

**Кремний и защита растений от стресса: теория, практика, перспективы.**  
Крамарев С.М., д.с.-х.н., Институт сельского хозяйства степной зоны НААНУ  
Полянчиков С.П., директор по развитию НПК «Квадрат»  
Ковбель А.И., руководитель ФХ «Деметра+», консультант НПК «Квадрат»

*«Насколько вода является уникальной жидкостью,  
настолько и аморфный кремнезем уникален как твердое вещество.  
Они во многом схожи.»*  
**Ральф Айлер**

*Кремний выполняет удивительно большое количество функций в жизни растений, и особенно важен в стрессовых условиях. Роль кремния можно сравнить с ролью вторичных органических метаболитов, выполняющих в растениях защитные функции. Видя все многообразие ролей, которые кремний играет в растениях против различных стрессов, сегодня мировые ученые признают, что еще далеки от разработки «единой теории» кремния в биологии и сельском хозяйстве (E. Epstein, 2009).*

*Кремниевое питание растений представляет не только научный интерес, но и имеет большое практическое значения в условиях роста дефицита продовольствия и необходимости увеличивать продуктивность растений на фоне неблагоприятных воздействий окружающей среды. В таких условиях применение кремниевых удобрений может стать очень актуальным резервом повышения эффективности растениеводства.*

### Кремний в природе и в растениях. Уникальность кремния.

Кремний является вторым (после кислорода) по распространенности элементом земной коры и почвы. Однако основная часть кремния находится в виде нерастворимых веществ и является недоступной растению. Кремний накапливается растениями в количествах, часто превышающих величину поглощения основных макроэлементов (N, P, K).

Отметим некоторые закономерности, которые выделяют кремний из ряда других элементов в жизнедеятельности растений. Почти все растения (за редким исключением) могут быть выращены без кремния в питательной среде. Даже кремнефильные растения рис и пшеница! Другой особенностью является то, что диапазон концентраций кремния в растениях значительно шире, чем других питательных элементов. Так, содержание кремния колеблется в пределах 0,1–10% от сухой массы, в то время как, например, для азота этот разброс составляет 0,5–6%, для калия: 0,8–8%, фосфора: 0,15–0,5%. Т.е разброс концентрации кремния – 100 раз!, а других элементов – не более 10 раз! (Эпштейн, 1994)

К настоящему времени становится очевидным несоответствие между значимостью кремния в природе и объемом имеющихся о его функциях знаний. Многие теоретические и практические вопросы, касающиеся полифункциональной роли кремния в растениях и почвах, остаются малоизученными. (Матыченков В.В., 2008)

Выделяют три группы растений по содержанию кремния в сухом веществе (Jones & Handreck, 1967) :

- а) более 5% (например, рис, тростник);
- б) более 1% (например, ячмень, рожь и т.д.);
- в) менее 1% (например, двудольные – огурец, подсолнечник и др.).

Несмотря на меньшую в целом способность накапливать кремний у двудольных, его роль в жизнедеятельности и повышении устойчивости к стрессам у этих культур не менее велика (Ma и др, 2006; Laing и др, 2008).

В тканях растений Si находится в виде водорастворимых соединений типа ортокремниевой кислоты, ортокремниевых эфиров, а также в форме нерастворимых минеральных полимеров (поликремниевые кислоты и аморфный кремнезем, из которых состоят растительные опалы – фитоциты) и кристаллических примесей. В составе органического вещества растительных тканей Si образует ортокремниевые эфиры оксиаминокислот, оксикарбоновых кислот, полифенолов, углеводов, стероидов, а также

производные аминокислот, аминокислот, аминокислот, аминокислот и пептидов. Наиболее важными растворимыми формами кремния в растениях и системе почва-растение являются монокремниевая и поликремниевые кислоты. Эти неорганические соединения всегда присутствуют в природных водных растворах. Причем между ними существует тесная взаимосвязь (Колесников М.П., 2001).

Кремниевая кислота в щелочных растворах ( $\text{pH} > 8,0$ ) существует в форме силиката (аниона метакремниевой кислоты  $-\text{SiO}_3^{2-}$ ). При  $\text{pH} 1-8$  в разбавленных растворах ( $\sim 0,1$  мг  $\text{Si}/\text{мл}$ ) устойчива растворимая в воде мономерная форма ортокремниевой кислоты  $-\text{H}_4\text{SiO}_4$ . При увеличении концентрации (в том же диапазоне  $\text{pH}$ ) ортокремниевая кислота полимеризуется, образуя олиго и поликремниевые кислоты, и, наконец, переходит в коллоидное состояние (см. Рис.1). Аналогичный процесс наблюдается, в частности, в клеточном соке растений по мере увеличения в нем содержания кремния (Колесников М.П., 2001; Heather A. Currie и др., 2007).

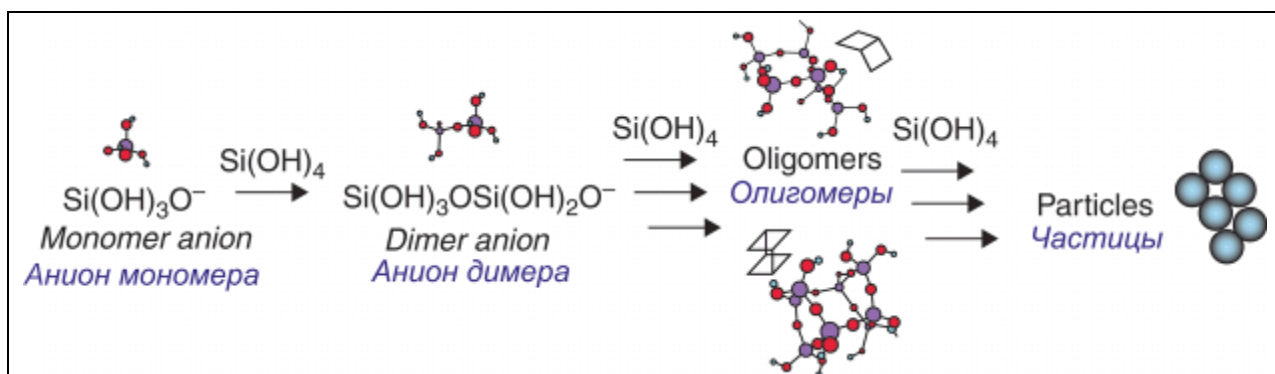


Рис. 1. Полимеризация мономеров кремниевой кислоты в более крупные частицы кремнезема путем различных промежуточных реакции конденсации димеров, олигомеров и агрегатов. Источник: Ann Bot. 2007 December; 100(7): 1383–1389.

