

УДК: 631.811.93

КРЕМНИЕВЫЕ ПРЕПАРАТЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ¹

© 2023 г. Е. А. Бочарникова^{1,2,*}, В. В. Матыченков^{1,2}, И. В. Матыченков³

¹Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
ул. Институт, влад. 5, р.п. Большие Вяземы, Одинцовский р-н, Московская обл. 143050, Россия

³ООО “СтройПартнер”
109542 Москва, просп. Рязанский, 86/1, стр. 3, Россия

*E-mail: msvk@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Показана более чем 200-летняя история изучения роли и функций кремния в системе почва–растение. Приведены основные направления исследований, посвященных кремнию, включая изучение влияния кремниевых препаратов на подвижность тяжелых металлов и на устойчивость растений к климатическим изменениям. Обобщены кремнийопосредованные механизмы детоксикации загрязненных кадмием почв и снижения аккумуляции кадмия растениями. Выделены 3 группы кремниевых агрохимикатов: кремнийсодержащие почвенные мелиоранты, кремниевые удобрения и биостимуляторы. Описаны принципы воздействия этих групп агрохимикатов на систему почва–растение.

Ключевые слова: кремнийсодержащие почвенные мелиоранты, кремниевые удобрения, кремниевые биостимуляторы.

DOI: 10.31857/S0002188123120049, **EDN:** SWVICB

ВВЕДЕНИЕ

Зола растений является самым первым минеральным удобрением, применяемым человеком и по своему химическому составу и воздействию является кремниевым препаратом. Древние земледельцы, расчищая землю, сжигали лес и золу смешивали с почвой. В древнеримском государстве золу растений использовали для повышения плодородия истощенных земель. Об этом писал в своих трудах Вергилий: “Лишь бы ты почву сырым удобрил щедро навозом или нечистой золой утомленное поле посыпал” [1].

Более 2000 лет назад китайцы удобряли почву золой рисовой соломы, для которой характерно высокое содержание SiO₂, называя ее “огненным навозом” [2]. Специальный указ императора обязывал китайских земледельцев оставлять часть рисовой соломы в почве. В настоящее время китайские фермеры продолжают пользоваться агро-

химическими приемами, включающими применение рисовой соломы и золы.

Применение кремниевых препаратов в сельском хозяйстве имеет более чем 150-летнюю историю, а исследования роли этого элемента в развитии растений были начаты более 200 лет назад. Еще в конце 18 века ученые (французский химик Л. Воклен, немецкий географ и натуралист А. Гумбольдт, британский химик и агрохимик Г. Дэви) указали на присутствие кремния в растениях. В 1814 г. Г. Дэви написал о кремнии как об элементе питания растений [3]. Он первым начал изучение форм кремния в растениях и предположил, что кремний, аккумулированный в эпидермальных тканях, обеспечивает механическую защиту растения от болезней и атак насекомых. Впоследствии на основании данных об элементном составе растений Ю. фон Либих пришел к выводу о потенциальной важности кремниевых удобрений [4]. Он впервые в тепличном эксперименте исследовал влияние силиката натрия на растения сахарной свеклы. Помимо увеличения урожайности, Ю. Либих отметил повышенное со-

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103-6.

держание сахара в свекле. Работы Либиха послужили толчком для проведения полевых испытаний силиката натрия в качестве кремниевого удобрения. В 1856 J.B. Lawes организовал микрополевой эксперимент “Grass Park” на Ротамстедской опытной станции в Англии [5]. Данный эксперимент продолжается до сих пор, его результаты свидетельствуют о положительном влиянии силиката натрия на продуктивность трав [6]. Эти работы послужили началом исследований влияния кремниевых препаратов на фосфатное состояние почв [5].

В 1870 г. великий русский химик Д.И. Менделеев предложил использовать аморфный диоксид кремния в качестве удобрения, основываясь на его высокой растворимости [7]. В 1881 г. американская фирма “Zippicottes” впервые запатентовала применение силиката кальцийсодержащего отхода в качестве удобрения [8]. В 1898 г. профессор W. Maxwell, изучая почвенный покров Гавайских островов в поиске участков для выращивания сахарного тростника, впервые проанализировал почву на содержание доступного для растений кремния [9].

