

УДК 631.811.93:635.21

ДОСТУПНЫЙ ДЛЯ РАСТЕНИЙ КРЕМНИЙ – ФАКТОР УСТОЙЧИВОГО ПРОИЗВОДСТВА КАРТОФЕЛЯ

© 2021 г. Е. В. Безручко^{1,2,*}, Л. С. Федотова¹

¹ Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха
140051 Московская обл., Люберецкий р-н, п. Красково, ул. Лорха, 23 лит. В, Россия

² ООО “АГРОГАЛАКТИКА”
107078 Москва, п. Орликов, 5, Россия

*E-mail: ae-agro@mail.ru

Поступила в редакцию 24.03.2021 г.

После доработки 31.03.2021 г.

Принята к публикации 11.05.2021 г.

Проанализированы результаты исследований, проведенных с целью изучения влияния кремния на продуктивность, устойчивость к болезням и вредителям, изменение метаболизма картофеля. Представленный материал базируется на данных 41 научной публикации, охватывающих период с 2006 до 2020 г. и широкую географию (13 стран). Рассмотрены преимущества и недостатки различных источников кремния: отходов промышленности (шлаков), цеолита, диатомита, силикатов, стабилизированной кремниевой кислоты, нанокремния. Сделан вывод, что можно однозначно характеризовать кремний как элемент, способствующий росту урожайности и повышению качества картофеля, прежде всего за счет обеспечения большей стрессоустойчивости этой культуры. Это позволяет рекомендовать кремнийсодержащие удобрения в качестве элемента интегрированной системы питания и защиты картофеля с целью повышения уровня экологической стабильности его возделывания.

Ключевые слова: картофель, кремний, цеолит, диатомит, силикаты, кремниевая кислота, нанокремний, кремнийсодержащие удобрения, урожайность, качество, устойчивость к неблагоприятным факторам.

DOI: 10.31857/S0002188121080032

ВВЕДЕНИЕ

Признание кремния как необходимого и существенного элемента для сельскохозяйственных культур произошло относительно недавно. Статус кремния как “функционального” питательного вещества для растений позволяет рассматривать его применение с точки зрения повышения устойчивости растений к биотическим и абиотическим факторам с последующим увеличением урожайности, особенно восприимчивых сортов.

Опосредованная кремнием устойчивость растений к стрессам обеспечивается несколькими путями. Благотворное действие Si, во-первых, связано с его высоким отложением в тканях растений, что повышает их жесткость. Механическая прочность уменьшает полегание и вероятность инвазии со стороны насекомых и патогенов, улучшает ориентацию растения относительно света (архитектонику), и, следовательно, эффективность использования солнечной энергии. Высказываются также предположения, что осаждение

Si в тканях растения уменьшает кутикулярную транспирацию, тем самым повышая устойчивость к низким и высоким температурам, радиации, ультрафиолетовому излучению и стрессу от засухи. Во-вторых, защитой от неблагоприятных факторов является активация кремнием внутриклеточного синтеза специфических органических соединений, определяющих эндогенный защитный ответ самого растения [1–5].

Годичное потребление кремния растениями на Земле, по расчетам российских ученых, составляет 210–224 млн т, что в 1.5 раза больше потребления растениями фосфора [6]. Недооценка кремния как элемента питания основана на наличии большого количества SiO₂ и силикатов в большинстве почв и, соответственно, на уверенности в его достатке для культур. Между тем у большинства видов растений отмечен дефицит этого элемента. Причины этой проблемы заключаются в следующем: 1 – растениям нужна кремниевая кислота, а не сам “кремний”, 2 – концентрация монокремниевой кислоты в почве очень

низкая, 3 – превращение силикатов и SiO_2 в кремниевую кислоту является очень ограниченным процессом, 4 – кремниевая кислота является нестабильной молекулой с высокой склонностью к агрегации/полимеризации, 5 – из-за существенного выноса кремния сельскохозяйственными культурами ежегодно отчуждается значительное количество доступного кремния из пахотных земель [7–10].

Урожайность многих сельскохозяйственных культур часто является недостаточной и неустойчивой из-за различных негативных факторов. Отсутствие севооборота, нерациональное питание растений, неэффективные меры контроля болезней и вредителей, ограниченность ресурсов усугубляют проблемы растениеводства в целом и картофелеводства в частности.

Картофель, как продовольственная культура, занимает 4-е место в мире, по данным продовольственной и сельскохозяйственной службы ООН [11]. Картофель выращивают более чем в 125 странах, и более 1 млрд человек во всем мире потребляют его ежедневно [12]. На его долю приходится $\approx 20\%$ посевных площадей в мире и $\approx 15\%$ мировой продукции [13].

Картофель накапливает достаточно большое количество кремния в тканях: в клубнях содержится в среднем $2.0\% \text{SiO}_2$, в ботве – 4.3% на сухое вещество. Урожай картофеля в 200 ц/га выносит из почвы >250 кг кремния [14]. В связи с этим кремниевые удобрения на сегодняшний день позиционируются как дополнительный элемент технологии возделывания этой культуры. Цель работы – анализ литературных данных о влиянии доступных форм кремния для растений картофеля на урожайность, качество продукции и устойчивость культуры к неблагоприятным факторам среды.

ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ

Анализ научной литературы демонстрирует противоречивые данные относительно влияния кремния на рост и развитие картофеля и на его устойчивость к неблагоприятным факторам. Например, в эксперименте, проведенном в Бразилии, не было подтверждено влияние силиката калия на снижение поражаемости картофеля фитотфлорой [15]. Аналогично не было выявлено достоверных различий в интенсивности инвазии тлей и жуками (*D. speciosa* и *M. persicae*) между необработанными и обработанными кремнием растениями картофеля [16].

Однако большинство источников информирует о достоверном положительном влиянии кремниевых удобрений на различные показатели: рост, развитие, урожайность, качество, поражение болезнями и вредителями, засухо- и солеустойчивость картофеля.

Значительное внимание в работе различных авторов уделено роли кремния в смягчении разного вида стресса растений, поскольку это – одно из наиболее серьезных экологических ограничений для роста и продуктивности растений, зачастую вызывающее серьезные изменения в морфологии, физиологии и биохимии растений, например, снижение скорости фотосинтеза, разрушение пигментов, дисбаланс поглощения воды и питательных веществ, окислительное повреждение клеточных компонентов.

Существует много источников кремния, пригодных для использования в растениеводстве. Однако целесообразность их применения зависит от многих факторов: их реакционной способности, общего и биодоступного содержания Si, содержания потенциально опасных примесей, стоимости и технологичности [2, 17].

Изначально исследованиям подвергали кремнийсодержащие природные породы и отходы промышленности (цеолиты, силикаты, диатомовую землю, шлаки) как наиболее доступные в период отсутствия коммерческих кремниевых продуктов.

В большинстве исследований фигурирует внутрипочвенное применение этих агроруд. При внесении в почву кремний связывает почвенные частицы, что повышает их агрегацию, влагоемкость и буферность. Коагуляция почвенных коллоидов увеличивает водопроницаемость почв, а сорбирующие свойства позволяют уменьшать вымывание основных элементов питания и пролонгировать их действие.

