

УДК 631.811.93:581.192:591.133.15

КРЕМНИЙ В РАСТИТЕЛЬНЫХ И ЖИВОТНЫХ ОРГАНИЗМАХ

© 2019 г. Н. Е. Самсонова*

Смоленская государственная сельскохозяйственная академия
214000 Смоленск, ул. Б. Советская, 10/2, Россия

* E-mail: n_samsonova@list.ru

Поступила в редакцию 24.05.2018 г.

После доработки 26.06.2018 г.

Принята к публикации 12.10.2018 г.

Обобщены материалы о содержании, формах кремния в почве, масштабах его круговорота в биогеоценозах, о механизмах поступления и распределения в растениях, содержании в растительных и животных организмах. Рассмотрена эффективность кремниевого корневого, некорневого питания растений и предпосевной обработки семян элементом. Обсуждены функции кремния в растениях, организме человека и животных. Сделан вывод о слабой изученности вопроса роли кремния в почвенно-растительных сообществах и в биосфере в целом.

Ключевые слова: кремний, почва, растения, животные.

DOI: 10.1134/S0002188119010071

ВВЕДЕНИЕ

Кремний — уникальный химический элемент, пьезоэлемент, который может превращать механическую энергию в электрическую, световую — в тепловую. Это, основной материал в микроэлектронике и строительстве. Кремний используют в быту (стекло, фарфор, керамика и др.), в ювелирной промышленности, фармакологии. В минералах и горных породах, которые на 97% состоят из природных силикатов, Si играет ту же роль, что и углерод в органическом мире [1]. Академик В.И. Вернадский [2] отмечал важную биогеохимическую роль кремния и невозможность существования без него живых организмов.

История взглядов на роль Si в живой природе начинается свой отсчет с XIX века, когда было установлено его наличие в тканях растений и возможность повышать урожайность сельскохозяйственных культур с помощью внесения силикатов, а также было высказано предположение о его защитных свойствах от неблагоприятных природных биотических и абиотических факторов, подтвержденное последующими многочисленными исследованиями.

Тот факт, что высшие растения могут успешно завершать свой цикл развития в лишенных кремния искусственно созданных средах, первоначально привел к формированию ошибочного мнения об отсутствии его необходимости для растений. В реальной полевой обстановке, где могут

проявляться многообразные стрессовые ситуации биотического (болезни, вредители и др.) и абиотического характера (низкие или высокие температуры, избыток солей и тяжелых металлов в почве, засуха и др.) кремний выполняет особую защитную функцию. Лишенные Si растения более склонны к нарушениям роста, развития и размножения. Это единственный питательный элемент, который не нарушает состояние растений при его избытке [3]. Известно, что кремний — один из основных элементов и в животном организме. Его нехватка губительно сказывается на состоянии костной ткани, волос, кожи, ногтей, иммунной системы.

В середине XX века интерес к использованию кремния в земледелии был утерян в связи с интенсивным развитием химических средств защиты растений. В последние годы он вновь вырос. Об этом свидетельствует рост публикаций и регулярные (раз в 3 года) международные конференции “Si in Agriculture”: 1999 г. — в США, 2002 г. — в Японии, 2005 г. — в Бразилии, 2008 г. — в Южной Африке, 2011 г. — в Китае, 2014 г. — в Швеции, 2017 г. — в Индии. Этот интерес обусловлен как возможностью снижения пестицидной нагрузки на агроценозы при использовании экзогенных источников кремния, так и его способностью повышать устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды выращивания.

Однако сегодня все еще далеко до разработки “единой теории” кремния в биологии и сельском хозяйстве, практически не изученными остаются вопросы о роли кремния в почвенно-растительных сообществах и в биосфере в целом.

Отмечен ряд причин, объясняющих отсутствие широкого использования кремния в земледелии [4]:

- отсутствие надежной информации об обеспеченности почв подвижными формами кремния и ее соотношения с потребностями в Si сельскохозяйственных культур;

- отсутствие контроля содержания кремния в растительных тканях;

- мнение, что существуют растения-аккумуляторы кремния и остальные растения, которые его не накапливают (хотя на самом деле все растения содержат определенное количество кремния, который необходим для их роста и развития);

- недостаток исследований, демонстрирующих экономические преимущества применения кремния, отсутствие пропаганды пользы кремния в стрессовых условиях выращивания сельскохозяйственных культур, а также информации о кремнии как о важном питательном элементе в вузовских учебниках.

При решении этих проблем использование Si станет стандартной практикой в полеводстве и садоводстве, особенно если учесть уже ставшее реальностью глобальное изменение климата. За последние 45 лет в России обширные засухи, сопровождавшиеся значительным снижением урожайности зерновых культур, отмечены в 1972, 1975, 1979, 1981, 1995, 1998, 1999, 2010, 2011, 2015 гг. Цель работы – анализ источников литературы о роли кремния в организмах растений и животных.

ИСТОЧНИКИ КРЕМНИЯ ДЛЯ РАСТЕНИЙ

Кремний поступает в растения из почвы, где по распространенности он занимает 2-е (после кислорода) место и присутствует в составе минералов – кварца, аморфного диоксида кремния, полевых шпатов, вермикулита, смектита, каолина, ортоклаза, плагиоклаза и других соединений. Валовое содержание его зависит от гранулометрического состава и генезиса почв. В глинистых почвах содержится 20–35% кремния, в песчаных почвах – 45–49% [5], в верховом торфе – 1% [6]. Растворимость этих форм Si низкая, и они биогеохимически немобильны. Растворимыми являются поликремниевые и монокремниевая кислоты.

Исследование пула почвенного кремния показало, что подвижный и адсорбированный Si составляют наименьшую долю, больше всего присутствует

аморфного Si, промежуточное положение занимает окклюдированный оксидами/гидроксидами и органический кремний. Поэтому, несмотря на высокое содержание общего кремния в почве, растения могут испытывать его недостаток. Содержание подвижного кремния составляет всего 1–3% от общего и не превышает 150–200 мг/кг почвы [7]. На примере риса показано, что растения поглощают Si подвижного, окклюдированного и адсорбированного пулов [8].

В организме растения происходит трансформация поглощенного кремния в аморфный кремнезем, который при отмирании растений аккумулируется в верхнем слое почвы. Наиболее интенсивно этот процесс происходит в почвах луговых и травянистых фитоценозов (черноземах, каштановых, серых лесных почвах).

Баланс и структура валового кремния в почве определяется почвообразовательным процессом и типом растительности. Из верхних горизонтов подзолистых почв бореального климатического пояса, почв гумидных регионов тропиков и экваториальных зон с ферралитным процессом почвообразования идет активный вынос доступного растениям кремния в нижние горизонты. Поэтому кислые, сильно выщелоченные почвы бедны его активными формами [6] и характеризуются низким уровнем плодородия.

Миграция Si происходит в форме растворимой кремнекислоты [9]. Концентрация ее в почвенном растворе находится в диапазоне 0.1–0.6 мМ, что сопоставимо с содержанием фосфора, калия, кальция, сульфатов [10]. Фульвокислоты усиливают разрушение и вынос из элювиального горизонта вторичных минералов [11]. Ежегодный вынос кремнезема в мировой океан достигает 300 тыс. т [12].

