Silicon enhances resistance of barley to powdery mildew (*Erysiphe graminis* f. sp. *hordei*) // Phytopathol. 1989. V. 79. P. 1198.
126. Moore D. The role of silica in protecting Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) from attack by dipterous stem-boring larva (*Oscinella fruit* and other related species) // Ann. Appl. Biol. 1984. V. 104. № 1. P. 161–166.
127. Sang-Young N., Kyong M.K., Sang C.L., Jong C.P. Effects of lime and silica fertilizer application on grape

- cracking // J. Agric. Sci. Soil Fertil. 1996. V. 38. № 1. P. 410–415.
128. Carver T.L.W., Zeyen R.J., Ahlstrand G.G. The relation between insoluble silicon and success or failure of attempted penetration by powdery mildew (*Erysiphe graminis*) germplings on barley // Physiol. Plant Pathol. 1987. V. 31. P. 133–148.
129. Leusch H.J., Buchenaner H. Effect of soil treatments with silica-rich lime fertilizers and sodium triticale on the incidence of wheat by *Erysiphe graminis* and *Septoria nodorum* depending on the form of N-fertilizer // J. Plant Dis. Protection. 1989. V. 96. P. 154–172.
130. Cherif M., Asselin A., Belanger R.R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. // Phytopathol. 1994. V. 84. P. 236–242.
131. Cherif M., Belanger R.R. Use of potassium silicate amendments in recirculating nutrients solution to suppress *Pythium ultimum* on long English cucumber // Plant Dis. 1992. V. 76. P. 1008–1011.
132. O'Neill T.M. Investigation of glasshouse structure, growing medium and silicon nutrition as factors affecting disease incidence in cucumber crops // Med. Fac. Landba Rijksuniv Gent. 1991. V. 56. P. 359–367.
133. Belanger R.R., Bowen P.A., Ehret D.L., Menzies J.G. Soluble silicon: its role in crop and disease management of greenhouse crops // Plant Dis. 1995. V. 79. № 4. P. 329–336.
134. Grundnofer H. Eifluss von silikataufnahme und –einlagerung auf den befall der rebe mit echtem mehltau // Diss. 1994. V. 114. № 7. P. 102–114.
135. Bowen P., Menzies J., Ehret D., Samuel L., Glass A.D.M. Soluble silicon sprays inhibit powdery mildew development on grape leaves // J. Am. Soc. Hort. Sci. 1992. V. 117. № 6. P. 906–912.
136. Volk R.J. Silicon content of the rice plant as a factor influencing its resistance to infection by the blast fungus *Piricularia oryzae* // Phytopathol. 1958. V. 48. P. 179–184.
137. Hegazi M.F., Harfoush D.I., Mostafa M.H., Ibrahim I.K. Changes in some metabolites and oxidative enzymes associated with brown leaf spot of rice // Ann. Agric. Sci. 1993. V. 38. № 1. P. 291–299.
138. Yamaguchi M., Winslow M.D. Effect of silica and magnesium on yield of upland rice in humid tropics // Plant Soil. 1987. V. 113. № 2. P. 265–269.
139. Datnoff L.E., Raid R.N., Snyder G.H., Jones D.B. Effect of calcium silicate slag on blast and brown spot intensities and yields of rice // Plant Dis. 1991. V. 75. P. 729–732.
140. Lee T.S., Hsu L.S., Wang C.C., Jeng Y.H. Amelioration of soil fertility for reducing brown spot incidence in the paddy fields of Taiwan // J. Agric. Res. China, 1981. V. 30. P. 35–49.