Например, в ЮАР была проверена реакция растений картофеля, выращиваемых в теплице в контейнерах, на применение в качестве почвенной добавки извести и кремнийсодержащего шлака. Растения, обогащенные шлаком, демонстрировали увеличение массы клубней в сравнении с произвесткованным вариантом [18].

Другой тепличный эксперимент, также проведенный в ЮАР, показал, что почвенное внесение кремнийсодержащих мелиорантов (пыли, шлака, золы) привело к снижению количества микросклероций возбудителя вертициллеза в стеблевом материале на 50, 96 и 100% соответственно вариантам. В то же время параллельная обработка извесью привела к увеличению этого показателя на

91%. Клубни, полученные в варианте с внесением кремниевой пыли, при дальнейшем выращивании имели на 57% меньше симптомов пожелтения и увядания по сравнению с необработанным контролем [19].

Еще одно исследование в ЮАР было проведено с целью изучения влияния кремния на фенолообразование в клеточных стенках картофельной кожуры и связанную с этим устойчивость клубней к бактериальной инфекции мокрой гнили (возбудитель *Pectobacterium carotovorum* subsp. *Brasiliensis*). Были протестированы следующие варианты: 1 – контроль с патогеном и без него, 2 – добавление шлака (30% Si) в почву с патогеном и без него, 3 – добавление извести в почву (в качестве контроля pH) с патогеном и без него. При уборке урожая клубни картофеля очищали от кожуры и извлекали из нее общий фенол. Было обнаружено, что растения, получившие Si, имели значительно более высокие уровни содержания общих фенольных соединений, чем контрольные растения. Результаты показали, что величина pH не играла никакой роли в производстве фенола, однако содержание кальция в почве, по-видимому, влияло на концентрацию фенолов в клубнях [20].

ПРИМЕНЕНИЕ ФОРМ ДОСТУПНОГО КРЕМНИЯ КАК УДОБРЕНИЙ ДЛЯ КАРТОФЕЛЯ

Однако, несмотря на техническую необходимость утилизации шлаков и высокое содержание в них кремния, важным ограничением их применения является возможный высокий уровень содержания в них тяжелых металлов (ТМ), связанный с происхождением или переработкой [21]. ТМ не только токсичны для растений, но и несут в себе риск загрязнения почв и природных вод. Точно также отходы цементного производства могут содержать ТМ [22, 23].

Поэтому более перспективными источниками кремния являются природные мелиоранты – цеолит и диатомовая земля (диатомит), а также силикаты калия, кальция и магния. Именно их изучению посвящено большое количество исследований.

В Бразилии была проверена эффективность 2-х вариантов – силиката кальция и магния и доломитового известняка на фоне дефицита воды. Кремнийсодержащий мелиорант проявил большую эффективность в увеличении доступного фосфора. Влияние на остальные элементы питания было незначительным. Также было обнаружено, что применение силиката уменьшало полегание

картофеля на 72% в сравнении с применением известняка при полноценном водообеспечении и на 31% – в условиях нехватки воды. Растения варианта с силикатами отличались большей высотой. Это совместно с лучшей архитектурой растений, по мнению авторов, привело к большей продуктивности, поскольку значительно крупные и вертикальные растения обеспечивали большую площадь листьев и были более эффективными в улавливании света. Эта гипотеза подкреплена тем фактом, что увеличение урожайности в основном было связано с большей средней массой клубней в результате большей продукции фотоассимилятов, а не с увеличением их количества. Применение силиката дало преимущество в урожайности в 17% в отсутствии стресса и 11.4% – при моделировании засухи. Количество сухого вещества в вариантах оставалось неизменным. Концентрация пролина в листьях повышалась как при засухе, так и при высоком уровне содержания кремния, что свидетельствовало о влиянии кремния на процесс осмотической регуляции растений [24].

В России и Белоруссии накоплен опыт применения цеолитов. Самым обширным месторождением цеолитов является Хотынецкое (г. Орел). Изучение действия цеолитов на картофель было проведено в нескольких регионах. Были получены положительные отзывы.

В Белоруссии внесение вразброс под зябь хотынецкого цеолита в дозах 300 и 600 кг/га повышало урожайность 3-х сортов картофеля в среднем на 19 и 27% соответственно. При локальном внесении цеолитов в дозах 300 и 330 кг/га урожайность 5-ти сортов повысилась в среднем на 12.5%. Также было отмечено действие цеолита на улучшение товарных и биохимических показателей качества продукции [25].

В республике Татарстан внесение дополнительно к минеральным удобрениям цеолита в дозе 900 кг/га снизило плотность почвы по сравнению с контролем. В этом же варианте площадь листьев увеличилась в 1.28 раза, а содержание ТМ в клубнях снизилось: свинца – на 28.0, цинка – на 33.9, меди – на 9.1, мышьяка – на 30.5 и кадмия – на 50%. Наибольшая урожайность продовольственного картофеля также была зафиксирована в варианте с внесением минеральных удобрений и цеолита в дозе 900 кг/га, прибавка урожая к контролю составила 12.6 т/га. Использование цеолита в дозах 600–900 кг/га на фоне минеральных удобрений повысило содержание крахмала на 0.43%, сухого вещества – на 0.77–0.93%, количество нитратов снизилось на 5.6–8.3 мг/кг [26].

Работа, проведенная в Московском регионе, выявила, что добавка этого же цеолита в состав удобрения марки NPK 6.5 : 9.5 : 9.5 (соотношение 1 : 1.5 : 1.5) обеспечивала повышение продуктивности картофеля на 17.5%, относительно минерального удобрения марки NPK 10 : 20 : 20 (соотношение 1 : 2 : 2) несмотря на существенное снижение нормы расхода основных питательных элементов с 200 до 160 кг д.в./га [27].

Внесение порошка аморфного кремнезема в работе бразильских ученых также выявило кремний-опосредованное повышение эффективности использования фосфора за счет увеличения доступности этого элемента в почве и изменения его метаболизма в растении [28].

Этот эксперимент подтвердил данные, полученные индийскими учеными. Они продемонстрировали, что применение диатомита (150 кг/га) на фоне 50%-ного снижения рекомендованной дозы NPK дало прибавку урожая картофеля в 38.7%, а на фоне полной рекомендованной дозы NPK – 12.9%. Снижение эффективности во втором случае ученые связали с более высокой заболеваемостью фитофторозом, вызванной внесением высокой дозы азотных удобрений. Применение диатомита значительно снизило заболеваемость фитофторозом картофеля: от 37.7 до 9.4% в различных вариантах [29].

Диатомит (диатомовая земля) является хорошим источником кремния для растений и тоже находит достаточно широкое применение. Его преимуществом по сравнению с силикатами и цеолитом является большая биодоступность, поскольку он представляет из себя аморфный кремнезем, который растворяется легче, чем кристаллический. Кроме этого, диатомит проявляет свойства адсорбента и влагоудерживающего агента без вероятности заболачивания в условиях избыточного увлажнения [8].