Среди первых работ, посвященных роли кремния, в физиологии растений следует отметить работы французских и немецких ученых: Pierre (1866 г.), Jodin (1883 г.), Kreuzhage и Wilf (1884 г.); Sommer, 1926 г.) [10, 11]. A. Grob (1896 г.) исследовал формы и структуру кремния в растительных клетках. Полученные им результаты подкрепили гипотезу Г. Дэви об усилении прочности эпидермальных тканей и участии Si в механической защите растений от насекомых и болезней [12].

В 1915–1917 гг. японский ученый I. Onodera после работы в Кенигсбергском и Кембриджском университетах инициировал изучение кремневых удобрений в Японии [13]. Его работы послужили началом исследования роли кремния в растениях риса. В дальнейшем организованные единой программой многочисленные эксперименты подтвердили эффективность внесения кремневых удобрений под рис [14–16]. В 1955 г. Министерство сельского хозяйства, лесоводства и рыболовства Японии официально рекомендовало внесение силиката кальция под культуру риса [17]. Среди основных причин, обусловивших решение министерства, были следующие: рис — основная сельскохозяйственная культура Японии — характеризуется высокой аккумуляцией кремния; в Японии распространена интенсивная система выращивания риса, включающая применение высоких доз азотных удобрений, что приводит к снижению устойчивости растений к болезням и насекомым-вредителям; рисовые

почвы обычно обеднены биодоступным кремнием; в качестве источника кремния можно использовать дешевые шлаки (силикат кальция), являющиеся отходами металлургической промышленности; практикуемое восполнение дефицита биодоступного кремния путем внесения рисовой соломы ограничено в основном из-за недостатка рабочей силы.

В США в первой четверти XX века возник интерес к кремниевым почвенным мелиорантам как альтернативе извести на кислых почвах. В качестве кремневых мелиорантов было предложено использовать отходы металлургической промышленности и золу [18, 19]. В 1936 г. A.S. Auges организовал первые полевые испытания силиката кальция в качестве удобрения на латеритных почвах Гавайских островов [20]. В дальнейшем его исследования были продолжены во Флориде, где в настоящее время кремниевые удобрения успешно применяют при выращивании риса, сахарного тростника и газонной травы [21, 22].

В начале XX века в России кремний как биофильный элемент привлек внимание почвоведов И.В. Тюрина, К. Гедройца, А.Н. Сабанина, А. Крылова [2, 23]. Темой магистерской работы А.Н. Сабанина была “О кремнеземе в зерне проса: (*Panicum miliaceum* L.)” (1901 г.) [24]. Повышенный интерес вызывали вопросы взаимовлияния соединений Si, P и Al [25]. В 1930-е годы в СССР проблемой взаимодействия фосфора и кремния занимались такие ученые как А.И. Литкевич и К.Л. Аскинази [26, 27].

Исключительного внимания заслуживают труды В.И. Вернадского, который отнес кремний к циклическим химическим элементам, подверженным постоянным изменениям и превращениям [28]. Исследование биогеохимического круговорота Si в биосфере было продолжено А.П. Виногорадовым [29].

Во второй половине XX века исследования роли и функций кремния были продолжены в СССР, США и Западной Европе. В то время основное внимание уделяли изучению теоретических аспектов функций кремния в системе почва—растение. Неоспоримым лидером в этом научном направлении являлся СССР. Миграцию кремния в грунтах и почвах изучали И.И. Плюснина (1980 г.), А.Г. Назаров (1976 г.), Я.М. Аммосова и В.Е. Приходько (1979 г.) [30–33]. Среди присутствующих в природных водах подвижных кремниевых соединений были выделены мономерные и димерные кремниевые кислоты, поликремниевые кислоты, кремнийорганические формы кремниевой кислоты [34]. Анализируя

многочисленные работы о накоплении кремнезема, В.А. Ковда пришел к выводу, что процесс миграции и аккумуляции соединений кремния в почвах — явление универсальное [35]. Несмотря на развитие фундаментальных знаний в нашей стране, в практике сельского хозяйства кремниевые соединения, в том числе шлаки металлургических комбинатов, более широкое применение нашли для улучшения почвенного плодородия (Япония) и для мелиорации кислых почв (Западная Европа).