В клеточном соке мономерная ортокремниевая кислота превращается в гели  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , которые откладываются на поверхности клеточных стенок, связываясь с полисахаридами и протеинами (Колесников М.П., 2001). Вероятные формы соединений кремния с органическим веществом растительных тканей приведены на рис. 2.

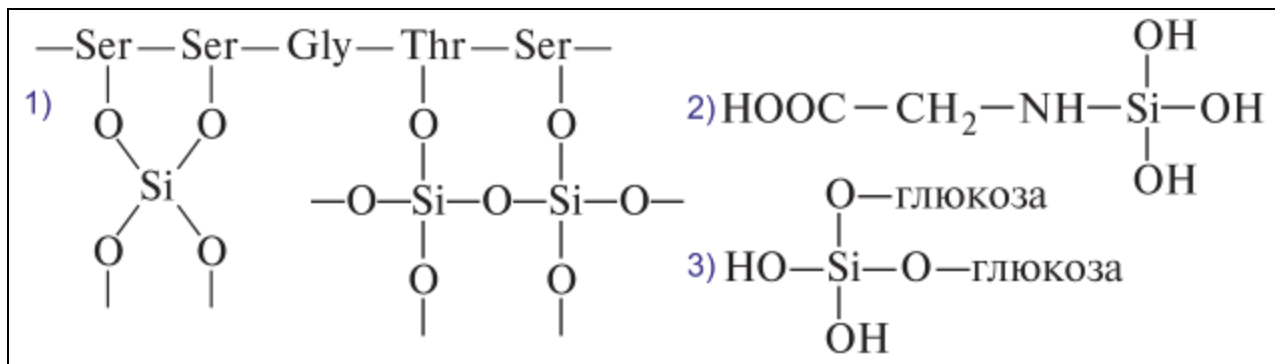


Рис. 2. Вероятные формы соединений кремния с органическим веществом растительных тканей.

1. «Силиконовая оболочка» белкового слоя клеточной мембраны, образованная ортокремниевой и олигокремниевой кислотами (связи  $\text{Si}-\text{O}$  с оксигруппами аминокислот).  
 2. Образование  $\text{Si}-\text{N}$  связи с аминогруппой аминокислоты.  
 3. Si как «сшивающий мостик» в полисахаридах ( $\text{Si}-\text{O}-\text{C}$  связи с сахарными остатками).  
 Источник: Успехи биологической химии, т. 41, 2001, с. 301–332

Кремний в растениях распределяется крайне неравномерно. Исследованиями установлено, что растения могут поглощать низкомолекулярные кремниевые кислоты и

их анионы не только через корневую систему, но и через поверхность листьев, если опрыскивать их кремнийсодержащими растворами. Важно отметить, что поглощение кремния листьями составляет около 30–40%, тогда как через корневую систему – не превышает 1–5%. (Матыченков, 2008)

Кремний в листьях откладываются в виде слоя толщиной 2,5 мкм в пространстве непосредственно под тонким (0,1 мкм) слоем кутикулы, образуя двойной кутикулярно-кремниевый защитный слой на поверхности листьев. В дополнение к этому накопление кремния происходит также в эпидермисе и проводящих тканях стебля, листьев, корней и оболочки зерен (Ма и др, 2006).

Эти накопление кремния позволяет растениям выживать в условиях действия абиотических и биотических стрессов.

#### Транспорт кремния в растении.

Результаты исследований (Матыченков, 2008) свидетельствуют о наличии у растений механизма, обеспечивающего активное и быстрое перераспределение кремния по растительным тканям. При этом перенос Si идет в ткани, которые в большей степени подвержены стрессу. Этот вывод подтверждают работы японского исследователя Ма (1990, 2006). Он показал, что у риса существуют специальные транспортные белки, отвечающие за транспорт кремния. В ДНК был обнаружен и определен фрагмент, отвечающий за синтез этих белков. Предполагают, что не только в рисе, но и в других растениях имеется аналогичный механизм, отвечающий за обеспечение растения кремнием и его транспорт (Ma et al., 2006).

В диссертации российского ученого В.В. Матыченкова (2008) приведены доказательства наличия активного поглощения и перераспределения кремния в растениях (не кремнефильного апельсина). Результаты показали, что общее содержание кремния в листьях, инфицированных грибом, значительно выше, чем в здоровых.

Наглядное подтверждение накопления кремния в пораженных местах растений показано на Рис.3: накопление кремния (Si) совпадает с присутствием возбудителя мучнистой росы (*E. Cichoracearum*) на листьях растений (*A. Thaliana*), обработанных кремнием. (F. Fauteux et al. 2005).