В Египте изучение влияния внекорневой обработки картофеля силикатом калия (2, 4 и 6 г/л), диатомитом (10, 15 и 20 г/л) и экстрактом морских водорослей (3, 4 и 5 мл/л) показало, что наибольшие показатели роста и развития растений (длина стебля, количество стеблей и листьев, сырая и сухая масса листьев) были получены при применении диатомита в дозе 20 г/л и силиката калия в дозе 6 г/л. Эти же дозы диатомита и силиката калия обеспечили самый высокий общий и товарный выход клубней. Средняя масса клубней, удельный вес, содержание хлорофилла, азота, фосфора и калия в листьях и крахмала в клубнях были максимальными при использовании диатомита в дозе 20 г/л [30].

В Бразилии применение диатомовой земли (DE) при поливе и опрыскивании картофеля в лабораторных условиях выявило ее инсектицидную активность в отношении тыквенного жука (*Diabrotica speciosa*). Было протестировано 3 варианта: 1 – контроль, 2 – внесение сухой диатомовой земли (0.5 г/сосуд) и 3 – фолиарная обработка 1%-ным раствором DE. Картофель обрабатывали через 30 сут после посадки. В результате было отмечено снижение количества повреждений листьев через 24 и 48 ч после обработки независимо от способа применения DE. Через 72 ч снижение наблюдали только при применении порошкообразной DE [31].

При составлении рекомендаций почвенного применения кремнийсодержащих удобрений или мелиорантов следует принимать во внимание известковую способность этих источников Si. Ценность повышения содержания Si в почве может быть перевешена негативным воздействием увеличения pH почвы до уровня, который может поставить под угрозу доступность и растворимость других питательных веществ (в том числе микроэлементов), необходимых для растений. Это особенно важно для почв с нейтральным или щелочным показателем pH. Однако там, где необходимо известкование, источники Si можно использовать в качестве альтернативного метода повышения pH почвы и в то же время увеличения содержания Si.

Кроме этого, несмотря на значительную эффективность описанных кремнийсодержащих добавок их высокая стоимость в совокупности с высокой дозой применения и дорогой логистикой являются ограничением к масштабному использованию.

В связи с установленными преимуществами кремниевых удобрений в растениеводстве и ограничениями, касающимися почвенного применения кремнийсодержащих удобрений или мелиорантов, растет интерес к использованию альтернативных жидких кремниевых составов, поскольку они более технологичны и их можно применять в крупномасштабных системах растениеводства. В качестве источника доступного кремния все более часто рассматривают водные растворы силиката калия и натрия, а также стабилизированную кремниевую кислоту.

ВКЛАД КРЕМНИЯ В УСТОЙЧИВОСТЬ КАРТОФЕЛЯ К НЕБЛАГОПРИЯТНЫМ ФАКТОРАМ СРЕДЫ

Знания о том, что кремний укрепляет клеточные стенки за счет усиления синтеза лигнина и суберина, легли в основу предположения, что по-

скольку кожура картофеля состоит из этих компонентов, то возможен вклад кремния в улучшение качества кожуры, а значит и в улучшение товарности и лежкости клубней. Это было экспериментально проверено в Израиле. Растения картофеля выращивали в теплице в сосудах. В опытные варианты помимо общего питательного раствора вносили раствор силиката натрия 100 мг/л. Через определенный период после появления всходов собирали образцы тканей (листья, стебли, корни, столоны, кожуру и мякоть клубней). Имитацию засухи проводили отключением полива до увядания листьев. Образцы отбирали через 2 сут после повторного подключения системы орошения. Были получены следующие результаты. В геноме картофеля был идентифицирован ген, кодирующий белок-переносчик Si (StSi). Экспрессия этого гена, т.е. непосредственная выработка закодированного в нем функционального белка, была обнаружена только в тканях корней и листьев, причем ее уровень увеличивался в 2 раза относительно контроля у растений, удобренных силикатом натрия в варианте с поливом, и в 5 раз – у растений, которые были удобрены Si на фоне имитации засухи. Кожура клубней картофеля, удобренного силикатом натрия, отличалась морфологическими изменениями (площадь клеток кожуры была больше), а также высоким содержанием кремния и сухого вещества. В образцах, обработанных Si, наблюдали активацию генов биосинтеза суберина: стенки клеток кожи были обогащены окисленными ароматическими фрагментами, что свидетельствовало об усилении лигнификации и суберизации. В мякоти клубней обработанных растений не было обнаружено кремния, равно как и изменений состава сухого вещества [32, 33].

Египетские специалисты показали, что опрыскивание растений картофеля, возделываемых при орошении и находящихся в умеренном стрессе от засухи, силикатом калия в дозировке 2 г/л давало самые высокие показатели площади листьев и флуоресценции хлорофилла, сырой и сухой массы ботвы, общего количества растворимых углеводов и белков, а также свободных аминокислот в листьях растений [34].

Влияние фолиарного применения силиката калия на архитектуру растений картофеля, накопление хлорофилла и урожайность, оценили в опыте, проведенном в Бразилии с применением 5-ти доз K_2SiO_3 : 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 и 1.0%. Показано, что содержание хлорофилла *a*, *b* и их суммы уменьшалось, начиная с дозы 0.4%, затем увеличивалось и при дозе 1% K_2SiO_3 было больше, чем в контроле без опрыскивания. Соотношение хлорофиллов *a* : *b* не обнаруживало значительных ва-

риаций. Увеличение дозы препарата коррелировало с уменьшением угла отхождения листьев картофеля, что улучшало их светоулавливающую способность. Эти параметры имели достоверные отличия от контроля только в период вегетативного роста (оценку проводили на 49-е и 64-е сут после посадки), но не в период клубнеобразования (оценка на 78-е сут). Также было зафиксировано увеличение урожайности картофеля экстра- и товарного классов на 22.4% при применении 1%-ного K_2SiO_3 по сравнению с контролем без опрыскивания. Значительных отклонений в накоплении сухой массы, а также в выходе остальных фракций картофеля в вариантах отмечено не было [35, 36].

Работы, проведенные в Китае, показали, что обработка клубней картофеля силикатом натрия в концентрации 100 мМ усиливала защитные реакции клубней картофеля от сухой гнили, вызванной *Fusarium* spp. Активность пероксидазы, полифенолоксидазы, фенилаланинаммониазы и β -1,3-глюканазы, выработка общего фенола и флаваноидов в тканях клубней после заражения *F. sulphureum* резко возросла именно в обработанных клубнях. Увеличение содержания ферментов указанной группы является важнейшим элементом антиоксидантной защиты организма в ответ на повреждающее воздействие стресса и вызываемой им выработку активных форм кислорода (АФК) [37].