Вторым источником отчуждения кремния является вынос его урожаями. По данным FAO, в мире из пахотных почв теряется 210–224 млн т кремния, что в расчете на 1 га составляет 30–700 кг в зависимости от величины урожайности и выращиваемых культур. По другим данным [13], растения обычно потребляют 50–200 кг Si/га. Особенно много кремния выносят сахарный тростник и рис. В результате в пахотных почвах всегда складывается отрицательный баланс его подвижных форм (6–20 кг/га) [14], что приводит к разрушению органо-минерального комплекса почвы, ускорению ее деградации и может являться ограничивающим фактором формирования высоких урожаев особенно при неблагоприятных условиях внешней среды.

Восполнение потерь подвижных форм Si возможно путем внесения кремниевых удобрений. Наиболее высокий их эффект проявляется на

культуре риса: низкая концентрация Si в тканях растений приводит к значительному снижению урожайности (до 40%) и качества зерна [15], поэтому именно страны, традиционно выращивающие эту культуру, первыми подняли проблему Si. Эти удобрения используют в Бразилии, во Флориде, на Гавайях, в Пуэрто-Рико, Австралии, Южной Африке, Южной Корее, Колумбии, Мексике [16]. В Японии с 1955 г. они официально внесены в реестр минеральных удобрений.

Имеются сведения о связи отзывчивости растений на кремниевые удобрения с содержанием органического вещества и гранулометрическим составом почвы [17]. Положительный эффект можно ожидать на кремний-дефицитных почвах с большим количеством органического вещества и глинистых частиц.

Первыми кремниевыми удобрениями были силикат натрия (Ю. Либих, 1840 г.) и аморфный кремнезем (Д.И. Менделеев, 1870 г.). В Южной Индии на рисовых плантациях используют песок 1 раз в 2–3 года в дозе 5–7.5 т/га, в США вносят органически модифицированный зеленый песок, содержащий железо, калий и силикаты [18]. Обогащать почву кремнием позволяет солома, стерня, зола шелухи риса.

Мировое производство кремниевых удобрений составляет ~4 млн т в год при потребности 700 млн т; в России – соответственно 0.5 и 175 млн т. В США, Китае, Индии, Бразилии и других странах выпуск кремниевых удобрений ежегодно увеличивается на 20–30%.

В РФ кремниевые удобрительные материалы представлены природными цеолитами, диатомидами, трепелами, опоками, которые являются биологически активными и безопасными, часто не уступающими по эффективности традиционным минеральным удобрениям [19–22]. В качестве источника кремния используют некоторые отходы промышленности (металлургические шлаки, золу бурых углей, цементную пыль, фосфогипс), промышленность предлагает азофоску с кремнием (N : P : K : Si = 10 : 3 : 3 : 13), получен патент на получение комплексного кремниевое-фосфорного удобрения [23]. Есть предложение производства капсулированного силикатом натрия суперфосфата, который можно использовать в более высоких дозах под культуры, чувствительные к осмотическому давлению почвенного раствора [24].

Для некорневого питания растений и предпосевной обработки семян изучают эффективность кремнийсодержащих препаратов – силиактива, силипланта, кремневита, прониКСила (Россия), квантум-аквасила (Украина), келик-К-Si, контролфит-Si (Испания), препаратов торговой мар-

ки “Zum Sil” (Новая Зеландия), а также аморфного диоксида кремния, силикатов калия, натрия, кальция. В качестве стимуляторов роста предложены препараты, содержащие кремний в органической форме: мивал, мивал-агро, ТЭС, черказ, энергия-М, экост [25]. В Швеции и Иране изучают возможности использования SiO₂-наночастиц [26, 27].

ПОСТУПЛЕНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ КРЕМНИЯ В РАСТЕНИЯХ

Кремний является питательным элементом зольного типа и присутствует в любом живом организме. Растениями он поглощается в виде ортокремниевой кислоты (H₄SiO₄) и силикат-иона [13]. Сахарный тростник может выносить 300–700 кг Si/га, рис – 150–300, пшеница – 50–150 кг Si/га [28], что свидетельствуют об объемах его отчуждения из почвы. Из полевых культур больше всего кремния выносят злаковые – типичные кремнефилы, при этом рис – значительно больше, чем кукуруза, пшеница, рожь, ячмень или сорго [29]. Тропические леса в год накапливают 4–67 [30], леса умеренного пояса – 23–44 кг Si/га [31]. Интенсивность поглощения Si имеет видовую специфику, что показано на рисе, томате и огурце, имеющих разную потребность в этом элементе [32].

Поступление кремния в корневую систему происходит пассивным и активным путем. Пассивное поглощение, по-видимому, полностью регулируется транспирационным током воды через ксилему, а активный транспорт осуществляется белками-переносчиками, расположенными в клеточных мембранах корня [18].

Разные виды растений имеют различную способность к активному и пассивному поглощению кремния [33]. Считается, что высокое содержание его в рисе связано не с диффузией, а с активным транспортом через клеточную мембрану [34]. Установлено, что для этого процесса необходима энергия, а низкая температура и метаболические репрессоры ингибируют этот процесс [32].

Работа белков-переносчиков кремния определяется специфическими генами, которые впервые были исследованы в 1997 г. у диатомовых водорослей [35], а затем у риса и других культур [29, 36–38]. Предположение, что перенос гена диатомовых водорослей на табак должен был усилить поступление в него Si, не оправдалось, что позволило сделать вывод о различиях в механизмах поглощения этого элемента низшими и высшими растениями [36].

Гены, ответственные за поглощение Si высшими растениями, были обнаружены в рисе (Lsi1,

Lsi2, Lsi6). Гены Lsi1, Lsi2 определяют поглощение его корневой системой, а Lsi6 — ответственен за транспорт Si в побеги [37, 39]. Lsi1 представляет собой плазмемный канал, идентифицированный в корнях не только риса, но и ячменя, кукурузы, тыквы, сои, и предполагается, что он является ключевым фактором, определяющим накопление Si в растениях. Lsi2 осуществляет активный отток кремниевой кислоты из клетки в апопласт [40].

После поглощения корнями большая часть кремния переносится в надземную часть растений с помощью транспортера Lsi6 [32, 41] и осаждается в виде диоксида кремния. Определяющую роль в распределении Si между различными органами играют его транспортеры — Lsi2 и Lsi6 [42]. Экспрессия генов Lsi1 и Lsi2 контролируется накоплением Si в побегах и имеет суточную изменчивость [43].

Исследования [44] растений томата китайскими учеными показали, что причиной низкой емкости накопления ими кремния может быть отсутствие гена, аналогичного Lsi1, в корневой плазматической мембране, которая является барьером для поглощения кремния.