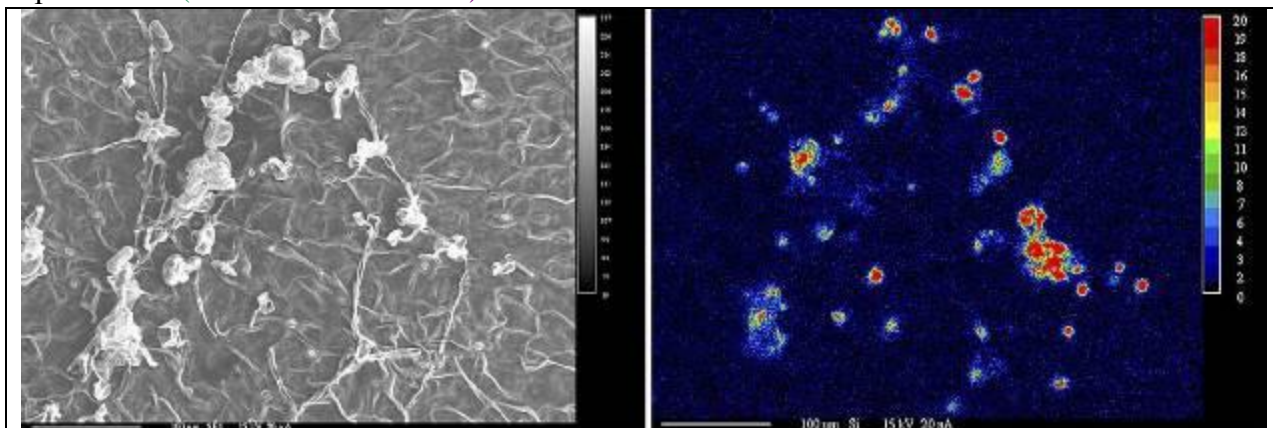


Рис. 3. Изображения электронного (слева) и рентгеновского (справа) микроскопа показали, что накопление кремния (Si) совпадает с присутствием *E. cichoracearum* на листьях *A. thaliana*, обработанных кремнием.

Концентрация Si обозначается цветом (см. шкалу): красный показывает высокую концентрацию, а черный - низкую.

Источник: FEMS Microbiol. Lett. 2005; 249, 1–6

#### Функции кремния в растении.

Положительная роль кремния в стимулировании роста и развития многих растений общепризнанна - кремний оказывает существенное влияние на их рост и развитие, повышает урожайность и улучшает качество продукции. При этом положительный

эффект кремния особенно заметен у растений в стрессовых условиях. (Эпштейн, 1994, 1999, 2009; Ма, 2004, 2006).

Кремний придает растениям механическую прочность, укрепляет стенки эпидермальных клеток и предотвращает полегание, обеспечивая жесткость различных органов растения. Однако исследования последних лет указывают на необходимость пересмотреть устоявшиеся взгляды на роль кремния исключительно как структурного элемента клеточных стенок или инертного балласта (Матыченков В.В., 2008).

Доказано, что кремний в оптимальных дозах способствует лучшему обмену в тканях азота и фосфора, повышает потребление бора и ряда других элементов; обеспечивает снижение токсичности избыточных количеств тяжелых металлов. Оптимизация кремниевого питания растений приводит к увеличению площади листьев и создает благоприятные условия для биосинтеза пластидных пигментов. В таких условиях у растений формируются более прочные клеточные стенки, в результате чего снижается опасность полегания посевов, а также поражения их болезнями и вредителями. (Кемечева М.Х., 2003)

Одной из важных функций активных форм кремния является стимуляция развития корневой системы (Кудинова, 1975; Adatia, Besford, 1986; Матыченков, 2008). Исследования на злаковых, цитрусовых, овощных культурах и кормовых травах показали, что при улучшении кремниевого питания растений увеличивается количество вторичных и третичных корешков на 20–100% и более. Дефицит кремниевого питания служит одним из лимитирующих факторов развития корневой системы растений. Установлено, что оптимизация кремниевого питания повышает **эффективность фотосинтеза и активность корневой системы** (Matichenkov et al., 2004; Иванов и др. 2005; Wang S. Y. и др, 1998).

Особенную и удивительную роль кремний играет в повышении устойчивости растений к стрессам различной природы (как биотическим, так и абиотическим). Исследования и выводы ведущих мировых ученых в последнее десятилетие выдвигает именно это свойство кремния на первое место (Liang Y., 2007; E. Epstein, 2009; Heather A. Currie, 2007; Матыченков, 2008; и др.)

Рассмотрим более детально особую роль кремния в повышении устойчивости растений к стрессам.

#### [Роль кремния в формировании стрессоустойчивости.](#)

Почему, несмотря на то, что до сих пор кремний не отнесен к жизненно необходимым элементам (хотя в ближайшее время это должно измениться в связи с предложенной Э. Эпштейном новой формулировкой самого понятия «жизненно-необходимый элемент»), практика сельского хозяйства многих стран в последнее время показывает значительную эффективность кремниевых удобрений и рост их потребления на 20-30% ежегодно?

Какую же роль эволюция отвела этому элементу?

Ответ:

**Роль кремния в растениях, прежде всего в защите от неблагоприятных воздействий окружающей среды – как биотических, так и абиотических (Эпштейн, 2009).**

При выращивании в искусственных благоприятных условиях растения практически не нуждаются в кремнии. Но выход в реальный мир резко меняет среду обитания растения: вредители, патогенные грибки, засуха и жара – вот только некоторые опасности окружающие растения в полевых условиях.

Учитывая это, необходимо делать существенное разграничение при рассмотрении роли кремния для растений в благоприятных условиях и тех же растений, находящихся под действием различных стрессов (т.е. в реальных полевых условиях)

Кремний выполняет свои функции двумя способами: путем полимеризации кремниевой кислоты, что приводит к образованию аморфного гидратированного кремнезема, и играя важную роль в образовании органических защитных соединений (Эпштейн, 2009).