Есть данные по изучению совместного применения кремнийсодержащих соединений со средствами защиты растений с целью снижения доз последних. Опыт российских ученых продемонстрировал, что обработка клубней осенью перед закладкой на хранение 0.3%-ным раствором кремнийсодержащего препарата тетраэтоксисилана (ТЭС) снизила количество больных клубней до 7.9% (против 11.4% в контроле), а смесью фунгицида метаксила с ТЭС – до 2.5%, т.е. до уровня, который всего на 0.9% превысил количество больных клубней при их закладке на хранение осенью. Эффективность одного фунгицида была больше, чем ТЭС (4.9% больных клубней), но меньше его смеси с ТЭС. Следовательно, обработка клубней данной смесью была наиболее результативной. Весенняя обработка клубней показала схожие результаты. Объединение обработки клубней с листовой подкормкой кремнийсодержащим препаратом на основе силиката калия в дальнейшем позволило получить прибавки урожая 31.7 и 34.2% соответственно при осенней и весенней обработке клубней. В этом же опыте оценили эффективность кремнийсодержащего удобрения при его применении по листьям сов-

местно с фунгицидом. Обработка клубней кремнием увеличила урожайность картофеля на 21.2% на фоне опрыскивания вегетирующих растений рекомендованной нормой фунгицида. Использование баковой смеси фунгицид (двукратное снижение дозы) + Si было более результативным, чем применение одного фунгицида в рекомендованной норме. В этом варианте сбор клубней был значительно больше, прибавка составила 37.9%. Однако максимальная урожайность (+65.8%) была получена в варианте с 3-мя обработками: 2 обработки баковой смесью фунгицид + Si и 3-я обработка одним Si. Хорошие результаты получены и в варианте с однократным опрыскиванием баковой смесью и двукратном — Si. В этом варианте урожайность картофеля превысила контроль на 54.8%. Использование кремнийсодержащего препарата и для обработки клубней, и в период вегетации положительно отразилось на товарности (увеличение с 70 до 83%) и на качестве клубней (снижение количество больных клубней в 1.7–2.0 раза) [38].

Препараты на основе силикатов имеют свои недостатки. Они обладают высоким рН, что является ограничивающим фактором, поскольку провоцирует щелочной гидролиз средств защиты растений, совместно применяемых с ними. В настоящее время эту проблему решают с помощью препаратов, получаемых из стабилизированной концентрированной кремниевой кислоты и обладающих нейтральным или кислым рН. Использование этих продуктов позволяет исследовать прямое действие самой кремниевой кислоты [39].

В работе ученых из Бразилии было отмечено, что четырехкратное применение концентрированной стабилизированной кремниевой кислоты (0.8% растворимого Si) снижало распространенность фитофтороза на картофеле на 24.7–44.2% (в зависимости от сорта, ярусности листьев и сопутствующего минерального фона) и черной ножки — на 47–51%, а также повышало урожайность клубней и содержание сухого вещества в них [40].

Опыт, проведенный в Индии на 3-х сортах, состоял в обработке клубней ортокремниевой кислотой и ее применении в качестве фолиарной подкормки. Анализ полученных данных показал, что погружение клубней в раствор препарата перед посадкой (концентрация препарата 1 мл/л) увеличило урожайность на 15%, а внекорневое применение — максимально на 50% в зависимости от дозы. Увеличение урожайности было связано с улучшением физиологических параметров (увеличением содержания хлорофилла, размера листьев, повышением поглощения питательных веществ). Интересно, что доля прироста урожай-

ности (в %) после внекорневого внесения кремнийсодержащего препарата оказалась больше в отсутствие фоновых удобрений, что подтверждало определенную роль кремния в улучшении использования питательных веществ. В дополнение оценили косвенные выгоды, связанные с улучшением качества клубней (уменьшение количества ростовых трещин и внутренних полостей в клубнях), а также снижение заболеваемости болезнями и повреждения вредителями. Расчет показал, что соотношение затрат и выгод при применении препарата в дозе 4 мл/л составило примерно 1 : 6 [41].

Внекорневое применение олигомерной кремниевой кислоты при возделывании картофеля в Нидерландах увеличило урожай клубней на 6.2% и снизило заболеваемость растений фитофторой [42].

Опыт в Бразилии показал, что внесение стабилизированной кремниевой кислоты независимо от способа применения (фолиарное и почвенное), увеличивало площадь листьев и концентрацию пигментов (хлорофилла *a* и каротиноидов), скорость фотосинтеза и транспирацию хорошо увлажненных растений картофеля. При высокой интенсивности света, которая часто встречается в природе, растения могут поглощать больше световой энергии, чем необходимо для фотосинтеза. Перевозбуждение хлорофилла может привести к излишнему образованию синглетного кислорода, который, имея высокую реакционную способность, вызывает повреждения, снижающие эффективность фотосинтеза за счет фотоингибирования. Каротиноиды способны получать энергию возбуждения хлорофилла и тем самым предотвращать образование синглетного кислорода. Следовательно, внесение кремния благодаря увеличению концентрации каротиноидов в листьях картофеля улучшало состояние растений при избыточной инсоляции [43].

Этой же группой ученых был поставлен тепловой эксперимент с целью оценки влияния почвенного и фолиарного внесения стабилизированной кремниевой кислоты на накопление Si, концентрацию питательных веществ и пигментов, а также на газообмен и рост растений картофеля. Опыт состоял из нескольких вариантов: 1 — контроль, 2 — стресс (дефицит воды без внесения Si), 3 — стресс (дефицит воды с внесением в почву растворимого Si), 4 — стресс от дефицита воды с нанесением на листья растворимого Si. Результаты показали, что внесение Si привело к более высокому его накоплению во всем растении, причем некорневая подкормка Si привела к концентрации Si в листьях, а обработка почвы увеличила концентрацию Si во всех частях растения. Кремний независимо от способа применения снижал

содержание пероксида водорода. При этом площадь листьев, содержание пролина, активность каталазы, сухая масса клубней, концентрации хлорофилла *a* и каротиноидов, соотношение хлорофиллов *a* : *b* и урожайность клубней, наоборот, увеличивались до показателей контрольных растений, не испытывавших дефицит воды. Сухая масса листьев и стеблей, концентрация фосфора в листьях, активность супероксиддисмутазы повышались только при некорневой подкормке Si [44].

Группа бразильских ученых в ряде опытов доказала инсектицидный эффект применения кремниевой кислоты на картофеле. Первый опыт был проведен в отношении персиковой тли (*Myzus persicae*). Были опробованы 4 варианта обработки: 1 – некорневые опрыскивания кремниевой кислотой, 2 – удобрение почвы раствором кремниевой кислоты, 3 – некорневая подкормка кремниевой кислотой + удобрение почвы раствором кремниевой кислоты, 4 – контроль без обработки. Через 15 сут после обработок оценили кормовое предпочтение тлей в зависимости от способов применения кремниевой кислоты. Кремниевая подкормка не повлияла на предпочтения тли, однако снизила плодовитость и скорость роста популяции насекомых. Дополнительно было отмечено, что в листьях увеличилось содержание лигнина под действием как корневой, так и некорневой обработки, а содержание дубильных веществ – только под действием комбинированного применения [45].