Транспортной формой кремния в растениях от корня в надземную часть является ортокремниевая кислота (H_4SiO_4). При повышении ее концентрации в тканях она сначала переходит в коллоидную форму, а затем осаждается в виде твердого аморфного гидратированного вещества ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) — фитолита, не способного к реутилизации [18, 45, 46]. Показано, что кремний взаимодействует с полифенолами клеточных стенок ксилемы и действует на биосинтез и осаждение лигнина [47]. В работе [46] высказано мнение, что $\approx 90\%$ поглощенного кремния преобразуется в различные типы фитолитов или кремний-целлюлозных структур. В этом виде осадок укрепляет стенки клеток и повышает конструктивную жесткость тканей. Аккумуляция кремния происходит в тканях с максимальной транспирацией — эпидермисе листьев вблизи замыкающих клеток устьиц, трихомах и шипах [48, 49]. Таким образом, транспирация воды и полимеризация Si являются двумя основными факторами высокой концентрации кремниевой кислоты в надземных органах растений.

Изучение поглощения и транспорта кремния из силиката натрия/калия и наночастиц кремния (71–500 нм) растениями салата, пшеницы и пажитника показало, что Si был обнаружен во всех растениях, а транслокация его в побеги была большей при поступлении из растворимых источников, чем из наночастиц [50]. С уменьшением размеров наночастиц доступность кремния увеличивалась.

В растениях Si находится в форме ортокремниевых эфиров оксиаминокислот, оксикарбоновых кислот, полифенолов, углеводов, стероидов, Si-N-производных аминокислот, аминсахаров и пептидов, а также в виде минеральных соединений [51, 52]. В злаковых растениях до 60% кремния связано с белками, $\approx 11\%$ — с липидами, $>9\%$ — с клетчаткой, $\approx 5\%$ — с пектином, $<3\%$ — с лигнином. На долю органогенного Si приходится большая часть общего кремния — от 47–53 (очиток, бамбук, пальма) до 80–89% (хвощ, пырей, полынь), доля растворимого составляет 3–10%.

Существует предположение, что углеводы, белки, богатые серином, пролином, липиды, фенольные соединения и ионы металлов могут играть основную роль в формировании пула биокремния [53–55]. Ген богатого серином белка был выделен из корней мангровых деревьев (*Rhizophora apiculata*), возможно, он отвечает за поглощение и накопление Si в растениях [56]. Кремний содержится в рибосомах, митохондриях, хлоропластах, микросомах [57], поэтому возможно его участие в процессах, контролируемых этими органоидами.

Si концентрируется в надземной части растений, причем для него характерен базипетальный градиент распределения: его больше в листьях и стеблях, чем в корнях, а в листьях верхнего яруса — больше, чем в средних и нижних. От верхушки к основанию листа содержание Si уменьшается [52].

Разные органы по содержанию кремния могут сильно различаться: в полированном зерне риса — 0.5, в рисовых отрубях — 50, соломе — 130, шелухе — 230, в узлах соломы — 350 г/кг [58]. В сухом веществе растений содержится 0.1–10% Si [10], что эквивалентно или даже больше, чем азота (0.5–6%), фосфора (0.15–0.5), калия (0.8–8%) или серы (0.2–0.4%). Больше всего Si накапливают однодольные, такие как бамбук (*Bambuseae*), ячмень (*Hordeum vulgare*), рис (*Oryza sativa*), сорго (*Sorghum биколор*), сахарный тростник (*Saccharum officinarum*), пшеница (*Triticum aestivum*) [33, 46]. Двудольные растения аккумулируют его гораздо меньше ($<0.2\%$), что, по-видимому, связано с отсутствием специфических переносчиков и движением Si по клеткам пассивным путем с помощью диффузии [59]. Вместе с тем имеются сведения, что активное и пассивное поглощение Si, характерное для злаковых культур, имеет место и в таких растениях, как подсолнечник и тыква [60].

В листьях кустарников и деревьев, надземных органах травянистых растений содержание кремния изменяется от 2.0% (пырей ползучий) до 3.8–4.7% (пальмы) [61] и с возрастом, как правило, увеличивается.

В ряду бобовые культуры → плодовые → овощи → злаковые травы, зерновые культуры содержание кремния растёт [62]. Чем старше растения в эволюционном ряду, тем больше они содержат этого элемента (диатомовые водоросли, хвощи, папоротники, споровые хвощи, мхи и подорожники наиболее богаты Si).

Таким образом, способность концентрировать кремний является общей особенностью однодольных растений [63], поэтому злаковые и зерновые культуры относят к растениям-кремнефилам. Типичными кремнефилами являются также тысячелистник, полевой хвощ, осоки, папоротник, пырей ползучий, ситник, пижма, мятлик, полынь, бамбук, пальма, можжевельник, облепиха, солодка, окопник, малина, крапива, листовенница, пастушья сумка. Есть информация о том, что растения семейства Fabaceae, Cuscutaceae и Asteraceae также поглощают значительное количество кремния [64].

Растения-кремнефилы отличаются высокой скоростью роста и мало содержат кальция, отношение $Si : Ca > 1$, у других растений это отношение < 1 и даже < 0.5 [65]. В интенсивно растущем бамбуке в сухом веществе внутренней молочной сердцевины стебля содержится 12% кремния [61], в золе зерновых культур — 20–91% [51]. Из-за значительных отложений в семенных оболочках особенно много его накапливают рис, овес, просо и ячмень.

Поступление кремния в растения может происходить не только через корень, но и через лист. По некоторым сведениям, через лист может поступать до 30–40% кремния, а через корень — до 5% [66]. О высокой эффективности foliarного питания растений соединениями кремния накоплено немало фактов.

В исследовании с самой кремнефильной зерновой культурой — рисом — показана высокая эффективность некорневой подкормки растений водным раствором силиката натрия, которая вызвалась в увеличении массы соломы, продуктивности метелок, массы 1000 зерен, урожайности зерна и содержания в нем крахмала [67].

В Пакистане, являющемся одним из крупнейших производителей риса, для повышения урожайности зерна предлагают использовать некорневую подкормку растений растворами, содержащими кремний и бор [68]. Авторы считают, что рост урожайности обеспечивается сочетанием функций кремния (защита растений от неблагоприятных условий, поддержание их иммунитета и др.) и бора (регулирование транспорта углеводов, поддержание жизнеспособности пыльцы, нормальное течение физиологических процессов и др.).

В исследовании с разными сортами пшеницы [69] поступление Si через лист улучшило параметры роста растений и концентрацию хлорофилла в листьях в условиях водного дефицита, но не оказало существенного влияния на ростовые процессы при достаточной влагообеспеченности растений. При этом чувствительные к засухе сорта по результату напоминали устойчивые.

Сравнение влияния корневого и некорневого питания пшеницы соединениями кремния на защиту растений от мучнистой росы показало преимущество корневого питания: Si концентрировался в листьях, что на 80% снизило поражение растений мучнистой росой [70]. Некорневое питание хотя и в меньшей степени, но также привело к значительному уменьшению распространения мучнистой росы, что свидетельствовало, как считают авторы, о прямом воздействии растворов Si на возбудителей болезни.