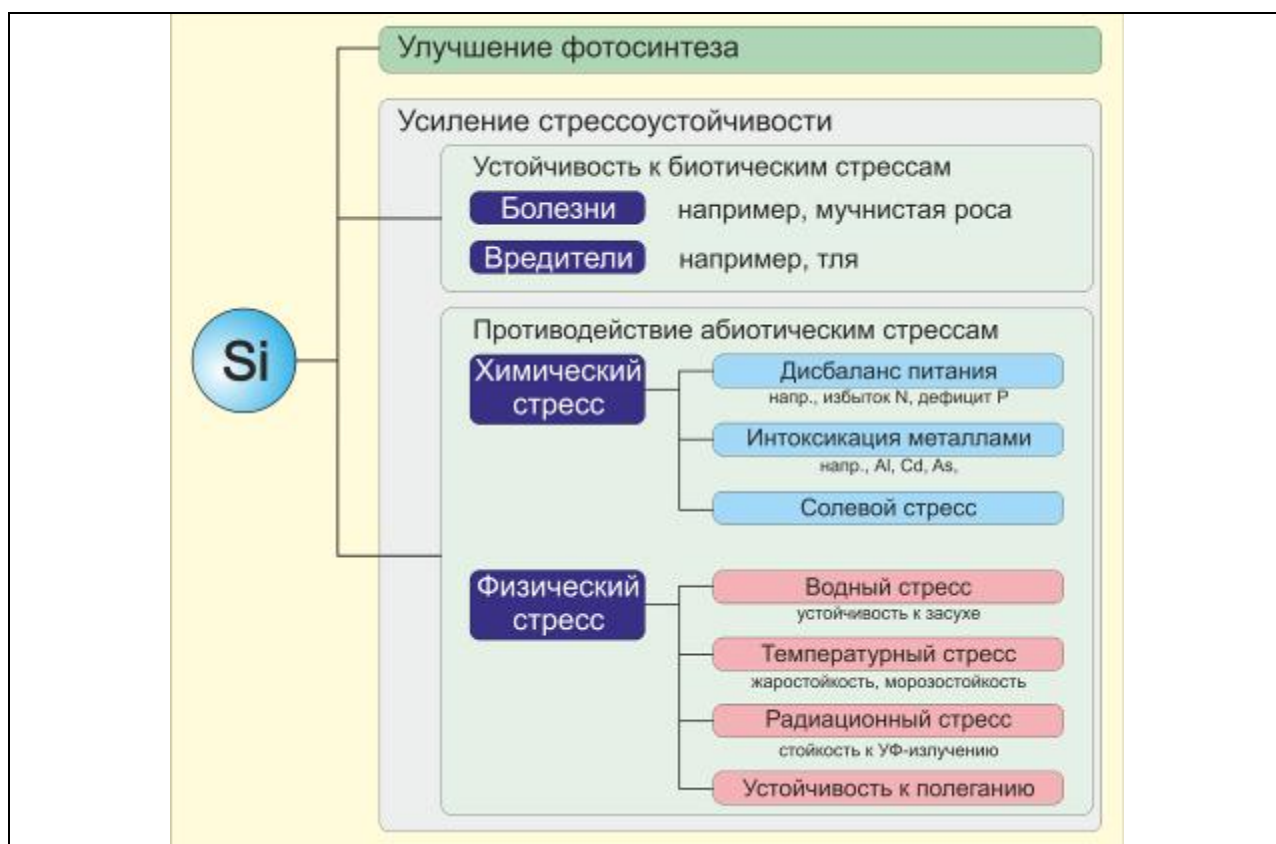


Рисунок 4. Положительное влияние кремния на рост и развитие растений обеспечивается повышением устойчивости к биотическим и абиотическим стрессам. Источник: Trends Plant Sci. 2006 Aug; 11(8):392-7.

Растения, хорошо накапливающие кремний, находятся в лучшем положении, поскольку этот элемент повышает устойчивость к стрессам. Если мы хотим повысить стрессоустойчивость растения, необходимо обеспечить растения кремнием, независимо от того, являются ли эти растения однодольными или двудольными. Значение кремния особенно проявляется на рисе: низкая концентрация Si приводит к значительному снижению урожайности и качества риса (рис. 6) (Ma, 2006).

### Виды стрессов.

Как известно, **стрессы растений принято подразделять на два вида: биотические и абиотические**. Рассмотрим более подробно природу этих стрессов и ответные реакции растений на них.

Что же растения могут сделать, чтобы защитить себя от негативных внешних воздействий? Очевидно, что убежать от опасности (как животные) растения не могут. Не могут они также рычать, чтобы отпугнуть «обидчика». Растения имеют два основных способа защиты: физический и химический.

Физическая защита подразумевает наличие шипов, колючек, прочного эпидермального слоя и т.п. При этом эта «броня» многих растений представляет собой кремнезем, накопленный в клеточных стенках (Эпштейн, 2009). Существует множество доказательств, что именно кремний играет важную роль в защите растений от вредителей. Упрочнение клеточных стенок путем биоминерализации кремниевых соединений

является одним из механизмов, которым эта защита осуществляется. Это действует как физический барьер для насекомых, патогенных микроорганизмов, а иногда и травоядных животных.

Химическая же защита гораздо сложнее и растения проделывают огромную работу – синтезируют для этой цели огромное количество «вторичных метаболитов», соединений, которые не являются жизненно необходимыми в обмене веществ в растении, но играющих роль в адаптации и противодействию окружающим условиям. Количество этих разнообразных химических структур огромно; по одной из оценок (Hartmann, 2008) таких веществ более 200 тыс. Эти вещества влияют на взаимодействие растения и организмов, живущих в окружающей среде растения: насекомых, грибов, микробов, вирусов. В этой системе химической защиты принимают участие также и первичные метаболиты, участвующие в основном обмене веществ растения – фитогормоны, органические кислоты и пр. Какова же роль кремния в этой «химической войне»? Именно кремний принимает непосредственное участие в биосинтезе защитных метаболитов и на сегодня этому есть неопровержимые доказательства (Матыченков, 2008). На данный момент исследований, посвященных влиянию кремния на смягчения действия биотических стрессов гораздо больше (Datnoff и др., 2007). Исследования в снижении воздействий абиотических стрессов несколько отстали. Но, тем не менее, имеются также данные о снижении негативного действия жары, засухи, засоления и пр. при оптимизации кремниевого питания (Матыченков, 2008; Эпштейн, 2009).