В следующем опыте этими же учеными была исследована эффективность кремниевой кислоты, примененной совместно с половиной рекомендуемой нормы имидаклоприда. В этом варианте предотвращение колонизации картофеля персиковой тлей было на уровне полной дозировки имидаклоприда без добавления кремния [46].

Несколько позже эта же группа исследователей изучила инсектицидное действие кремниевой кислоты в отношении тыквенного жука (*Diabrotica speciosa*) и листовой минирующей мухи (*Liriomyza* spp.). Были протестированы 5 вариантов: 1 – контроль, 2 – почвенное внесение кремниевой кислоты, 3 – фолиарное внесение кремниевой кислоты, 4 – почвенное внесение кремниевых порошков, 5 – опудривание растений кремневым порошком. Обработки применяли через 20 сут после посадки картофеля. Растения, удобренные кремнием, независимо от способа его применения и источника, имели меньшее количество листьев, поврежденных вредителями, по сравнению с контрольными [47].

Также в Бразилии было проведено сравнение 2-х источников кремния (кремниевой кислоты и диатомовой земли) с необработанным контролем и обработкой пестицидом (ацибензолар-S-метил) с позиции их влияния на поражаемость растений картофеля тыквенными жуками (*Diabrotica speciosa*). Существенных различий в присутствии хищных жуков в наземной растительной массе и окружающей почве в вариантах выявлено не было. Однако растения, обработанные кремнеземом, были менее предпочтительными для листогрызущих вредителей. Опрыскивание всеми препаратами приводило к значительному увеличению диаметра и высоты растений, не влияя на продуктивность. Авторами был сделан вывод, что применение кремниевой кислоты, инсектицида или диатомита равнозначно повышало защиту от насекомых и уменьшало повреждение клубней [48].

В Польше сравнивали влияние на картофель некорневой подкормки комплексным минеральным удобрением с микроэлементами и препаратом на основе кремниевой кислоты. Были исследованы контроль (без обработок) и 3 варианта некорневой подкормки: 1 – комплексное жидкое удобрение, 2 – препарат на основе кремниевой кислоты, 3 – комплексное удобрение + Si. Некорневая подкормка не оказала существенного влияния на урожайность клубней, однако значительно уменьшила долю мелких клубней (диаметром <30 мм) и увеличила долю крупных клубней (диаметром >60 мм), особенно в варианте с использованием только кремниевого удобрения (+23%) или в варианте с сочетанием его с комплексным удобрением (+10%). Использование исследованных удобрений не затронуло качественные показатели клубней (потемнение сырой мякоти, содержание фосфора, калия, магния и кальция), но значительно ограничивало накопление нитратов в клубнях, особенно в случае объединения комплексного удобрения с кремневым: содержание нитратов при этой обработке было меньше почти на 60% [49].

Также в Польше двухлетнее некорневое применение ортокремниевой кислоты показало его большую эффективность в менее благоприятный по погодным условиям год. Общий урожай клубней в этот год увеличился в среднем на 14,8, товарный – на 16,4% по сравнению с контролем, тогда как в более благоприятный год прирост составил 5,5 и 7,7% соответственно. Было показано также, что некорневая подкормка испытываемым удобрением позволила ограничить внесение в почву минерального азота: сочетание внесения N75 с некорневой подкормкой Si дало такой же урожай клубней, как и при дозе N100 без некор-

невой подкормки Si. Некорневая подкормка положительно повлияла на размер клубней: доля клубней диаметром 50–60 мм увеличилась на 2, доля клубней диаметром >60 мм – на 4% по сравнению с контролем. На содержание крахмала, нитратов и сухого вещества в клубнях некорневая подкормка Si существенно не влияла [50].

Интересен опыт, проведенный в Кении. В нем в качестве источника кремния использовали гранулированный водорастворимый кремний в форме ортокремниевой кислоты (0.4% Si) с добавлением фульвокислоты (5%). У растений картофеля на фоне внесения Si наблюдали значительно более высокую плотность корней как на глубине 0–0.3, так и на глубине 0.3–0.9 м. Вне зависимости от системы возделывания (3 варианта) при добавлении кремния в значительной степени увеличились следующие показатели: площадь листовой поверхности (на 18–33%), удельное содержания азота в листьях (на 51%), содержание общих растворимых углеводов (на 110%) и пролина (на 104–194%), электролитная проводимость листа (на 36–111%), содержание хлорофилла и воды в листьях. Применение Si значительно повысило эффективность использования растением воды и радиации, перехват света, накопление биомассы и, как результат, индекс продуктивности земель (на 5–21%) [51].

Исследования по изучению влияния кремния на картофель изучали не только в полевых, но и в лабораторных условиях. В Китае саженцы картофеля, выращенные в культуре тканей в питательной среде с добавлением кремниевой кислоты, имели более высокие побеги с большей массой и более длинными корнями. Оптимальные результаты были достигнуты при расходе кремниевой кислоты 5 мл/л. Воздействие кремния привело к повышению соотношения связанной и свободной воды в тканях, увеличению содержания хлорофилла и целлюлозы при одновременном снижении интенсивности дыхания и содержания пектина [52].

В ЮАР был исследован *in vitro* эффект силиката калия на развитие патогена, вызывающего фузариозное увядание. В картофельный декстрозный агар вносили различные концентрации силиката калия (0, 5, 10, 20, 40 и 80 мл/л агара). Это увеличивало pH растворов с 5.2 до 8.8, 9.6, 10.2, 10.6 и 10.8 соответственно. Чтобы определить влияние фактора pH на рост *F. oxysporum*, в исследование были включены варианты сравнения с этими же показателями pH, но достигнутыми с помощью гидроксида калия. Расчет величины ингибирования *F. oxysporum* (в %) проводили через 7 сут после инокуляции. В варианте с внесе-

нием силиката калия 80 мл/л рост *F. oxysporum* был ингибирован на 92%, в то время как доза 40 мл/л показала только 5%-ное ингибирование роста. Интересно, что при концентрациях 5, 10 и 20 мл/л рост патогена усиливался на 44.5, 44.5 и 30.9% соответственно. Поскольку в контрольных вариантах с тем же pH ингибирование роста не наблюдали, был сделан вывод, что именно кремний полностью отвечал за ингибирование роста патогена [53].

Работы, проведенные в Китае, показали, что обработка клубней картофеля силикатом натрия в концентрации 100 мМ может усиливать защитные реакции клубней картофеля от сухой гнили, вызванной *Fusarium* spp. Активность пероксидазы (POD), полифенолоксидазы (PPO), фенилаланинаммониолиазы (PAL) и β -1,3-глюканазы (GLU), выработка общего фенола и флаваноидов в тканях клубней после заражения *F. sulphureum* резко возросла именно в обработанных клубнях [38].