В исследовании авторов данной статьи [71] foliarная обработка растений кукурузы в жарких и засушливых условиях себя не оправдала, тогда как в более благоприятных обеспечила 25%-ную прибавку урожая зеленой массы к NPK-фону. Отмечено повышение устойчивости стеблей кукурузы на излом при использовании препарата силиплант и достоверный рост урожайности яровой пшеницы при обработке растений раствором препарата контролфит Si [72].

Польза некорневого применения соединений кремния показана не только на зерновых культурах. Использование этого приема на яблоне привело к повышению содержания питательных веществ в плодах [73]. Опрыскивание 25-летних растений финиковой пальмы растворами силиката калия положительно сказалось на росте и содержании N, P, K и Mg в листьях, урожайности и качестве плодов [74]. Обработка растений бобов раствором силиката кальция привела к значительному снижению поражения их белой плесенью (*Sclerotinia sclerotiorum*), хотя на величину урожайности это не влияло [75]. Применение Si в виде foliarной обработки повышало устойчивость растений винограда к холоду путем поддержания целостности мембраны благодаря эффективной работе пероксидазы и снижению фотоингибирования во время восстановления после воздействия холода. Этого не происходило при внесении Si в почву [76].

Соединения кремния могут быть использованы и для предпосевной обработки семян (ПОС), технология которой менее затратна и более экологична в связи с ограниченным рассеянием в окружающую среду используемых веществ. Для ПОС в литературе описано использование препаратов аэросил, силиплант, мивал-агро, а также

силикатов натрия, калия, кремниевой кислоты [24, 71, 77–81]. Обработка семян кукурузы силплантом, силикатом натрия и мивалом-агро была эффективной при выращивании растений в жаркие и засушливые годы [71]. В опытах с ^{15}N этот прием на пшенице и тритикале снизил негативное воздействие почвенной засухи, повышенного засоления почвы и избытка кадмия на азотное питание растений [81].

Таким образом, не только корневое поступление кремния в растения, но и питание Si через лист, предпосевная обработка семян являются эффективными приемами повышения урожайности, качества продукции и защиты растений от болезней, полегания и негативных факторов внешней среды.

ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ РАСТЕНИЙ И КАЧЕСТВО УРОЖАЯ

Дефицит кремния ограничивает рост корней. На злаковых, цитрусовых, овощных культурах и кормовых травах показано, что улучшение питания кремнием позволило увеличить количество вторичных и третичных корней (на 20–100%), общую и адсорбирующую поверхность и массу корней [66, 82]. Под действием кремния изменяется архитектура клеточной стенки, она укрепляется, и это повышает ее способность к расширению [83]. На яровой пшенице и кукурузе показано, что кремний увеличивает диаметр стебля, повышая устойчивость растений к ветровым нагрузкам и полеганию [71, 84–86], способствует формированию листового аппарата, ускоряет развитие растений [87, 88]. Внесение в почву кремнийсодержащих биогенных веществ диатомита и цеолита способствовало росту числа продуктивных стеблей, повышало содержание хлорофилла, площадь листьев, накопление сухих веществ, чистую продуктивность фотосинтеза, снижало поражение растений болезнями и вредителями [19, 84, 85, 88, 89]. Эти материалы повышали оводненность тканей, стимулировали рост и развитие растений в условиях засухи [90]. В опытах с пшеницей и сорго [91, 92] под воздействием кремния также было отмечено увеличение содержания хлорофилла, сухих веществ, повышение индекса листовой поверхности, массы и толщины листьев, что, по мнению авторов, способствовало снижению транспирации и поддержанию их водного потенциала. У растений риса улучшалась ориентация листовых пластинок. Внесение в почву Si в виде силикатов положительно сказалось на росте кокосовых саженцев, усилило жесткость и толщину их листьев как результат взаимодействия Si с пектинами и полифенолами [93].

Кремний оказывает положительное влияние на качество урожая. Под его действием установлено повышение содержания простых и сложных углеводов в сахарной свекле, картофеле, ягодных и цитрусовых культурах [94, 95], снижение накопления нитратов и тяжелых металлов в овощной продукции и зерне яровой пшеницы. Отмечено повышение содержания аскорбиновой кислоты и сахаров в овощной продукции, улучшение качества зерна риса, выращенного в условиях засухи [21, 96–98].

Под действием кремния существенно повышалось содержание сырого протеина в зерне и зеленой массе кукурузы [99]. В условиях солевого стресса в листьях томата (*Lycopersicon esculentum* L.) повышалось содержание белка [100]. Использование кремниевой кислоты в условиях защищенного грунта (верховой торф) привело к росту урожайности плодов томата, но не изменило их качество [98], в другом исследовании кремний способствовал повышению качества урожая томатов, подвергнутых физиологическому стрессу [101]. Использование кремниевых удобрений на карбонатной почве благотворно повлияло на урожайность, качество и сроки хранения винограда [102]. Кремниевое удобрение, внесенное в качестве некорневой подкормки сахарного тростника [103], неоднозначно повлияло на урожайность и содержание сахара в разных сортах: уменьшило содержание сахара, но увеличило урожайность или, наоборот, уменьшило урожайность, но повысило содержание сахара. В целом положительное влияние кремниевых удобрений на качество урожая показано на 30 видах сельскохозяйственных культур (зерновых, фруктовых и овощных).

Существует мнение [104], что среди показателей, определяющих пищевую, кормовую и фармацевтическую ценность растительного сырья, следует учитывать кремний, связанный с белками, фосфолипидами и пектинами, т.к. эти соединения в первую очередь усваиваются организмом человека и животных.

КРЕМНИЙ В ЖИВОТНОМ ОРГАНИЗМЕ

Среднее содержание кремния в организме человека в пересчете на SiO_2 не превышает 0.001% [51]. Источниками его являются вода, продукты питания, воздух, биологические добавки и лекарственные препараты. Суточное поступление его с пищей и водой составляет 3.5 мг, с воздухом — 15 мг [51, 52].

В соответствии с рекомендациями [105], в среднем в сутки в организм взрослого человека должно поступать примерно 30 мг кремния. Биодоступную форму кремния содержат продукты, богатые клетчаткой, цельные злаки, фрукты и пи-

тьевая вода [106]. Наибольшее количество Si содержится в зерне пленчатых культур (риса, овса, ячменя, проса, гречихи), а также ржи и кукурузы. Например, в 100 г риса содержится 1240 мг Si, овса — 1000, ячменя — 600, кукурузы — 60 мг Si.

Количество поступающего в организм кремния зависит от национальных особенностей рациона питания человека. В организм жителей Индии и Китая, основным продуктом в питании которых является рис, в среднем в сутки поступает 143–206 и 139 мг Si соответственно, в организм европейцев — 17–62 мг [107].

Кремний содержится во всех органах и тканях животных и человека [52, 108]. Наиболее богаты им ткани с отсутствием или слабым развитием нервных волокон. Это соединительные ткани, трахеи, сухожилия, кости, кожа, легкие, железы, хрящи, ногти, волосы. Содержание кремния в коже человека составляет 49.5 мкг/г, в волосах — 42, а ногтях — 26.12 мкг/г, больше всего его в зубной эмали — 242 мг/кг. В организме человека массой 70 кг находится от 140 до 700 мг кремния, и с возрастом его количество уменьшается, особенно у женщин, а также по мере развития атеросклероза [109–112].