Отменим большое различие в адресности воздействия биотических и абиотических стрессов. Биотические стрессы в основном воздействуют на часть растения (например, на лист), в то время как абиотические, чаще всего оказывают негативное действие на растение целиком (в крайнем случае, на целый орган растения). И это любопытно и удивительно, что кремний оказывает защитное действие против таких разных по своей природе и адресности стрессов (Эпштейн, 2009).

И хотя ученые еще не имеют четкого представления о всех биохимических и молекулярно-биологических механизмах этого явления, имеющиеся результаты фундаментальных и прикладных исследований позволяют рассматривать кремниевые удобрения как эффективный способ борьбы с различными стрессами растений (как биотическими – вредители, грибковые и бактериальные болезни, так и абиотическими – засуха, высокие и низкие температуры, полегание, засоление, УФ-излучение и пр.).

Многочисленные исследования показали, что кремний является эффективным в борьбе с заболеваниями грибковой и бактериальной природы у различных видов растений. Например, Si увеличивает устойчивость риса к широкому спектру возбудителей грибковых болезней (фузариоз и пр.) и уменьшает заболеваемость мучнистой росой у огурца, ячменя и пшеницы (Ma, 2006).

Положительное влияние кремния наглядно показано на рис. 5. Первые признаки развития болезни наблюдались на контрольных растениях (Si-) через 5 дней после заражения мучнистой росой. Болезнь быстро прогрессировала и после 5 недель контрольные растения были сильно инфицированы (балл инфекции = 3,71). С другой стороны, для Si+ растений степень заражения была очень мала даже после 5 недель (рис. 4) – средний балл инфекции составлял 0,41. Результаты этого исследования убедительно доказывают, что кремний обеспечивает эффективную защиту пшеницы от мучнистой росы, что подтверждает многочисленные наблюдения положительной роли кремния в противостоянии грибковым инфекциям у однодольных (Be'langier RR, 2003).

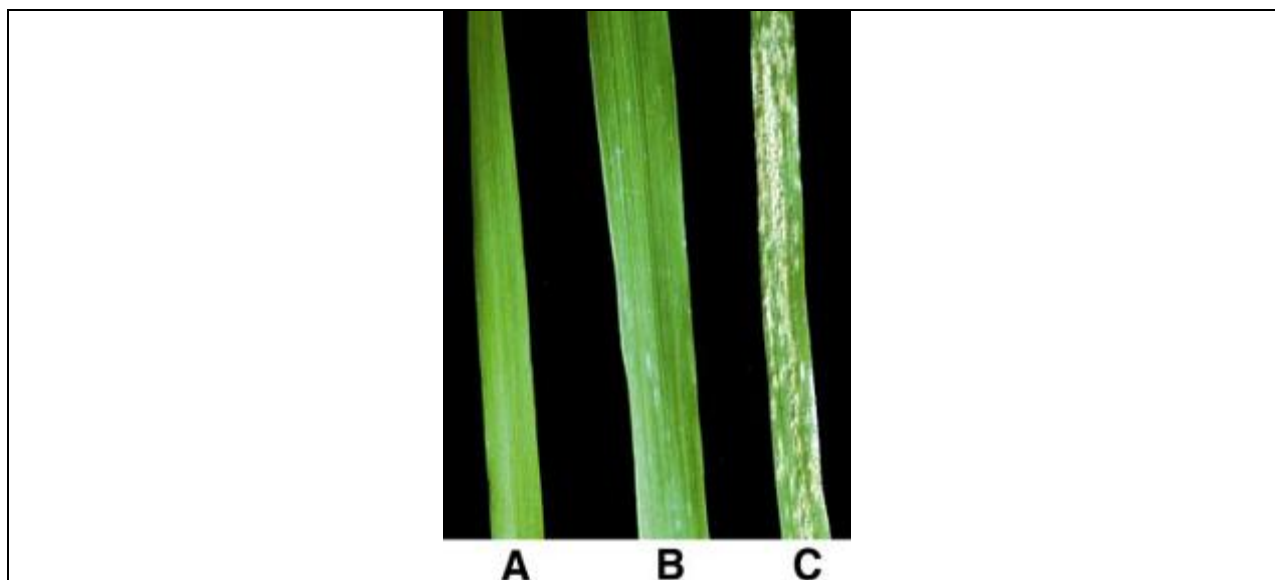


Рис. 5. Влияние кремния (Si+) на развитие мучнистой росы (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*) на листьях пшеницы  
 А - лист без искусственного заражения мучн. росой.  
 В - лист искусственно заражен мучн. росой (Si+).  
 С - лист искусственно заражен мучн. росой (Si-).  
 Источник: *Phytophatology*, 93: 402-412. (2003).