Невозможно не упомянуть Р. Айлера, великого химика, опубликовавшего в 1979 г. классический труд “Химия кремнезема” [36]. Его работа до сих пор является основной для понимания физико-химической активности аморфного тонкодисперсного кремнезема. Другим выдающимся ученым в области кремнийорганической химии является академик М.Г. Воронков, создавший первый в мире биологически активный кремнийорганический препарат Мивал и обосновавший возможность замещения части фосфора в молекулах ДНК и РНК на атомы кремния [37, 38]. М.Г. Воронков совместно с Г.И. Зелчан и А.Ю. Лукевиц написал книгу “Кремний и жизнь”, где перечень литературы, посвященной роли кремния в жизни растений, животных, микроорганизмов и человека, насчитывает более 4000 наименований [39]. В это же время работали такие исследователи кремния, как Е.М. Карлиле, показавший высокую эффективность кремниевых препаратов для животных [40], и английский профессор Д. Бирчалл, изучавший влияние активных форм кремния на здоровье людей. За свои работы в данной области Д. Бирчалл удостоился звания рыцаря от королевы Великобритании Елизаветы Второй [41].

По-видимому, вершиной исследования роли кремния в живых организмах стал специальный нобелевский симпозиум, посвященный кремнию [42]. Многие статьи из сборника симпозиума до сих пор являются актуальными и непревзойденными.

Развитие химии и дешевизна агрохимикатов в конце XX и начале XXI века сильно затормозили исследование и практическое применение кремнийсодержащих препаратов. Во многом это было связано с незрелостью экологического мировоззрения. Например, на западе почву рассматривали исключительно как субстрат для выращивания сельскохозяйственных растений, очень часто игнорируя понятие о плодородии почв и его значение. Пестициды и гербициды преподносили как достижения, не имеющие альтернатив, при этом экологически чистые способы повышения

устойчивости растений к различным стресс-факторам расценивали как умышленную диверсию по отношению к успехам тогдашней химии. В результате финансирование работ по изучению кремниевых соединений в системе почва—растение резко сократилось.

В 1999 г. группа энтузиастов, занимавшихся исследованием кремния в сельском хозяйстве, организовала первую международную конференцию “Si in Agriculture”, которая прошла в городе Форт-Лодердейл (штат Флорида, США) [43]. Было принято решение о создании научного сообщества для координации исследований в данной области и о поддержке бизнеса, включая разработку стандартов и помощь в сертификации кремниевых препаратов для сельского хозяйства. С этого времени международные конференции “Si in Agriculture” проходили раз в 3 года: в Японии (2002 г.), Бразилии (2005 г.), Южной Африке (2008 г.), Пекине (2011 г.), Стокгольме (2014 г.), Индии (2017 г.) и США (2022 г.). Было предложено при изучении кремнийсодержащих соединений в вегетационных экспериментах симулировать какой-либо стресс, т.к. действие кремния на растения наиболее значимо при неблагоприятных условиях роста [44]. Были найдены участки генов, отвечающих за активный транспорт кремния в растениях [45]. Впервые были представлены теоретические и практические основы использования кремниевых соединений в качестве биостимуляторов [46]. Однако до сих пор остаются нерешенными такие проблемы, как унификация методов исследования кремниевых соединений в системе почва—растение и сертификация агрохимикатов на основе кремния. Исключением может служить Индия, где кремний классифицирован в качестве важнейшего питательного элемента, регламентировано ценообразование, качество и количество кремнийсодержащих продуктов [47].

В первом десятилетии XXI века остро встала проблема загрязнения сельскохозяйственных угодий тяжелыми металлами в результате неконтролируемого внесения удобрений, в частности, фосфорных. Особое внимание было уделено кадмию — элементу с небольшим токсическим действием на растения, но сильным токсическим действием на человека. Было установлено, что практически все сельскохозяйственные почвы Западной Европы, обеих Америк, Азии (кроме России и среднеазиатских республик) и Австралии загрязнены кадмием. Были выделены огромные суммы на решение этой проблемы, особенно в Китае. В результате была выявлена эффективность кремниевых соединений для детоксикации

кадмия и других тяжелых металлов и мышьяка в почве и предотвращения их аккумуляции в плодах растений [48]. Интенсивные исследования в этой области позволили выявить ряд не известных ранее кремний-индуцированных механизмов. В настоящее время число работ, посвященных взаимодействию кремния и кадмия, неуклонно растет. Результаты исследований были обобщены в ряде обзоров, в которых описаны прямые и опосредованные механизмы действия различных форм кремния на подвижность и транспорт кадмия в системе почва—растение [49].