Биологическая роль кремния до конца не изучена. Однако имеется информация о его связи с минерализацией костей и остеопорозом, синтезом коллагена и старением кожи, с состоянием волос и ногтей [109, 113], о способности кремния снижать уровень холестерина [114]. Доказано, что он участвует в обмене фтора, магния, алюминия, но особенно тесно прослежена его связь со стронцием и кальцием. Недостаток кремния в организме приводит к выпадению волос, размягчению и болезням суставов, сахарному диабету, гепатиту, энцефалиту, зобу, рожистым воспалениям кожи, силикозному малокровию, заболеванию соединительной ткани, камням в печени и почках, атеросклерозу, повышенному артериальному давлению, остеопорозу, болезням кожи и зубов. При нехватке в организме кремния начинают выпадать волосы, развивается раздражительность и апатия, бессонница и ослабление иммунитета. Кремний играет важную роль в процессе усвоения организмом человека витаминов и питательных элементов, придает прочность и эластичность кровеносным сосудам [52, 115].

Высказывается мнение о возможной роли кремния в выведении из организма алюминия, который оказывает токсическое действие на организм животных и человека и вызывает нарушение нервной деятельности [116, 117].

Растворимость кремниевой кислоты снижается при взаимодействии ее с железом, кальцием, магнием, алюминием, с рядом тяжелых металлов,

поэтому следует учитывать наличие этих элементов в рационе. Установлен физиологический антагонизм между кремнием и молибденом [110].

В организм человека кремний поступает и с лекарственными препаратами. При их создании прибегают к замене одного или нескольких атомов углерода кремнием, который по сравнению с углеродом имеет значительно меньшую электроотрицательность (1.74 против 2.5), в 1.5 раза больший ковалентный радиус и вакантные $3d$ -орбитали. Поэтому такая замена может изменить физиологическую активность препарата, например, повысить растворимость в липидах, обеспечить лучшую проницаемость через клеточные мембраны, продлить действие и усилить его фармакологический эффект. В частности, это было показано на препарате силистрен (silistren) — тетрагликолевом эфире ортокремниевой кислоты [51].

Кремний входит в состав препарата мумие, стимулирующего регенеративные процессы в костных тканях [61], трисиликат магния используют для лечения язвенной болезни, силикат алюминия и тальк входят в состав паст и мазей, применяемых при лечении кожных заболеваний, ожогов и язв. Коллоидный кремнезем является основой препаратов полисорб и полисорб МП. Препараты из хвоща используют при лечении заболеваний верхних дыхательных путей, туберкулеза [51, 52]. Отвары и настои кремниевых растений применяются в народной медицине. В этом отношении хорошо зарекомендовали себя масляный экстракт лопуха, экстракт хвоща, органические соединения кремния (керамиды), входящие в состав лекарства под названием “Масло репейное с экстрактом хвоща (с керамидами)”.

В литературе накоплен достаточный материал и о патологических процессах, связанных с избыточным поступлением кремния в организм. Очень опасным является вдыхание кварцевой пыли. Микрочастицы SiO_2 , попавшие в легкие, кристаллизуются в них, разрушают легочную ткань и вызывают тяжелую болезнь — силикоз. Наиболее часто силикоз развивается у рабочих горнорудной, машиностроительной промышленности, при производстве огнеупорных и керамических материалов, проходке туннелей, обработке гранита и других пород, содержащих свободную двуокись кремния, при работе пескоструйных аппаратов. Хроническое отравление кремнием может быть причиной мочекаменной болезни, фиброзных изменений в легочной ткани, злокачественных опухолей, неблагоприятно влияет на иммунную систему в целом [118].

Избыток соединений кремния может вызвать нежелательные последствия и у животных, например, может развиваться силикоз при избыточ-

ном поступлении силикатной пыли. Экстремально высокое содержание фитолитов в кормовых культурах (например, рисовой соломе как источнике корма для жвачных животных) вызывает развитие мочекаменной болезни, истирание зубов скота, ухудшение переваримости корма. Описаны случаи смерти телят при скормливаниях им богатой кремнием ($\geq 2\%$) травы из-за образования камней в мочевом тракте. В таком случае к рациону животных добавляют соль для большего потребления ими воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кремний, являясь одним из самых распространенных элементов в природе, играет колоссальную роль в биогеохимическом круговороте веществ, присутствует во всех живых организмах, является биоактивным элементом в различных биологических системах. Он представляет большой интерес для земледелия, т.к. способствует росту урожаев, повышению качества продукции, защите растений от стрессов биотической и абиотической природы. В организме человека и животных он выполняет многообразные функции, связанные с сохранением здоровья и долголетия.