141. Winslow M.D. Silicon, disease resistance and yield of rice genotypes under upland cultural conditions // Crop. Sci. 1992. V. 32. P. 1208–1213.
142. Elawad S.H., Green V.E. Silicon and the rice plant environment: A review of recent research. Revista IL Riso, 1979. V. 28. P. 235–253.
143. Datnoff L.E., Raid R.N., Snyder G.H., Jones D.B. Evaluation of calcium silicate slag and nitrogen on brown spot, neck, and sheath blight development on rice // Biol. Cult. Tests Contr. Plant Diseases. 1990. № 5. P. 65.
144. Mathai G., Paily P.V., Menon M.R. Effect of fungicides and silica in the control of sheath blight disease of rice caused by *Corticumsaskii* (Shirai) // Agr. Res. J. Kerala. 1978. V. 19. № 1. P. 79–83.
145. Malvick D.K., Percich J.A. Hydroponic culture of wild rice (*Zizania palustris* L.) and its application to studies of silicon nutrition and fungal brown spot disease // Canad. J. Plant Sci. 1993. V. 73. № 4. P. 969–975.
146. Dean J.L., Todd E.H. Sugarcane rust in Florida // Sugar J. 1979. V. 42. P. 10.
147. Raid R.N., Anderson D.L., Ulloa M.F. Influence of cultivar and soil amendment with calcium silicate slag on foliar disease development and yield of sugarcane // Florida Agricult. Exp. Stat. J. 1991. Ser. N R-01689. P. 15.
148. Луткевич С.В. Влияние кремнекислоты на развитие растений // Тр. ЛОБИУАА. 1935. Вып. 39. С. 41–69.
149. Гладкова К.Ф. Роль кремния в фосфатном питании растений // Агрохимия. 1982. № 2. С. 133–144.
150. O'Reilly S.E., Sims J.T. Phosphorus adsorption and desorption in a sandy soil amended with high rates of coal fly ash // Com. Soil Sci. Plant Anal. 1995. V. 26. № 17–18. P. 2983–2993.
151. Вольвач Ф.В., Третенник В.Ю., Тельбиз Г.И., Чуйко Н.Ф. Взаимодействие в системе метасиликат Na-кислые фосфаты по данным ИК-спектроскопии // Докл. АН УССР. 1987. Сер. Биол. № 6. С. 60–62.
152. Olivera M.G., Brada J.M., Jeles F.F. Silica and phosphorus reciprocal adsorption and discation in two latosols from the Friangilo Mineiro area Brazil // Revista Ceres. 1986. V. 33. № 189. P. 441–448.
153. Кинтаналья М.Г.Ф. Влияние разового внесения кремнийсодержащего шлама на свойства темнокаштановых почв под рисом на юге Украины: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: М.: РУДН, 1987. 17 с.
154. Рочев В.А., Швейкина Р.В., Барсукова Г.А., Попова Н.Н. Влияние кремнегеля на агрохимические свойства почвы и урожай сельскохозяйственных культур // Питание растений и программирование сельскохозяйственных культур. Тр. Свердл. СХИ. Пермь, 1980. Т. 60. С. 61–68.
155. Bowen P., Menzies J., Ehret D., Samuel L., Glass A.D.M. Soluble silicon sprays inhibit powdery mildew development on grape leaves // J. Am. Soc. Hort. Sci. 1992. V. 117. № 6. P. 906–912.
156. Алешин Н.Е., Авакян Э.Р. К вопросу о кремниевом обмене риса // Бюл. НТИ ВНИИ риса. Краснодар, 1978. Вып. 26. С. 16–20.
157. Akimoto S. Varietal differences of the adsorption of silicic acid and nitrogen in relation to the resistance to blast in rice plants // Agri. Hort. 1939. V. 14. P. 2179–2210.