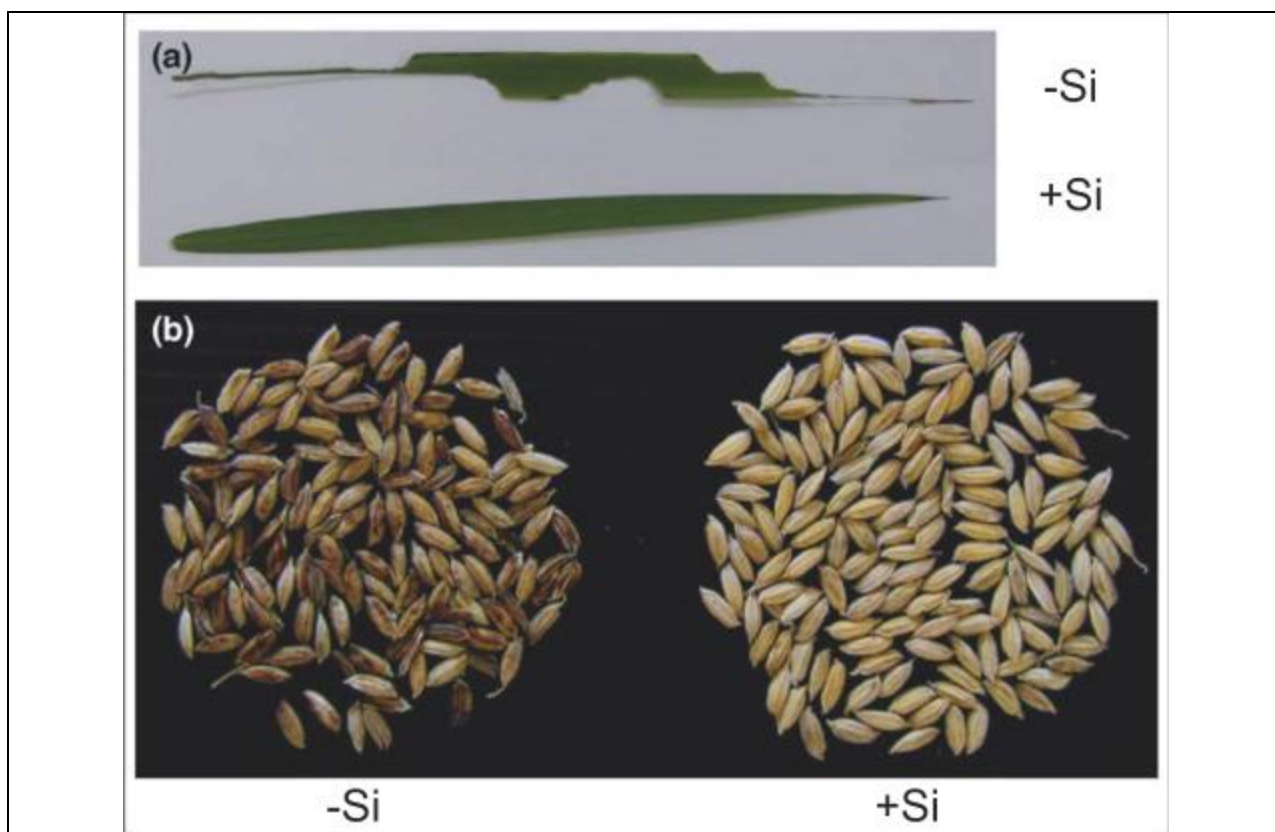


Рис. 6. Влияние кремния (Si) на рост и урожайность риса.  
 (а) растения риса с низким уровнем Si восприимчивы к атакам насекомых,  
 (б) при низком уровне Si в зерне - наблюдается изменение цвета из-за заражения несколькими грибковыми возбудителями.  
 "- Si": Содержание кремния составляет 0,48% в побегах и 1,44% в зернах,  
 "+ Si": Содержание кремния составляет 4,21% в побегах и 8,05% в зернах.  
 Источник: *Trends Plant Sci.* 2006 Aug; 11(8):392-7.

Кремний также повышает устойчивость растений к насекомым-вредителям. На рис.6 показано, что растения с низким уровнем кремния восприимчивы к атакам насекомых (Ma JF, Yamaji N., 2006)

Анализ литературных данных (Матыченков, 2008) свидетельствуют о том, что растение более продуктивно использует влагу при внесении активных форм Si. Известно, что 20-30% находящегося в растении кремния, может участвовать в процессе поддержки внутреннего резерва воды, и это является одним из механизмов, который позволяет растениям выжить в условиях острого недостатка воды. (Матыченков, 2008). Одним из факторов, повышения засухоустойчивости, является способность кремния снижать транспирации и изменять угла наклона листьев растений, обеспечивающие меньший уровень испарения влаги (Эпштейн, 1999, Матыченков, 2008) и увеличением возможностей антиоксидантной защиты растения (Heather A. Currie, 2007).

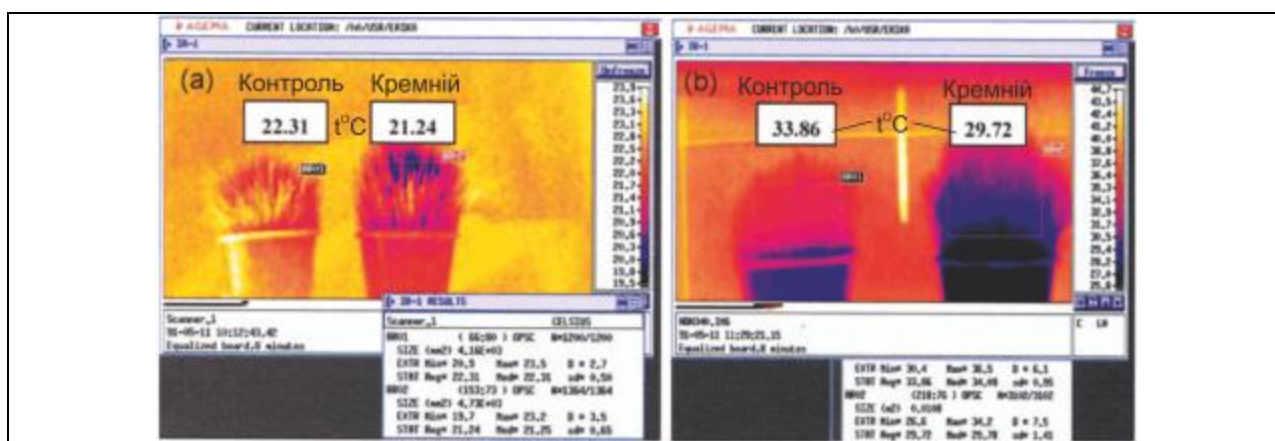


Рис. К3 Инфракрасные тепловые изображения растений после 55 дней нормального развития при комнатной температуре (а) и высокой температуре (б) Растения справа (на каждом из снимков) обрабатывались кремнием, в то время, как растения слева (контроль) были необработанными. (Источник: Applied Physics Letters 87, 194105, 2005)