Вместе с тем вопрос о функциях кремния в растительных и животных организмах все еще недостаточно изучен и остается предметом обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матковский П., Ярулин Р.* Кремний в мире человека // *Chem. J.* 2011. № 6–7. С. 36–39.
2. *Вернадский В.И.* Биосфера. Труды по биогеохимии. М.: Мысль, 1967. 376 с.
3. *Epstein E.* Silicon // *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 1999. V. 50. P. 641–664.
4. *Datnoff E.L., Tubana S.B.* Why is silicon still not used routinely for managing plant health and enhancing plant growth under greenhouse and field conditions? // 7th Inter. Conf. Silicon Agricult. *Proced. Abstracts. India*, 2017. P. 150.
5. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высш. шк., 1989. 528 с.
6. *Водяницкий Ю.Н.* Дефицит кремния в некоторых почвах и пути его устранения (обзор) // *Агрохимия*. 1984. № 8. С. 127–131.
7. *Аммосова Я.М., Балабко П.Н., Матыченков В.В.* Кремнезем в системе почва–растение // *Агрохимия*. 1990. № 10. С. 103–108.
8. *Thimmappa P., Nagabovanalli B.P.* Pools of silicon in soils of Karnataka and their contribution to rice // 7th Inter. Conf. Silicon Agricult. *Proced. Abstracts. India*, 2017. P. 29.
9. *Ермолаев А.А.* Кремний в сельском хозяйстве // *Химия в сел. хоз-ве*. 1987. № 6. С. 45–47.
10. *Epstein E.* The anomaly of silicon in plant biology // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1994. V. 91. P. 11–17.
11. *Приходько В.Е.* Формы соединений кремния в почвах элювиального ряда: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: Изд-во МГУ, 1979. 24 с.
12. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 262 с.
13. *Casey W.H., Kinrade S.D., Knight C.T.G., Rains D.W., Epstein E.* Aqueous silicate complexes in wheat, *Triticum aestivum* L. // *Plant Cell Environ.* 2004. V. 27. P. 51–54.
14. *Голованов Д.Л.* Кремний – незаменимый микро-элемент питания природных и культурных злаков // *Удобрения и химические мелиоранты в агроэкосистемах*. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 247–250.
15. *Ma J.F., Yamaji N.* Silicon uptake and accumulation in higher plants // *Trends Plant Sci.* 2006. № 11. P. 342–397.
16. *Meyer J.H., Keeping M.G.* Impact of silicon in alleviating biotic and abiotic stress in sugarcane: a review (www.siliforce.com).
17. *Tubana B., Babu T., White B., Agostinho F., Paye W., Datnoff L.* Understanding the dynamics of silicon in plant and soil are essential for establishing silicon fertilization guidelines // 7th Inter. Conf. Silicon Agricult. *Proced. Abstracts. India*, 2017. P. 10.
18. *Chanchal M.C.H., Riti Thapar K., Deepak G.* Alleviation of abiotic and biotic stresses in plants by silicon supplementation // *Sci. Agricult.* 2016. V. 13. № 2. P. 59–73.
19. *Пашкевич Е.Б., Кирюшин Е.П.* Роль кремния в питании растений и защите сельскохозяйственных культур от фитопатогенов // *Пробл. агрохим. и экол.* 2008. № 2. С. 52–57.
20. *Капранов В.Н.* Влияние диатомита и минеральных удобрений на фенотипические признаки растений и урожайность зерновых культур // *Агрохимия*. 2009. № 7. С. 34–43.
21. *Куликова А.Х.* Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: ГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. 175 с.
22. *Самсонова Н.Е., Капустина М.В., Зайцева З.Ф.* Влияние соединений кремния и минеральных удобрений на урожайность яровых зерновых и содержание в них антиоксидантных ферментов // *Агрохимия*. 2013. № 10. С. 78–86.
23. *Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Дьяков В.М.* Комплексное кремний-фосфорное удобрение: Пат. № 2130445 РФ.
24. *Козлов Ю.В.* Эффективность соединений кремния при возделывании зерновых культур в условиях Смоленской области: Дис. ... канд. биол. наук. Смоленск: ГСХА, 2010. 158 с.
25. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. Ч. 1. М., 2017. 936 с.
26. *Landberg T., Greger M.* Silicon nanoparticle effects on arsenic and cadmium plant uptake // 7th Inter. Conf. Silicon Agricult. *Proced. Abstracts. India*, 2017. P. 68.
27. *Greger M., Landberg T., Nazarian S.* Plant uptake of silicon nanoparticles // Там же. P. 40.
28. *Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
29. *Tamai K., Ma J.F.* Characterization of silicon uptake by rice roots // *New Phytol.* 2003. V. 158. № 3. P. 431–436.

30. Alexandre A., Meunier J.D., Colin F., Koud J.M. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. V. 61(3). P. 677–682.
31. Cornelis J.T., Ranger J., Iserentant A., Delvaux B. Tree species impact the terrestrial cycle of silicon through various uptakes // *Biogeochem*. 2010. V. 97. P. 231–245.
32. Mitani N., Ma J.F. Uptake system of silicon in different plant species // *J. Exp. Bot.* 2005. V. 56. № 414. P. 1255–1261.
33. Liang Y.C., Sun W.C., Zhu Y.G., Christie P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review // *Environ. Pollut.* 2007. V. 147. P. 422–428.
34. Raven J.A. Silicon transport at the cell and tissue level // *Silicon Agricult.* 2001. V. 8. P. 41–55.
35. De la Rocha C.L., Brzezinski M.A., De Niro M.J. Fractionation of silicon isotopes by marine diatoms during biogenic silica formation // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. V. 61. № 23. P. 5051–5056.
36. Ma J.F., Mitani N., Nagao S. et al. Characterization of the silicon uptake system and molecular mapping of the silicon transporter gene in rice // *Plant Physiol.* 2004. V. 136. № 2. P. 3284–3289.
37. Ma J.F., Yamaji N., Mitani N., Tamai K., Konishi S., Fujiwara T. An efflux transporter of silicon in rice // *Nature*. 2007. V. 448. P. 209–212.
38. Olivia L.R., Matthew P.P., Reisen Z., Geoff M.G. Silicon: Potential to promote direct and indirect effects on plant defense against arthropod pests in agriculture // *Front Plant Sci.* 2016. № 7. P. 744–766.
39. Yamaji N., Mitani N., Jian F.M. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots // *Plant Cell*. 2008. V. 20. № 5. P. 1381–1389.
40. Coskun D., Deshmukh R., Isenring P., Bélanger R. What makes a silicon transporter? The search for key residues that confer plant silicon permeability, accumulation and benefits // 7th Inter. Conf. Silicon Agricult. *Proced. Abstracts. India*, 2017. P. 38.
41. Yamaji N., Mitani N., Ma J.F. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots // *Plant Cell*. 2008. V. 20. P. 1381–1389.
42. Yamaji N., Mitani-Ueno N., Sakurai G., Ma J.F. A co-operative transport system for silicon in plants // 7th Inter. Conf. on Silicon Agricult. *Proced. Abstracts. India*, 2017. P. 36.
43. Sakurai G., Yamaji N., Mitani-Ueno N., Yokozawa M., Ono K., Ma J.F. Analysis of the expression dynamics of Silicon transporter gene using mathematical model in rice // 7th Inter. Conf. Silicon Agricult. *Proced. Abstracts. India*, 2017. P. 39.
44. Hao S., Yaoke D., Jia G., Haijun G. Isolation and characterization of silicon transporter gene Lsi1 in *Solanum lycopersicum* L. // 7th Inter. Conf. Silicon Agricult. *Proced. Abstracts. India*, 2017. P. 41.
45. Jones L.H.P., Handreck K.A. Silica in soils, plants and animals // *Adv. Agron.* 1967. V. 19. P. 107–149.
46. Ma J.F. Function of silicon in higher plants // *Prog. Mol. Subcell. Biol.* 2003. V. 33. P. 127–147.
47. Parry D.W., Kelso M. The distribution of silicon deposits in the root *Molina caerulea* (L.) Moench and *Sorghum bicolor* (L.) // Moench. *Ann. Bot.* 1975. V. 39. P. 995–1001.
48. Prychid C.J., Rudall P.J., Gregory M. Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons // *Bot. Rev.* 2004. V. 69. P. 377–440.
49. Cunha K.P.V., Nascimento C.W.A., Accioly A.M.A., Silva A.J. Cadmium and zinc availability, accumulation and toxicity in maize grown in a contaminated soil // *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 2008. V. 3. P. 1319–1328.
50. Greger M., Landberg T., Nazaralian S. Plant uptake of silicon nanoparticles // 7th Inter. Conf. Silicon Agricult. *Proced. Abstracts. India*, 2017. P. 40.
51. Воронков М.Г., Зелчан Г.И., Лукевиц А.Ю. Кремний и жизнь. Рига: Зинатне, 1978. 587 с.
52. Воронков М.Г., Кузнецов И.Г. Кремний в живой природе. Новосибирск: Наука, 1984. 157 с.
53. Harrison C.C. Evidence for intramineral macromolecules containing protein from plant silicas // *Phytochem.* 1996. V. 41. № 1. P. 37–42.
54. Currie H.A., Perry C.C. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies // *Ann. Botany*. 2007. V. 100. № 7. P. 1383–1389.
55. Kauss H., Seehaus K., Franke R., Gilbert S., Dietrich R.A., Kröger N. Silica deposition by a strongly cationic proline-rich protein from systemically resistant cucumber plants // *Plant J.* 2003. V. 33. № 1. P. 87–95.
56. Sahebi M., Hanaf M.M., Nor Akmar A.S., Rafii M.Y., Azizi P., Tengoua F.F., Azwa J.N.M., Shabanimofoad M. Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. Review article // *BioMed Res. Inter*. 2015. 16 p. (<http://dx.doi.org/doi/10.1155/2015/396010>)
57. Воронков М.Г., Барышук В.П. Силатраны в медицине и сельском хозяйстве. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 255 с.
58. Van Hoest P.J. Rice straw, the role of silica and treatments to improve quality // *Animal Feed Sci. Technol.* 2006. V. 130. P. 137–171.
59. Mitani N., Ma J.F. Uptake system of silicon in different plant species // *J. Exp. Bot.* 2005. V. 56. P. 1255–1261.
60. Liang Y.C., Hua H., Zhu Y. Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport // *New Phytol.* 2006. V. 172. P. 63–72.
61. Колесников М.П. Формы кремния в растениях // *Усп. биол. химии*. 2001. Т. 41. С. 301–332.
62. Thiagalingam K., Silva J.A., Fox R.L. Effect of calcium silicate on yield and nutrient uptake in plant growth on a humic ferruginous latosol // *Proc. Conf. Chem. Fertil. Trop. Soils* (Kuala Lumpur, Malaysia). Malaysian Soc. Soil Sci. 1977. P. 149–155.
63. Hodson M.J., White P.J., Mead A., Brofiedley M.R. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants // *Ann. Bot.* 2005. V. 96. P. 1027–1046.
64. Richmond R.E., Sussman M. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient // *Cur. Opinion Plant Biol.* 2003. № 6. P. 268–272.
65. Ma J.F., Yamaji N. Functions and transport of silicon in plants // *Cell Mol. Life Sci.* 2008. V. 65. P. 3049–3057.
66. Матыченков В.В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва–растение: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пушино, 2008. 34 с.