В почве были выявлены следующие механизмы: адсорбция соединений кадмия кремнийсодержащими препаратами [48]; усиление сорбционной способности почв посредством изменения поверхностных свойств почвенных частиц под действием монокремниевой кислоты [50]; направленность взаимодействия кадмия и монокремниевой кислоты в почвенном растворе определяется концентрацией последней. Низкие концентрации монокремниевой кислоты (5–20 мг/кг Si) способны увеличивать подвижность кадмия в почве. Высокие концентрации монокремниевой кислоты (50 мг/кг Si и выше) обеспечивают иммобилизацию кадмия [50, 51]; некоторые кремниевые соединения увеличивают показатель pH почвы, тем самым снижая подвижность кадмия [52].

Для растений были определены следующие кремний-индуцированные механизмы: аккумуляция и осаждение (нейтрализация) кадмия в корнях [53]; снижение транспорта кадмия по симпласту и апопласту растений [54, 55]; усиление синтеза ферментов-антиоксидантов, снижающих негативное воздействие кадмия [56, 57]; образование защитного барьера путем суберинизации клеточных стенок корней [58]; ослабление токсического действия кадмия благодаря усилению стабильности генов [59]; соосаждение кадмия и кремния в растительных тканях [60]; связывание кадмия в клеточных стенках [61]; усиление синтеза и стабильности фотосинтетических пигментов [62]; сорбция и капсулирование органических и неорганических молекул, включая кадмий, полимерами кремниевой кислоты [55].

В ряде исследований отмечено усиление положительного влияния кремниевых соединений при совместном внесении с другими веществами. Например, была показана высокая эффективность совместного применения кремниевых удобрений и извести для снижения аккумуляции растениями кадмия [63, 64]. Синергетический эффект извести и кремнийсодержащих препаратов обусловлен снижением подвижности металла

в почве в результате повышения pH под действием Са и снижением поглощения и транспорта кадмия в растении под действием кремния.

Одной из причин растущего в настоящее время интереса к кремнию являются изменяющиеся условия климата, приведшие к учащению засух и нехватке поливной воды [65]. Сотни исследований, проведенных за последние 2 десятилетия, позволили выявить участие Si в обеспечении защиты сельскохозяйственных культур в условиях стресса посредством: образования двойного Si-эпидермального слоя, препятствующего атакам насекомых-вредителей и развитию грибковых заболеваний [45]; развитию корневой системы и увеличение количества пигментов [17, 43]; нейтрализация токсичных соединений в тканях растений благодаря воздействию монокремниевой кислоты [51, 55]; оптимизации миграции и транспорта микро- и макроэлементов [66]; снижения уровня вызванных стресс-фактором окислительных деструктивных процессов путем активации синтеза стресс-ферментов, включая аскорбатпероксидазу, глутатионредуктазу, гваяколпероксидазу и др. [56].

Наши расчеты показали, что сейчас в мире ежегодно вносят ≈ 4.5 млн т кремниевых агрохимикатов. В настоящее время можно выделить 3 группы кремниевых препаратов, используемых в сельском хозяйстве, которые отличаются нормами внесения и принципом воздействия на почву и растения.

Кремниевые почвенные мелиоранты. Их действие в основном направлено на улучшение свойств почвы, таких как pH, структура, сорбционная способность и других. Обычно дозы внесения составляют 500 кг/га и больше. Благодаря высоким дозам данные препараты отчасти обеспечивают питание растений кремнием. К ним относятся силикат кальция (в основном промышленные отходы), цеолиты, диатомиты, перлиты, вермикулиты и другие [67, 68]. Среди используемых в сельском хозяйстве кремниевых мелиорантов преобладают промышленные отходы (<http://www.slg.jp/e/slag/product/hiryo.html>; <http://www.euroslag.org/products/statistics/>). Однако в связи с тем, что зачастую шлаки могут представлять определенную экологическую угрозу из-за присутствия тяжелых металлов и других неорганических загрязнителей, их использование в последнее время сокращается. Сейчас в России стали активно применять препараты на основе

цеолитов и диатомитов, например, производства компаний Диамикс, Татарские цеолиты, РусЭко-Органикс, Сибресурс и др.

Кремниевые удобрения. Их применяют с целью обеспечения питания растений кремнием и вносят в дозах от 40 до 501 кг/га. К данной группе можно отнести аморфный диоксид кремния (микросилика, пирогенная двуокись кремния), кремниевый гель, силикаты натрия и калия [17]. В настоящее время именно этот класс кремний-содержащих агрохимикатов является самым востребованным.