Кремний существенно влияет на охлаждение листьев растений. Так, исследования показали (Wang и соавт., 2005), что обработка листьев кремнием снимает тепловую нагрузку в условиях высоких температур и значительно снижает температуру листьев – на 3-4 °C (см. рис. К3). После 55 дней развития в нормальных условиях, растения помещали в боксы с температурой 35-40 °C; через 20 дней необработанные растения пожелтели и погибли, тогда как обработанные, хоть и были угнетены, после установления комнатной температуры возобновили вегетацию. Установлено, что после обработки листьев кремнием в эпидермисе формируются биокремниевые структуры (Рис.К4). Таким образом, внекорневое применение кремния является перспективным и экологически чистым методом повышения засухо- и жаростойкости растений.

Имеются также исследования, доказывающие значительную роль кремния в формировании морозостойкости растений, в частности озимой пшеницы разных сортов (Yongchao Liang и др, 2008), риса и др. (Матыченков, 2008).

Кремний также снижает вредное воздействие УФ-излучения (Ma JF, 2006)

Объяснения защитной роли кремния в растениях описаны в литературе. В частности, это утолщение эпидермального слоя, возрастание химической устойчивости ДНК, РНК и молекул хлорофилла, функциональная активация клеточных органелл, оптимизация транспорта и перераспределения веществ внутри растения и др. Предполагается также наличие некоего общего универсального механизма повышения их устойчивости к стрессам (не отрицая наличия всех перечисленных механизмов). Этот механизм



обусловлен способностью поликремниевых кислот осуществлять направленный каталитический синтез органических веществ (стресс-ферментов, антиоксидантов специфической и неспецифической природы или промежуточных соединений, которые необходимы для метаболического синтеза этих молекул) при нормальных условиях. (Матыченков, 2008).

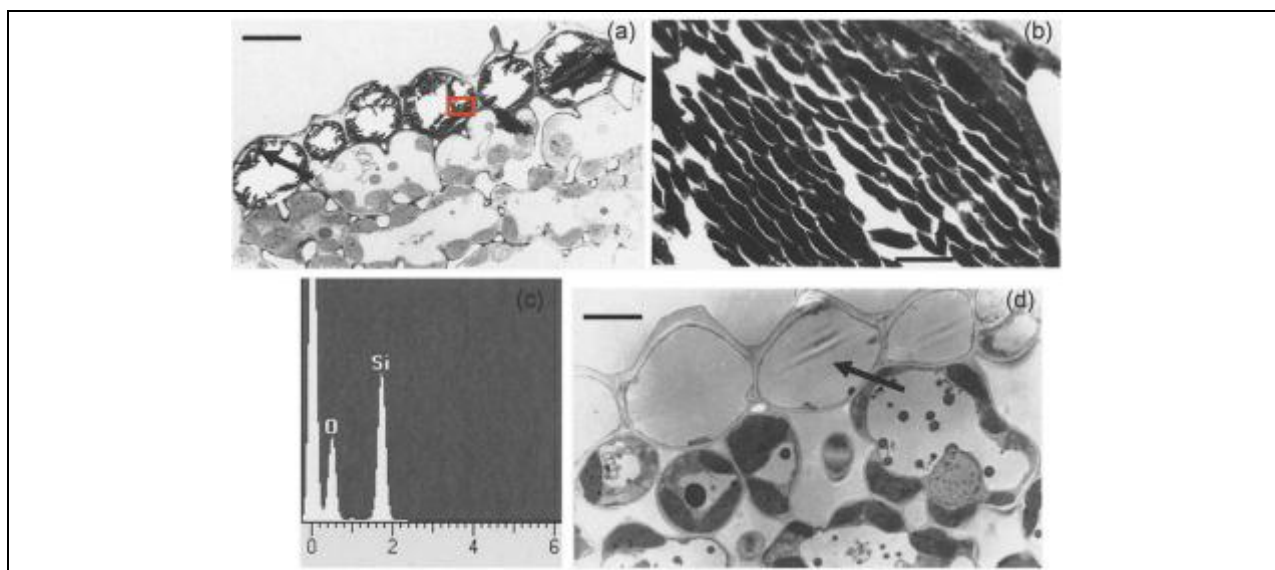


Рис. К4. Изображение листьев растений под электронным микроскопом после обработки кремнием.

а) биокремниевые соединения, образовавшиеся в клетках эпидермиса листьев – показано стрелками.

б) увеличенное изображение красной обл.

с) рентген-спектр, подтверждающий наличие кремния - Si.

д) На контрольных (необработанных) растениях очень незначительное количество кремниевых структур Масштаб: а-10мкм; б-0.7мкм; д-5мкм.

(Источник: Applied Physics Letters 87, 194105, 2005)

Кремний повышает уровень сопротивляемости растений к любым стрессам и не оказывает токсичного влияния на организм. Таким образом, основной функцией кремния в растении может быть увеличение устойчивости организма к неблагоприятным условиям, выражающееся в утолщении эпидермальных тканей (**механическая защита**), ускорении роста и развития корневой системы (**физиологическая защита**), связывании токсичных соединений (**химическая защита**) и увеличении биохимической устойчивости к стрессам (**биохимическая защита**) (Матыченков, 2008), снижении действия высоких температур (**тепловая защита**) (Wang и соавт., 2005).

Разнообразие растений, демонстрирующих положительный отклик на внесение соединений кремния, доказывает, что все эти механизмы характерны как для кремнефилов, так и для некремнефилов (Матыченков, 2008).