67. Ahmad A., Afzal M., Ahmad A.U.H., Tahir M. Effect of foliar application of silicon on yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.) // Cercetări Agronomice în Moldova. 2013. V. 46. № 3 (155). P. 21–28.
68. Ahmad A., Tahir M., Afzal M. Effect of foliar application of silicon and boron on rice. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 132 p.
69. Maghsoudi K., Emam Y., Ashraf M. Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed wheat cultivars differing in drought tolerance // Turkish J. Bot. 2015. V. 39. P. 625–634.
70. Guével M.-H., Menzies J.G., Bélanger R.R. Effect of root and foliar applications of soluble silicon on powdery mildew control and growth of wheat plants // Europ. J. Plant Pathol. 2007. V. 119. № 4. P. 429–436.
71. Самсонова Н.Е., Козлов Ю.В., Зайцева З.Ф., Шупинская И.А. Эффективность соединений кремния при обработке семян и растений кукурузы (*Zea mays* L.) // Агрохимия. 2017. № 1. С. 12–18.
72. Самсонова Н.Е. Кремниевые удобрения для внекорневой подкормки зерновых культур // Сб. матлов междунаро. научн.-практ. конф. “Продовольственная безопасность: от зависимости к самостоятельности” Смоленск: Смоленск. ГСХА, 2017. С. 159–166.
73. Javaid K., Misgar F.A. Effect of foliar application of orthosilicic acid on leaf and fruit nutrient content of apple cv. “Red Delicious” // Adv. Res. J. Multidisciplinary Discoveries. 2017. V. 20. Ch. 7. P. 30–32.
74. Moamen M. Al-Wasfy. Response of Sakkoti date palms to foliar application of royal jelly, silicon and vitamins B // J. Am. Sci. 2013. V. 9(5). P. 315–321.
75. Paula Jr.T.J., Vieira R.F., Teixeira H., Carneiro J.E.S., Lima R.C., Lehner M.S., Santos J. Foliar application of calcium chloride and calcium silicate decreases white mold intensity on dry beans // Trop. Plant Pathol. 2009. V. 34. № 3. P. 171–174.
76. Ghader H. Effects of soil- and foliar-applied silicon on the resistance of grapevine plants to freezing stress // Acta Biol. Szegediensis. 2015. V. 59. № 2. P. 109–117.
77. Лякина О.А. Использование фосфатов пониженной растворимости и соединений кремния при выращивании сельскохозяйственных культур в условиях дерново-подзолистых почв: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2012. 24 с.
78. Новикова Н.Е., Косякова Е.В. Элементы физиолого-биохимической адаптации гороха (*Pisum sativum* L.) под влиянием соединений кремния // Актуальность идей В.Н. Хитрово в исследовании биоразнообразия России. Орел, 2014. С. 266–269.
79. Сластя И.В. Влияние обработки соединениями кремния семян и вегетирующих растений на продуктивность сортов ярового ячменя // Агрохимия. 2012. № 10. С. 51–59.
80. Серегина И.И., Ниловская Н.Т., Баранов А.В. Продуктивность, фотосинтетическая деятельность и донорно-акцепторные отношения растений яровой пшеницы при применении силиката калия // Агрохимия. 2014. № 4. С. 60–69.
81. Верниченко И.В., Осипова Л.В., Яковлев П.А., Быковская И.А., Литвинский В.А. Влияние предпосевной обработки семян пшеницы и тритикале соединениями селена, кремния и цинка на поглощение растениями меченного ¹⁵N нитратного азота в стрессовых условиях выращивания // Агрохимия. 2017. № 3. С. 10–19.
82. Adatia M.H., Besford R.T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution // Ann. Bot. J. 1986. V. 58. P. 343–351.
83. Hossain M.T., Soga K., Wakabayashi K., Kamisaka S., Fujii S., Yamamoto R., Hoson T. Modification of chemical properties of cell walls by silicon and its role in regulation of the cell wall extensibility in oat leaves // J. Plant Physiol. 2007. V. 164. № 4. P. 385–393.
84. Капранов В.Н. Влияние диатомита и минеральных удобрений на фенотипические признаки растений и урожайность зерновых культур // Агрохимия. 2009. № 7. С. 34–43.
85. Самсонова Н.Е., Козлов Ю.В., Капустина М.В., Денисова И.И., Антонова Н.А., Шупинская И.А. Эффективность природного высококремнистого цеолита при выращивании кукурузы в условиях Западной части Центрального Нечерноземья // Агрохимия. 2016. № 3. С. 23–31.
86. Самсонова Н.Е., Лякина О.А. Предпосевная обработка семян кремнийсодержащими соединениями и ее эффективность на разных фонах минерального питания // Междунаро. научн.-практ. конф. “Почва, удобрение, урожай”. Беларусь, Горки: БГСХА, 2010. С. 167–169.
87. Ермолаев А.А. Кремний и устойчивость земледелия. Воронеж: Центр.-Чернозем. кн. изд-во, 1992. 213 с.
88. Шупинская И.А., Самсонова Н.Е., Антонова Н.А. Влияние корневого и фолиарного питания растений минеральными удобрениями и соединениями кремния на показатели фотосинтетической деятельности и урожайность зерна яровой пшеницы // Агрохимия. 2017. № 1. С. 11–18.
89. Антонова Н.А., Самсонова Н.Е. Урожайность яровой пшеницы, площадь листьев и содержание в них хлорофилла при использовании высококремнистого цеолита и минеральных удобрений // Сб. тр. Всерос. молод. научн.-практ. конф. “Фундаментальные основы современных аграрных технологий и техники”. Томск: Нац. Томский исслед. ун-т, 2015. С. 139–132.
90. Самсонова Н.Е., Антонова И.А., Шупинская И.А. Влияние цеолита и минеральных удобрений на водный режим растений и урожайность яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Агрохимия. 2016. № 10. С. 48–55.
91. Gong H.J., Chen K.M., Chen G.C., Wang S.M., Zhang C.L. Effects of silicon on growth of wheat under drought // J. Plant Nutr. 2003. V. 26 P. 1055–1063.
92. Ahmed M., Hassen F.U., Qadeer U., Aslam M.A. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum // Afr. J. Agricult. Res. 2011. № 6. P. 594–607.
93. Jeena M., Krishnakumar V., Abdul Haris A., Narayanan Nampoothiri C.K. Impact of silicates on the growth of coconut seedlings grown in a tropical Entisol // 7th Inter. Conf. Silicon Agricult. Proced. Abstracts. India, 2017. P. 133.
94. Янишевская О.Л., Ягодин Б.А. Влияние кремния, марганца и хрома на продуктивность и некоторые показатели качества товарной продукции овощных культур // Агрохимия. 2000. № 5. С. 47–51.