В ряде стран Восточной и Юго-Восточной Азии в качестве кремниевого удобрения вносят рисовую солому, содержание диоксида кремния в которой может достигать 20% [69, 70]. Во Флориде при выращивании риса в ротации с сахарным тростником на торфяниках стерню риса запахивают в почву [71, 72]. В странах Азии рисовую солому ограничено используют как удобрение почв, т.к. в основном ее расходуют на корм животных и в строительстве [73]. Кроме этого, существует опасность распространения с соломой насекомых-вредителей [74].

Кремниевые биостимуляторы. Это новый класс кремниевых агрохимикатов, использовать которые начали в последние 2 десятилетия, а механизмы воздействия на растения стали изучать только в последние 10–15 лет. Кремнийсодержащие биопрепараты применяют для опрыскивания растений в дозах <10 кг/га и для обработки семян, а также вносят в почву вместе с поливной водой [75, 76].

В настоящий момент в продаже присутствует ряд синтетических кремнийсодержащих биостимуляторов: RBS (Нидерланды), АпаСил (Россия), Zumsil (США), Эк-Si (Россия), Biosil (Европа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщение современных знаний позволяет выделить основные направления воздействия кремниевых препаратов на продуктивность системы почва–растение.

1. Увеличение урожайности и качества продукции растениеводства. Кремниевые препараты увеличивают урожайность в среднем на 5–30%. Доказано, что кремний существенно повышает содержание сахара в растениях и их плодах, в частности, во фруктах и ягодах.

2. Восстановление плодородия деградированных почв. Активные формы кремния влияют на состав вторичных минералов в почве и контролируют такие свойства, как водоудерживающая и сорбционная способности почв.

3. Повышение устойчивости почв к ветровой и водной эрозии.

4. Снижение токсичности алюминия в кислых почвах. Монокремниевая кислота прочно связывает подвижный алюминий, образуя алюмосиликаты. По своей эффективности кремниевые мелиоранты превосходят известковые материалы.

5. Снижение выноса питательных элементов (N, P, K) и сохранение их в доступной для растений форме. Многие кремниевые препараты способны физически сорбировать минеральные удобрения. Монокремниевая кислота обеспечивает освобождение фиксированного в почве фосфора в результате реакции замещения фосфат-аниона силикат-анионом в фосфатах кальция, железа и алюминия.

6. Усиление защиты растений от насекомых-вредителей, грибковых и инфекционных заболеваний без негативного влияния на окружающую среду, свойственного пестицидам и фунгицидам.

7. Повышение засухоустойчивости растений на фоне снижения расхода поливной воды на 30–40% и повышение устойчивости к другим абиотическим стресс-факторам.

8. Усиление устойчивости растений к солевой токсикации.

9. Детоксикация тяжелых металлов в почве.

10. Ускорение созревания плодов растений на 1–2 нед и улучшение их качественных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вергилий П.М. Буколики. Георгики. Энеида. М.: Худ. лит-ра, 1971. 418 с.
2. Крупеников И.А. История почвоведения. М.: Наука, 1981. 327 с.
3. Davy H. The elements of chemical philosophy. London: J. Johnson and Co., 1812. 564 p.
4. Leibigh J. Organic chemistry in its application to agriculture and plant physiology. London: Taylor and Walton, 1840. 414 p.
5. Hall A.D., Morrison C.G.T. On the function of silica in the nutrition of cereals // Proc. R. Soc. Lond. 1906. Ser. B. V. LXXVII. P. 455–477.
6. Rothamsted experimental station guide to the classical experiment. Norfolk: Rapide Printing, 1991. P. 23–27.