158. Wallace A. Relationships among nitrogen, silicon, and heavy metal uptake // *Soil Sci.* 1989. V. 147. № 6. P. 457–460.
159. Wallace A., Romney E.M., Mueller R.T. Nitrogen-silicon interaction in plants grown in desert soil with nitrogen deficiency // *Agronomy.* 1976. V. 68. № 3. P. 529–530.
160. Потамуева Ю.А. О биологической роли кремния // *Агрохимия.* 1968. № 9. С. 111–116.
161. Werner D., Roth R. Silicon metabolism // *Inorganic plant nutrition* / Eds. Lauch A., Bielsky R.L., N.Y.: Springer-Verlag, 1983. V. 15 b. P. 682–694.
162. Mitsui N., Takaton H. Nutritional study of silicon in graminaceous crops // *Soil Sci. Plant Nutr.* 1963. V. 9. № 9. P. 76–85.
163. Tokunaga Y. Potassium silicate: A slow release potassium fertilizer // *Fert. Res.* 1991. V. 30. P. 55–59.
164. Комиссаров И.Д., Панфилова Л.А. Способ получения медленно действующих удобрений. Пат. № 1353767. Б.И. Бюл. 4. 15.05.84. 1987.
165. Volker H., Nudling W., Adam K. Verfahren zur herstellung eines mehrnahrstoffduners // Fels-Werke Peine-Salzgitter GmbH, Pat. № 3538411.5 Germany, Patent pending 29.10.1985.
166. Verma T.S., Minhas R.S. Effect of iron and manganese interaction on paddy yield and iron and manganese nutrition in silicon-treated and untreated soils // *Soil Sci.* 1989. V. 147. № 2. P. 107–115.
167. Мохамед Абу Вали. Значение кремния и железа в слитогенезе почв // *Вест. МГУ. Сер. 17.* 1987. № 1. С. 72–75.
168. Marsan F.A., Torrent J. Fragipan bonding by silica and iron oxides in a soil from northwestern Italy // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 1989. V. 53. № 4. P. 1140–1145.
169. Munk H. Zur bedeutung silikatisher stoffe bei der ousung landwirtschaftlecker rulturpflanzen // *Land-wirt Forsch.* 1982. V. 34. Sonder 38. P. 264–277.
170. Швейкина Р.В. Влияние кремнегельсодержащих удобрений на обменную адсорбцию катионов // *Свойства почв и рациональное использование удобрений.* Пермь, 1986. С. 54–56.
171. Norton L.D., Hall G.E., Smeck N.E., Bigham J.M. Fraginap bonding in a late-Wisconsinian loss-derived soil in East-Central Ohio // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1984. V. 48. № 6. P. 1360–1366.
172. Mays D.A., Anaele A. Wood ash utilization of fine turf liming and fertilization // *Am. Soc. Agron. Annu. Meet. Cincinnati,* 1993. P. 342.
173. Фотиев В.А. К природе водного гумуса // *Докл. АН СССР.* 1971. Т. 1199. № 1. С. 198–201.
174. Telysheva G., Shulga G. Silicon-containing polycomplexes for protection against wind erosion of sandy soil // *J. Agric. Engin. Res.* 1995. V. 62. № 4. P. 221–228.
175. Foy C.D. Soil chemical factors limiting plant root growth // *Adv. Soil Sci.* 1992. V. 19. P. 97–149.
176. Khalid R.A., Silva J.A., Fox R.L. Residual effects of calcium silicate in tropical soils: I Fate of applied silicon during five years cropping // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1978. V. 42. № 1. P. 89–94.
177. Myhr K., Erstad K. Converter slag as a liming material on organic soils // *Norwegian J. Agric. Sci.* 1996. V. 10. № 1. P. 81–93.
178. Lafond J., Simard R.R. Short-term change in chemical properties by amendment with cement kiln dust // *Canad. J. Soil Sci.* 1994. V. 74. № 3. P. 360–367.
179. Rozeff N. Silicon – the beach warmer or unheralded star? // *Sugar J.* 1992. V. 54. № 8. P. 20.

## Silicon Fertilizers and Ameliorants: the History of Study and the Theory and Practice of Application

E.A. Bocharnikova<sup>1</sup>, V.V. Matychenkov<sup>2</sup>, I.V. Matychenkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya 2, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia, E-mail: mswk@rambler.ru*

<sup>2</sup>*Institute Basic Biological Problems, Russian Academy of Sciences, Institutskaya ul. 2, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia*

<sup>3</sup>*Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

Data on the study of the effect of silicon fertilizers and ameliorants on plants and soil were generalized. The history of this issue was outlined. Silicon compounds directly affect the yield of agricultural crops by increasing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses and increase the fertility of soils by optimizing the phosphate status, decreasing the toxicity of aluminum and heavy metals, and improving the physical properties of soils. Different kinds of silicon fertilizers and ameliorants were characterized.

*Key words: silicon fertilizers, silicon ameliorants, theory and practice of application.*