Тестирование в условиях *in vitro* по влиянию кремния на развитие *Fusarium sulphureum*, главного возбудителя сухой гнили картофеля, было проведено в Китае. Для этого конидиальную суспензию высевали на питательную среду, содержащую различные концентрации (0, 25, 50, 100, 200 мМ) силиката натрия. Силикат натрия заметно ингибировал рост мицелия *F. sulphureum* с большим эффектом при более высоких концентрациях (до 90% при 200 мМ на 7-е сут после инокуляции). Отметили нарушение морфологии гиф в вариантах с применением кремния: наблюдали разреженность и искажение мицелия, его асимметрию, скручивание, новые гифы имели шероховатую поверхность, были набухшими и раздутыми по краям, мицелий выглядел взорванным, сморщенным и купированным.

Эксперимент был продублирован *in vivo*. Травмированные клубни были инокулированы суспензией *F. sulphureum*, после чего через 2 ч клубни погружали в раствор с силикатом натрия в различных концентрациях (0, 25, 50, 100 и 200 мМ). Обработанные клубни помещали в пластиковые ящики и хранили при комнатной температуре. Анализ, проведенный через 30 сут после лечения, показал прямую корреляцию между концентрацией силиката натрия и усилением его способности контролировать сухую гниль. Однако между дозировками в 100 и 200 мМ существенной разницы не было выявлено (ингибирование 44 и 45% соответственно) [54].

В исследовании в ЮАР *in vitro* дозозависимость ингибирования от растворенного силиката калия (0, 5, 10, 20, 40, 80 мл/л агара) была опреде-

лена для *Phytophthora cinnamomi*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Pythium F*-группы, *Mucor pusillus*, *Drechlera* sp., *Fusarium oxysporum*, *F. solani*, *Alternaria solani*, *Colletotrich. coccodes*, *Verticillium theobromae*, *Curvularia lunata* и *Stemphylium herbarum*. Величина угнетения положительно коррелировала с дозой силиката калия. Доза 80 мг/л вызывала 100%-ную блокировку роста всех протестированных патогенов. Развитие *Sclerotinia sclerotiorum* и *Phytophthora cinnamomi* полностью приостанавливалось при всех концентрациях силиката калия, в то время как всех других грибов только частично подавлялся рост мицелия при концентрациях в 5, 10 и 20 мг/л. Растворимый силикат калия ожидаемо повышал рН использованного агара. Исследование влияния величины рН в отсутствие силиката калия показало, что рост грибов только частично подавлялся при аналогичных величинах рН. Из этого был сделан вывод, что силикат калия оказывал ингибирующее действие на рост грибов *in vitro* в большей степени за счет прямого фунгицидного действия, нежели за счет эффекта рН [55].

К противоположному выводу пришли китайские специалисты. В их исследовании тоже изучали влияние силиката калия на рост 5-ти почвенных фитопатогенных грибов *in vitro*. Результаты показали, что рост 4-х изолятов грибов (*Rhizoctonia solani*, *Pestalotiopsis clavispora*, *Fusarium oxysporum* и *Fusarium oxysporum* f. sp. *fragariae*) был значительно подавлен в вариантах с добавкой силиката калия. Однако при снижении величины рН среды, модифицированной силикатом калия, до уровня не модифицированной разницы в росте грибов между 2-мя вариантами зафиксировано не было. Из этого авторы сделали вывод, что ингибирование роста грибов было вызвано эффектом рН [56].

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОКРЕМНИЯ

В последние годы активно изучают возможности нанокремния, поскольку его особая форма позволяет применять его в более низких, даже по сравнению с жидкими удобрениями, дозах. Нанокремний — это микронизированный (размер частиц от 6 до 40 мк) порошок аморфного (не кристаллического) диоксида кремния с нанопористой структурой частиц.

В России эксперимент по предпосадочному опудриванию клубней картофеля аморфным диоксидом кремния в дозе 3 г/кг продемонстрировал увеличение урожайности на 13.8% без выраженного роста содержания крахмала в клубнях. Было зафиксировано превышение показателя

чистой продуктивности фотосинтеза в опытном варианте по сравнению с контролем в 1.4 раза в фазе цветения и в 1.2 раза — в фазе всходов [57].

В России был проведен и другой опыт с нанокремнием. Наночастицы SiO₂ в количестве 30, 90, 180, 210 и 360 мг растворяли в 500 мл дистиллированной воды с последующим ультразвуковым диспергированием. В качестве контроля использовали необработанные клубни. Результаты вегетационных и полевых экспериментов показали, что предпосадочная обработка клубней кремнеземом в наноформе на начальных этапах способствовала торможению роста растений, но к концу экспозиции и в вегетационном, и в полевом опыте оказывала стимулирующее действие на рост как надземных, так и подземных органов растений при дозе 180 мг. Доза 360 мг оказалась ингибирующей. Рассчитанный на основе ростовых характеристик индекс толерантности в целом был больше для корневой системы, чем для побегов. Авторы объясняют это тем, что у клубней картофеля процесс прорастания начинается с глазков — будущих побегов, являвшихся первичной “мишенью” [58].

В исследовании в Саудовской Аравии в условиях *in vitro* и теплицы 2 сорта картофеля подвергали обработкам NaCl в дозах 50 и 100 мМ и наночастицами SiO₂-NPs в дозах 50 и 100 мг/л с целью оценить влияние кремния на солеустойчивость. Добавление NaCl в среду индуцировало значительное снижение большинства показателей роста по сравнению с контролем: наблюдали ухудшение поглощения воды, противодействие поглощению основных элементов питания, разрушение мембранных структур. Включение в среду SiO₂-NPs в более низкой концентрации снижало отрицательный эффект засоления. При этом SiO₂-NPs в дозе 100 мг/л в сочетании с каждой из доз NaCl оказывал токсическое действие на растения картофеля [59]. Эти 2 опыта наглядно демонстрировали, что низкая доза применения нанокремния влечет за собой необходимость четкого соблюдения рекомендованной дозы во избежание токсического действия препарата.

Изучение влияния кремния на солеустойчивость проводили и в Египте. Результаты проведенного исследования показали благоприятное влияние применения наночастиц Si (на основе SiCl₄), Zn, В и цеолита (отдельного и комбинированного) на смягчение негативного влияния засоления почвы на рост растений картофеля, физиологию и урожайность клубней. Действуя как самостоятельно, так и совместно, эти компоненты значительно усиливали удержание воды и пи-

тательных веществ, увеличивали фотосинтетические параметры, индуцировали ферментативную антиоксидантную активность в растениях картофеля, подвергшихся воздействию соли. Эти эффекты способствовали более высокой толерантности к засолению, что закономерно способствовало росту урожайности. Самые высокие показатели были получены при комбинированном применении активных компонентов. Из вариантов с одиночным применением изученных компонентов лучше остальных проявил себя вариант с использованием цеолита [60].