7. Менделеев Д.И. Основы химии. СПб.: Типография тов-ва "Общественная польза", 1870. № 3. 92 с.
8. Zippicotte J., Zippicotte J. Fertilizer: Pat. 238240 USA // Anted Staes Patent Office. 1881. V. 19. № 9. P. 496.
9. Maxwell W. Lavas and soils of the Hawaiian Islands // The American Naturalist. 1898. V. 32. № 378. P. 537–539.
10. Epstein E. Silicon // Ann. Rev. Plant Biol. 1999. V. 50. № 1. С. 641–664.
11. Sommer A.L. Studies concerning the essential nature of aluminum and silicon for plant growth // Agric. Sci. Univ. Calif. Pub. 1926. № 5. P. 57–81.
12. Grob A. Beitrage zur anatomie der epidermis der gramineenblätter // Bibl. Bot. Bd. Ht. 1896. V. 36. P. 1–96.
13. Onodera I. Chemical studies on rice blast // J. Sci. Agric. Soc. 1917. № 180. P. 606–617.
14. Miyake K., Adachi M. Chemische untersuchungen uber die widerstands fahigkeit der reisarten gegen die "Imochi krankheit" // Biochemistry. 1922. V. 1. № 2. P. 223–229.
15. 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 // J. Coll. Agric. 1934. V. 13. № 1. P. 45–108.
16. Yoshida S. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant // Bull. Nat. Inst. Agric. Sci. 1965. Ser. B. № 15. P. 1–58.
17. Ma J.F., Takahashi E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Amsterdam: Elsevier, 2002. 294 p.
18. Davis D.E., MacIntire W.H., Comar C.L., Shaw W.M., Winterberg S.H., Harris H.C. Use of ⁴⁵Ca labeled quenched calcium silicate slag in determination of proportions of native and additive calcium in lysimeter leachings and in plant uptake // Soil Sci. 1953. V. 76. № 2. P. 153–164.
19. Schollenberger C.J. Silica and silicates in relation to plant growth and composition // Soil Sci. 1922. V. 14. № 5. P. 347–362.
20. 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.
21. Anderson D.L., Snyder G.H., Martin F.G. Muti-year response of sugarcane to calcium silicate slag on Everglades Histosols // Agron. J. 1991. V. 83. P. 870–874.
22. Savant N.K., Snyder G.H., Datnoff L.E. Silicon management and sustainable rice production // Adv. Agron. San Diego, USA: Acad. Press, 1997. V. 58. P. 151–199.
23. Аммосова Я.М., Дьяков В.М., Матыченков В.В., Чернышев Е.А. Использование соединений кремния в сельском хозяйстве. М.: Минхимпром, 1990. 136 с.
24. Сабанин А.Н. О кремнеземе в зерне проса (*Panicum miliaceum* L.). Санкт-Петербург: типо-лит. Альшутлера, 1901.
25. Аммосова Я.М., Матыченков В.В. Кремний и подвижные фосфаты почвы // Химизация сел. хозяйства. 1990. № 1. С. 47–50.
26. Аскинази Д.Л. Фосфатный режим почвы и известкование почв с кислой реакцией. М., Л.: изд-во АН СССР, 1949. 216 с.
27. Литкевич С.В. Влияние кремнекислоты на развитие растений. Сообщ. 2. По вопросам фосфатных и калийных удобрений и известкования. Л., 1936. С. 29–53.
28. Вернадский В.И. Биогеохимическая роль алюминия и кремния в почвах // Докл. АН СССР. 1938. № 21 (3). С. 127–130.
29. Виноградов А.П. Химический элементарный состав организмов моря. М.: Наука, 2001. 620 с.
30. Назаров А.Г. Биогеохимический цикл кремнезема // Биогеохимические циклы в биосфере. М.: Наука, 1976. С. 199–257.
31. Плюснина И.И. Метаморфические реакции низкотемпературного кремнезема в земной коре. М.: Изд-во МГУ, 1980. 225 с.
32. Приходько В.Е. Формы соединений кремния в почвах элювиального ряда (на примере Восточно-Европейской фации): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 1979. 20 с.
33. Приходько В.Е., Аммосова Я.М. К вопросу определения кремния в различных почвенных вытяжках // Вестн. МГУ. Сер. 17: Почвоведение. 1977. № 3. С. 76–78.
34. Варшал Г.М., Драчева Л.А., Ксензенко В.И., Замкина М.С. Количественное определение различных форм кремнекислоты в поверхностных водах // Мат-лы XXV гидрохимического совещ. Новочеркасск: Гидрометеиздат, 1972. С. 33.
35. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 262 с.
36. Ier R.K. The chemistry of silica. N.Y.: Wiley, 1979. 866 p.
37. Воронков М.Г., Скоробогатова В.И., Вугмейстер Е.К., Макаровский В.В. Кремний в нуклеиновых кислотах // ДАН СССР. 1975. № 220 (3). С. 723–725.
38. Воронков М.Г., Кузнецов И.Г., Дьяков В.М. Новый биостимулятор — Мивал в сельском хозяйстве // Результаты научных исследований в практику сельского хозяйства. М.: Наука, 1982. С. 87–89.
39. Воронков М.Г., Зелчан Г.И., Лукевиц А.Ю. Кремний и жизнь. Рига: Зинатне, 1978. 587 с.
40. Carlisle E.M. Silicon // Biochemistry of the essential ultratrace elements. Boston: Springer, 1984. V. 3. P. 257–291.
41. Birchall J.D. The essentiality of silicon in biology// Chem. Soc. Rev. 1995. V. 24. № 5. P. 351–357.
42. Bendz G. Biochemistry of silicon and related problems // Proc. 40th Nobel Symposium. Lidingo, Sweden, 1978. 591 p.
43. Datnoff L.E., Snyder G., Korndorfer G. Silicon in agriculture. Studies in plant science. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403 p.
44. Liang Y., Nikolic M., Bélanger R., Gong H., Song A. Silicon-mediated tolerance to salt stress // Silicon in agriculture. Dordrecht: Springer, 2015. P. 123–142.