95. Manal M.E., Hemmat E.K., Nesma M.H., Abdel-salam D.E. Effect of selenium and silicon on yield quality of rice plant grown under drought stress // Austral. J. Crop Sci. 2014. V. 8. № 4. P. 596–605.
96. Довгун В.Б. Влияние кремния и кобальта на урожай и качество льна-долгунца и дайкона: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2008. 135 с.
97. Баранов А.В. Влияние кремния на рост, развитие и продуктивность яровой пшеницы при различных условиях минерального питания и водообеспечения: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2006. 152 с.
98. Самсонова Н.Е. Научное обоснование эффективности фосфорных удобрений пониженной растворимости и кремнийсодержащих соединений на почвах Центрального Нечерноземья: Автореф. ... д-ра с.-х. наук. М., 2001. 45 с.
99. Козлов Ю.В., Самсонова Н.Е., Новикова Н.Е. Сравнительная оценка мивала-агро, брассиностероидных препаратов и протравителя семян при выращивании яровых зерновых на дерново-подзолистой почве // Вестн. ОрелГАУ. 2010. Т. 23. № 2. С. 54–59.
100. Al-aghabary K., Zhu Z., Shi Q. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress // J. Plant Nutr. 2004. V. 27. № 12. P. 2101–2115.
101. Carballo-Méndez F.J., Olivares-Saenz E., Vázquez-Alvarado R.E., Zavala-García F., Bolívar-Duarte M., Benavides-Mendoza A. Silicon improves the quality of fruits of *Solanum lycopersicum* Mill. subjected to saline stress // 7th Inter. Conf. Silicon Agricult. Proced. Abstracts. 2017. P. 64.
102. Chu G., Zhang M., Liang Y. Applying silicate fertilizer increases both yield and quality of table grape (*Vitis vinifera* L.) grown on calcareous grey desert soil // Там же. 2017. P. 129.
103. Ketut A.W. Effects of Si-fertilizer application through the leaves on yield and sugar content of sugarcane grown in soil containing Abundant N // Agricult. Sci. Procedia. 2016. V. 9. P. 158–162.
104. Гинс В.К., Гинс М.С., Колесников М.П. Содержание кремния во фракциях растительного белка // Овощи России. 2017. № 1. С. 64–66.
105. МР 2.3.1.2432-08. “Рациональное питание. Нормы потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации”.
106. Boguszevska-Czubara A., Kazimierz P. Silicon in medicine and therapy // J. Elem. 2011. P. 489–497.
107. Jugdaohsingh R. Silicon and bone health // J. Nutr. Health Aging. 2007. V. 11. № 2. P. 99–110.
108. Currie H.A., Perry C.C. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies // Ann. Bot. 2007. V. 100. P. 1383–1389.
109. Вапиров В.В., Феоктистов В.М., Венкович А.А., Вапирова Н.В. К вопросу о поведении кремния в природе и его биологической роли // Уч. зап. Петрозаводск. гос. ун-та. 2017. № 2. С. 95–102.
110. Авцын А.П., Жаворонков А.А. Микроэлементозы человека: этиология, классификация, органопатология. М.: Медицина, 1991. 496 с.
111. Bissé E. Reference values for serum silicon in adults // Anal. Biochem. 2005. V. 337. P. 130–135.
112. Горбачев А.Л., Луговая Е.А. Возрастные перестройки микроэлементной системы человека как биохимический механизм старения // Сев.-Вост. научн. журн. 2010. № 1. С. 54–62.
113. Carlisle E.M. A relationship between silicon and calcium in bone formation // Fed. Proc. 1970. V. 29. P. 565.
114. Peluso M.R., Schneeman B.O. A food-grade silicon dioxide is hypocholesterolemic in the diet of cholesterol-fed rats // J. Nutr. 1994. V. 124. № 6. P. 853–860.
115. Михеева Э.А. Целительные свойства кремния. СПб.: Невский пр-т, 2003. 128 с.
116. Domingo J.L. Aluminium and other metals in Alzheimer's disease: a review of potential therapy with chelating agents // J. Alzheimers. Dis. 2006. V. 10. P. 331–341.
117. Boguszevska-Czubara A., Kazimierz P. Silicon in medicine and therapy // J. Elem. 2011. P. 489–497.
118. Сапожников С.П., Гордова В.С. Роль соединений кремния в развитии аутоиммунных процессов (обзор) // Микроэлементы в медицине. 2013. Т. 14. № 3. С. 3–13.
119. Айлер Р. Химия кремнезема. В 2-х т. М.: Мир, 1982. 1127 с.

Silicon in Soils, Plant and Animal Organisms

N. E. Samsonova[#]

Smolensk State Agricultural Academy
ul. B. Sovietskaya, 10/2, Smolensk 214000, Russia

[#]E-mail: n_samsonova@list.ru

Data on the content and forms of silicon in soil, the scale of its cycle in biogeocoenoses, mechanisms of uptake and distribution in plants, and content in plant and animal organisms were summarized. The efficiency of root and non-root silicon plant nutrition and presowing seed treatment by the element was considered. The functions of silicon in plants, human and animal bodies were discussed. It was concluded that the role of silicon in the soil-plant communities and in the biosphere in general is poorly studied.

Key words: silicon, soil, plants, animals.