В исследовании, проведенном в Иране, было изучено влияние 4-х различных соединений кремния (нанокремния, силиката натрия, наноглины и бентонита) в двух концентрациях (1 и 2 г/л) на рост растений картофеля. Все соединения, за исключением силиката натрия, увеличивали сухую массу листьев (до 18% при применении бентонита (1 г/л)) и увеличивали диаметр стебля (до 17% в варианте с наноглиной и бентонитом (1 г/л)). Площадь корней увеличивалась во всех вариантах с кремниевым удобрением (до 54% при применении силиката натрия 1 г/л). Хотя обработка кремнием не повлияла на урожай клубней, их качественные характеристики лучше в сравнении с контролем [61].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, можно сказать, что результаты значительного количества экспериментов, проведенных в разных странах мира с использованием кремниевых удобрений, продемонстрировали роль кремния в улучшении урожайности картофеля и качества его клубней. При этом способность кремния подавлять поглощение тяжелых металлов, улучшать метаболизм культур, повышать устойчивость к избыточному засолению, засухе, атакам патогенов представляет значительные возможности для совершенствования производства культуры картофеля, повышения экономики и экологии возделывания, в том числе за счет снижения доз основных удобрений и норм расхода средств защиты растений.

Знания о пользе кремниевых подкормок должны быть доступны не только научным специалистам, но и должны быть переведены в практическую плоскость и получить широкое распространение. Кремниевые удобрения должны занять достойное место в интегрированной системе питания и защиты картофеля. При выборе способов применения и доз кремниевых удобрений наряду с их технологичностью и эффективностью, необходимо учитывать отсутствие в них загрязняю-

щих веществ. Будущая цель будет заключаться в генетическом манипулировании процессом поглощения кремния для улучшения качества клубней и способности картофеля преодолевать стрессы. Это многообещающее направление позволит выйти на новый уровень устойчивого и адаптивного земледелия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bent E.* Silicon solutions. Helping plants to help themselves. Italy: Sestante Edizioni, 2014. 184 p.
2. *Dantoff L.E., Snyder G.H., Korndorfer G.H.* Silicon in Agriculture. Studies in Plant Science. V. 8. The Netherlands, Amsterdam: Elsevier, 2001. 403 p.
3. *Epstein E.* Silicon // *Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 1999. V. 50. P. 641–664. doi.org/<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>
4. *Wang M., Gao L., Dong S.* Role of silicon on plant–pathogen interactions // *Front Plant Sci.* 2017. V. 8. № 701. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00701>
5. *Fawe A., Abou-Zaid M., Menzies J.G., Bélanger R.R.* Silicon-mediated accumulation of flavenoid phytoalexins in cucumber // *Phytopathology.* 1998. V. 88. P. 396–401. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1998.88.5.396>
6. *Матыченков В.В.* Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва–растение: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пушкино, 2008. 34 с.
7. *Artyszak A.* Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality—A literature review in Europe // *Plants.* 2018. V. 7. № 3. Iss. 54. <https://doi.org/10.3390/plants7030054>
8. *Prentice P., Crooks R.* The benefits of silicon fertilizer for sustainably increasing crop productivity // 5th Inter. Conf. on Silicon in Agriculture Conference. 2011. P. 152.
9. *Базилевич Н.И., Родин Л.Е., Розов Н.Н.* Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах // *Ресурсы биосферы.* 1975. № 1. С. 5–33.
10. *Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Матыченков И.В.* Кремниевые удобрения и мелиоранты: история изучения, теория и практика применения // *Агрохимия.* 2011. № 7. С. 84–96.
11. *ФАО* Всемирный сельскохозяйственный центр, данные сельскохозяйственной статистики. World Agricultural Centre, FAOSTAT agricultural statistic data—base gateway. <http://faostat3.fao.org>
12. *Mullins E., Milbourne D., Petti C.* Potato in the age of biotechnology // *Trends Plant Sci.* 2006. V. 11. № 5. P. 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.03.002>
13. *Шнаар Д., Быкин А., Дрегер Д.* Картофель (возделывание, уборка, хранение). изд. 3-е, дораб. и дополн. Минск: ЧУП “Орех”, 2004. 465 с.
14. *Лобода Б.П., Попов К.Л.* Инновационные технологии применения природных кремнийсодержащих удобрений при производстве картофеля // *Актуальные проблемы современной индустрии произ-*