На сегодняшний день мировые ученые еще далеки от полного понимания роли кремния жизнедеятельности растений. Однако многочисленные исследования последних лет раскрывают и показывают многообразие механизмов положительного действия кремния на рост и развитие растений, и их сопротивляемость к всевозможным стрессам.

#### Вместо заключения.

Значительный рост числа фундаментальных и прикладных исследований в области кремния в последнее время свидетельствует о том, многие механизмы действия кремния еще не изучены или не доказаны.

Мы, занимаясь разработкой и производством данных препаратов, уже имеем первые научные и практические результаты применения кремнийсодержащих удобрений в Украине. В институте биоэнергетических культур и сахарной свеклы НААН под руководством академика Заришняка А.С. и к.с-х н Иванины В.В. проводились исследования по изучению влияния кремнийсодержащих удобрений на урожайность сахарной свеклы по разным схемам применения в условиях недостаточного увлажнения Лесостепи Украины. Прирост урожайности колеблется в пределах 2,2 -5,5 т/га, или 5,5 – 13,8% в сравнении с контролем. Также отмечается повышение содержания сахара в корнеплодах на 0,5-0,8%. В НИВиВ «Магарач» под руководством к.с-х. н Бейбулатова М.Р. проводились исследования на виноградниках Крыма. В частности, изучали фунгицидные свойства кремниевых удобрений. Обработанные варианты значительно лучше по фитосанитарному состоянию: без поражений, при поражении на контроле – 3 балла.

Учитывая, что кремний особую важность приобретает для растений в условиях стресса (а засуха, жара и т.д. являются для нашей страны рядовым явлением), применение кремниевых удобрений по нашему мнению станет в ближайшие 3-7 лет в Украине частой практикой. Мы надеемся, что отечественная наука не обойдет стороной данный вопрос и внесет весомый вклад в его изучение.

### Благодарности.

Авторы выражают огромную признательность **академику НААНУ, д.с-х.н, Заришняку А.С., к.с-х.н. Иванине** за проведение исследований по изучению эффективности кремнийсодержащих удобрений на сахарной свекле, **д.б.н., Матыченкову В.В.** за предоставленную диссертационную работу и ответы на некоторые вопросы по теме статьи, **к.с-х.н., Бейбулатову М.Р.** за проведение исследований по изучению эффективности кремнийсодержащих удобрений на виноградниках.

### Список использованной литературы.

- E. Epstein. Silicon: its manifold roles in plants. *Ann Appl Biol* 155 (2009) 155–160
- М. П. Колесников. Формы кремния в растениях. *Успехи биологической химии*, т. 41, 2001, с. 301—332
- Heather A. Currie, Carole C. Perry. Silica in Plants: Biological, Biochemical and Chemical Studies. *Ann Bot.* 2007 December; 100(7): 1383–1389.
- Liang Y, Sun W, Zhu Y-G, Christie P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental Pollution* 2007. 147: 422–428.
- Richmond, K.E. and Sussman, M.. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. *Curr. Opin. Plant Biol.* 6, 268–272, 2003
- E. Epstein. The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* Vol. 91, pp. 11-17, 1994
- Матыченков В. В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва-растение : дис. ... д.б.н. - Пушино, 2008.
- Ma JF, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Sci.* 2006 Aug; 11(8):392-7.
- Yongchao Liang и др.. Role of silicon in enhancing resistance to freezing stress in two contrasting winter wheat cultivars. *Environmental and Experimental Botany* (December 2008), 64 (3), pg. 286-294
- Wang L, Nie Q, Li M, Zhang F, Zhuang J, Yang W, et al. Biosilicified structures for cooling plant leaves: a mechanism of highly efficient midinfrared thermal emission. *Applied Physics Letters* 2005; 87:194105.
- Fauteux, F. et al. Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. *FEMS Microbiol. Lett.* 2005; 249, 1-6.
- S. Y. Wang, G. J. Galletta. Foliar application of potassium silicate induces metabolic changes in strawberry plants. *Journal of Plant Nutrition.* Vol. 21, Iss. 1, 1998
- Довгун В. Б. Влияние кремния и кобальта на урожай и качество льна-долгунца и дайкона : диссертация ... к.б.н. - Москва, 2008.- 135 с.
- Кемечева М.Х., Роль кремниевых удобрений в повышении продуктивности риса на луговых почвах левобережья р. Кубани : диссертация ... к.с-х.н. : 06.01.04 Майкоп, 2003 132 с.
- Coradin T, Desclés J, Luo G-Z, Lopez PJ. Silicon in the photosynthetic lineages: molecular mechanisms for uptake and deposition. In: Teixeira da Silva JA, ed. *Floriculture, ornamental and plant biotechnology: advances and topical issues.* London, UK: Global Science Books, 101–107. 2006.

- Wassersleben S. Metall-Detoxifizierung durch Silizium in Silene und Arabidopsis. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr. rer. nat. vorgelegt an der Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. 2005.
- Gong, H.J., Zhu, X.Y., Chen, K.M., Wang, S.M., Zhang, C.L., 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Sci.* 169, 313-321.
- Ma, J.F., Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci. Plant Nutr* 50, 11-18. 2004.
- Bé langer RR, Benhamou N, Menzies JG. Cytological evidence of an active role of silicon in wheat resistance to powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. tritici). *Phytopathology*, 93: 402-412. (2003).
- Rémus-Borel W, Menzies JG, Bé langer RR. Silicon induces antifungal compounds in powdery mildew-infected wheat. *Physiol Mol Plant Pathol.* 2005;66:108–115.
- Звіт про НДР «Ефективність позакореневого внесення мікродобрива "Квантум-Аквасил" на цукрових буряках», Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків, 2011
- Отчет о НИР «Исследования эффективности применения препаратов «Квантум» на винограде», НИВиВ «Магарач», 2011