45. *Ma J.F.* Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2004. V. 50. № 1. P. 11–18.
46. *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.
47. *Tewatia R.K.* Silicon in Indian agriculture: Policy and promotional issues // *Proc. 7th Inter. Silicon in Agricul Conf.* Bengaluru, India, 2017. P. 155.
48. *Li L., Li Y., Wang Y., Tang M., Ai S.* Si-rich amendment combined with irrigation management to reduce Cd accumulation in brown rice // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2021. V. 21. P. 3221–3231.
49. *Khan I., Awan S.A., Rizwan M., Ali S., Hassan M.J., Brestic M.* Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil–plant interphase: A review // *Ecotox. Environ. Saf.* 2021. V. 222. 112510.
50. *Peng H., Ji X., Wei W., Bocharnikova E., Matichenkov V.* As and Cd sorption on selected Si-rich substances // *Water Air Soil Poll.* 2017. V. 228 (8). P. 1–11.
51. *Ji X., Liu S., Huang J., Bocharnikova E., Matichenkov V.* Monosilicic acid potential in phytoremediation of the contaminated areas // *Chemosphere*. 2016. V. 157. P. 132–136.
52. *Haynes R.J., Zhou Y.F.* Effect of pH and added slag on the extractability of Si in two Si-deficient sugarcane soils // *Chemosphere*. 2018. V. 193. P. 431–437.
53. *Cai Y., Zhang S., Cai K., Huang F., Pan B., Wang W.* Cd accumulation, biomass and yield of rice are varied with silicon application at different growth phases under high concentration cadmium-contaminated soil // *Chemosphere*. 2020. V. 242. P. 125–128.
54. *Wang Y., Liu J., Tang Y.* Inhibition effect of silicon on cadmium accumulation and transport in rice // *Ecol. Environ. Sci.* 2016. V. 25. № 11. P. 1822–1827.
55. *Wei W., Ji X., Saihua L., Bocharnikova E., Matichenkov V.* Effect of monosilicic and polysilicic acids on Cd transport in rice, a laboratory test // *J. Plant Growth Regul.* 2022. V. 41. № 2. P. 818–829.
56. *Balakhnina T.I., Bulak P., Matichenkov V.V., Kosobryukhov A.A., Włodarczyk T.M.* The influence of Si-rich mineral zeolite on the growth processes and adaptive potential of barley plants under cadmium stress // *J. Plant Growth Regul.* 2015. V. 75. № 2. P. 557–565.
57. *Huang H.L., Li M., Rizwan M., Dai Z., Yuan Y., Hossain M.M., Cao M., Xiong S., Tu S.* Synergistic effect of silicon and selenium on the alleviation of cadmium toxicity in rice plants // *J. Haz. Mater.* 2021. V. 401. 123393.
58. *Kreszies T., Kreszies V., Ly F., Thangamani P.D., Shellaikkutti N., Schreiber L.* Suberized transport barriers in plant roots: the effect of silicon // *J. Exp. Bot.* 2020. V. 71. № 21. P. 6799–6806.
59. *Kim Y.-H., Khan A., Waqas M., Shahzad R., Lee I.-J.* Silicon-mediated mitigation of wounding stress acts by up-regulating the rice antioxidant system // *Cereal Res. Commun.* 2016. V. 44. № 1. P. 111–121.
60. *Bhat J.A., Shivaraj S.M., Singh P., Navadagi D.B., Tripathi D.K., Dash P.K., Deshmukh R.* Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants // *Plants*. 2019. V. 8. № 3. P. 71.
61. *Guerriero G., Hausman J.F., Legay S.* Silicon and the plant extracellular matrix // *Front Plant Sci.* 2016. V. 7. P. 463.
62. *Emamverdian A., Ding Y., Xie Y.* Silicon mechanisms to ameliorate heavy metal stress in plants // *Biomed. Res. Inter.* 2018. 8492898.
63. *Li X.Y., Long J., Peng P.Q., Chen Q., Dong X., Jiang K.* Evaluation of calcium oxide of quicklime and Si–Ca–Mg fertilizer for remediation of Cd uptake in rice plants and Cd mobilization in two typical Cd-polluted paddy soils // *Inter. J. Environ. Res.* 2018. V. 12. № 6. P. 877–885.
64. *Wei X., Zhang P., Zhan Q., Hong L., Bocharnikova E., Matichenkov V.* Regulation of As and Cd accumulation in rice by simultaneous application of lime or gypsum with Si-rich materials // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021. V. 28. № 6. P. 7271–7280.
65. *Coskun D., Britto D.T., Huynh W.Q., Kronzucker H.J.* The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress // *Front. Plant Sci.* 2016. № 7. P. 1072.
66. *Hernandez-Apaolaza L.* Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review // *Planta*. 2014. V. 240. № 3. P. 447–458.
67. *Матыченков И.В.* Взаимное влияние кремниевых, фосфорных и азотных удобрений в системе почва–растение: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2014. 136 с.
68. *Куликова А.Х.* Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: УлГАУ, 2013. 176 с.
69. *DeDatta S.K.* Principles and practices of rice production. N.Y.: Wiley & Sons, 1981. 618 p.
70. *Yoshida S.* The availability of silicon in paddy soil // *Paddy soil science*. Kodansha, Tokyo, Japan, 1978. P. 293–299.
71. *Dean J.L., Todd E.H.* Sugarcane rust in Florida // *Sugar J.* 1979. V. 42. P. 10.
72. *Deren C.W., Datnoff L.E., Snyder G.H.* Variable silicon content of rice cultivars grown on everglades histosols // *J. Plant Nutr.* 1992. V. 15. № 11. P. 2363–2368.
73. *Amarasiri S.L., Wickramasingke K.* Use of rice straw as a fertilizer material // *Tropical Agriculturist*. 1977. V. 133. P. 39–49.
74. *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 // *Anim. Feed Sci. Technol.* 1997. V. 65. № 1–4. P. 165–182.
75. *Artyszak A., Gozdowski D., Siuda A.* Effect of the application date of fertilizer containing silicon and potassium on the yield and technological quality of sugar beet roots // *Plants*. 2021. V. 10. № 2. P. 370.
76. *Гранкина А.О.* Влияние кремнийсодержащих биостимуляторов на морозоустойчивость пшеницы // Кремний и жизнь. Кремнистые породы в сельском хозяйстве. Ульяновск: УлГАУ, 2021. P. 41–46.

Silicon-Based Materials in Agriculture

E. A. Bocharnikova^{a,b,#}, V. V. Matichenkov^{a,b}, and I. V. Matichenkov^c

^a*Institute Basic Biological Problems RAS
Institutskaya ul. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia,*

^b*All-Russian Scientific-Research Institute of Phytopathology
ul. Institute, pos. 5, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Bolshye 143050, Russia*

^c*LLC "StroyPartner"
prosp. Ryazanskiy 86/1, p. 3, Moscow 109542, Russia*

[#]*E-mail: msvk@rambler.ru*

The more than 200-year history of studying the role and functions of silicon in the soil–plant system is shown. The main directions of research on silicon are given, including the study of the effect of silicon preparations on the mobility of heavy metals and on the resistance of plants to climatic changes. The silicon-mediated mechanisms of detoxification of cadmium-contaminated soils and reduction of cadmium accumulation by plants are generalized. There are 3 groups of silicon agrochemicals: silicon-containing soil meliorants, silicon fertilizers and biostimulators. The principles of the effect of these groups of agrochemicals on the soil–plant system are described.

Keywords: silicon-containing soil ameliorants, silicon fertilizers, silicon biostimulators.