- водства картофеля. Конф. “Картофель – 2010”. Чебоксары, 2010. С. 138–140.
15. *Silva H.S.D., Zambolim L., Rodrigues F.A., Rios J.A.* Effect of potassium silicate alone or mixed with fungicides on the control of late blight on potato // *Summa Phytopathol.* 2008. V. 34. № 1. P. 68–70.
 16. *Silva V.F., Moraes J.C., Melo B.A.* Influence of silicon on the development, productivity and infestation by insect pests in potato crops // *Ciênc. Agrotec.* 2010. V. 34. № 6. P. 1465–1469.
 17. *Gascho G.J.* Silicon sources for Agriculture // *Silicon in Agriculture* / Eds. Datnoff L.E., Snyder G.H., Korndorfer G.H. Elsevier Science, 2001. P. 225–232.
 18. *Seome D.G., Waals J.H., Marais D.* Potato production as influenced by soil applications of silicon // 4th Inter. Conf. on Silicon in Agriculture Conference. 2008. P. 92.
 19. *Millard C.P., Waals J.H., Waals J.E.* Greenhouse evolution of effect of silicon soil applications for control of verticillium wilt of potatoes // Там же. P. 73.
 20. *Merwe J.J., Waals J.H., Waals J.E.* The effects of effect of silicon-amended soil on the phenolic content of potato tubers infected with *Pectobacterium carotovorum* subsp. *Brasilensis* // Там же. P.103.
 21. *Berthelsen S., Noble A.D., Garside A.L.* Improving yield and ccs in sugarcane through the application of silicon based amendments // SRDC Project CLW009. 2003. P. 7–51.
 22. *Berthelsen S., Noble A.D., Garside A.L.* Silicon research down under: past, present and future // *Silicon deposition in higher plants. Silicon in Agriculture* / Eds. Datnoff L.E., Snyder G.H., Korndorfer G.H. Elsevier Science, 2001. P. 241–255.
 23. *Muir S.* Plant available Silicon as a protectant against fungal diseases in soil-less Potting Media // *Horticult. Res. Develop. Corporat.* № NY97046. 2001. 60 p.
 24. *Crusciol C.A.C., Pulz A.L., Lemos L.B.* Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato // *Crop Sci.* 2009. V. 49. P. 949–954.
 25. *Лобода Б.П., Багдасаров В.Р., Фицура Д.Д.* Влияние удобрения на основе цеолитсодержащих трепелов хотынецкого месторождения на урожайность и качество картофеля // *Агрохимия.* 2014. № 3. С. 28–35.
 26. *Гайнутдинов М.Т., Чекмарев П.А., Владимиров В.П.* Продуктивность раннепелого картофеля сорта Удача при внесении различных доз цеолита на фоне минеральных удобрений // *Достиж. науки и техники АПК.* 2014. Т. 28. № 11. С. 40–43.
 27. *Жевова С.В., Федотова Л.С., Тимошина Н.А.* Возделывание картофеля с использованием минеральных удобрений на основе цеолита // *Inter. Agricult. J.* 2018. № 4 (364). С. 44–47. <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2018-14061>
 28. *Soratto R.P., Fernandes A.M., Pilon C., Souza M.R.* Phosphorus and silicon effects on growth, yield, and phosphorus forms in potato plants // *J. Plant Nutr.* 2018. V. 42. № 3. P. 218–233. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1554072>
 29. *Gundappa K.G., Rudresha R.B., Prakash B.N.* Effect of diatomite as a silicon source on growth, yield and quality of potato // 7th Inter. Conf. on Silicon in Agriculture. 2017. P. 136.
 30. *Ibrahim N.M., Ashour H.M.* Effect of spraying some organic and inorganic components on improving yield and tuber quality of potato plants during late winter season // *Nat. Sci.* 2017. V. 15. № 10. P. 27–33. <https://doi.org/10.7537/marsnsj151017.04>
 31. *Assis F.A., Moraes J.C., Nascimento A.M.* Effects of diatomaceous earth on *Diabrotica speciosa* (Germar, 1824) (Coleoptera: Chrysomelidae) in potato // *Ciência e Agrotecnologia.* 2011. V. 35. № 3. P. 482–486. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000300007>
 32. *Ginzberg I., Reddy V., Elbaum R.* Silica fertilization of potato to improve tuber quality under changing climate // *EAPR 2014 Brussels 19th Triennial Conf. of the Europ. Association for Potato.* 2014. V. S16. P. 90.
 33. *Vulavala V.K.R., Elbaum R., Yermiyahu U., Fogelman E.* Silicon fertilization of potato: Expression of putative transporters and tuber skin quality // *Planta.* 2016. V. 243. № 1. P. 217–229. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2401-6>
 34. *Abd El-Gawad H.G., Abu El-Azm Nashwa A.I., Hikal M.S.* Effect of potassium silicate on tuber yield and biochemical constituents of potato plants grown under drought stress conditions // *Middle East J. Agricult. Res.* 2017. V. 6. № 3. P. 718–731.
 35. *Gonçalves M.V.* Arquitetura de planta, teores de clorofila e produtividade de batata, cv. Atlantic, sob doses de silicato de potássio via foliar. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009. 51 p.
 36. *Luz J.M.Q., Rodrigues C.R., Goncalves M.V., Coelho L.* The effect of silicate on potatoes in minas gerais // 4th Inter. Conf. on Silicon in Agriculture. 2008. P. 68.
 37. *Li Y., Bi Y.* Postharvest sodium silicate treatment induces resistance in potato against *Fusarium sulphureum* // *Acta Horticult.* 2010. V. 877. P. 1675–1681. <https://doi.org/10.17666/ActaHortic.2010.877.230>
 38. *Пузырьков П.Е., Дорожкина Л.А., Сальников Н.А.* Силиплант в технологии выращивания картофеля // *Объедин. сб. мат-лов научн.–практ. конф. “Современные тенденции и перспективы инновационного развития картофелеводства”.* Чебоксары: КУП Чувашской республики “Агро-Инновации”. 2011. С. 151–153.
 39. *Laane H.M.* The effects of the application of foliar sprays with stabilized silicic acid: An overview of the results from 2003–2014 // *Silicon.* 2017. V. 9. P. 803–807.
 40. *Surratt R.P., Fernandes A.N., Crusciol C.A.C., Souza-Schlick G.D.* Yield, tuber quality, and disease incidence on potato crop as affected by silicon leaf application // *Pesq. Agropec. Brasil.* 2012. V. 47. № 7. P. 1000–1006. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000700017>
 41. *Khan M.A., Goya V., Jain N.* Impact of ortho silicic acid formulation on yield and disease incidence of potatoes // 7th Inter. Conf. on Silicon in Agriculture. 2017. P. 137.
 42. *Kamp L.* Gebruik van siliciumzuur in de akkerbouw // *Silicon Solutions—Helping Plants to Help Themselves* / Ed. Bent E. 2014. P. 37.
 43. *Pilon C., Soratto R.P., Moreno L.A.* Effects of soil and foliar application of soluble silicon on mineral nutrition, gas exchange, and growth of potato plants // *Crop*

- Sci. 2013. V. 53. P. 1605–1614.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2012.10.0580>
44. Pilon C., Soratto R.P., Broetto F., Fernandes A.M. Foliar or soil applications of silicon alleviate water-deficit stress of potato plants // Crop Ecol. Physiol. 2014. V. 106. № 6. P. 2325–2334. doi.org/
<https://doi.org/10.2134/agronj14.0176>
 45. Gomes F.B., Moraes J.C., Santos C.D. Use of silicon the inductor of the resistance in potato to *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) // Neotrop. Entomol. 2008. V. 37. № 2. P. 185–190.
 46. Gomes F.B., Moraes J.C., Assis G.A. Silicon and imidacloprid on plants colonized by *Myzus persicae* and on vegetative development of potato // Ciência Rural, Santa Maria. 2008. V. 38. № 5. P. 1209–1213.
 47. Gomes F.B., Moraes J.C., Neri D.K.P. Fertilization with silicon as resistance factor to pest insects and promoter of productivity in the potato crop in an organic system // Ciênc. Agrotec. 2009. V. 33. № 1. P. 18–23.
 48. Assis F.A., Moraes J.C., Silveira L.C.P. Inducers of resistance in potato and its effects on defoliators and predatory insects // Revista Colombiana de Entomología. 2012. V. 38. № 1. P. 30–34.
 49. Wróbel S. Effects of fertilization of potato cultivar Jelly with foliar fertilizers YaraVita // Biul. IHAR. 2012. V. 266. P. 295–305.
 50. Trawczyński C. The effect of foliar fertilization with herbagreen on potato yielding // Ziemn. Polski. 2013. V. 2. P. 29–33.
 51. Nyawade S., Gitari H.I., Karanja N.N. Enhancing climate resilience of rain-fed potato through legume intercropping and silicon application // Food Syst. 2020. V. 6. doi.org/
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.566345>
 52. Fang J.Y., Ma X.L. Effect of silicon on the growth of test-tube potato plantlets and the cell wall formation // Acta Agron. Sinica. 2006. V. 32. № 1. P. 152–154.
 53. Nxumalo N.N., Wairuri C.K., Waals J.E. The *in vitro* and *in vivo* effects of silicon on fusarium wilt on potatoes // 4th Inter. Conf. on Silicon in Agriculture. 2008. P. 82.
 54. Li Y., Bi Y., Ge Y.H. Antifungal activity of sodium silicate on *Fusarium sulphureum* and its effect on dry rot of potato tubers // J. Food Sci. 2009. – V. 74. № 5. P. 213–218.
<https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01154.x>
 55. Bekker T., Kaiser C., Merwe R., Labuschagne N. *In vitro* inhibition of mycelial growth of several phytopathogenic fungi by soluble potassium silicate // South Afric. J. Plant Soil. 2006. V. 23. № 3. P. 169–172.
<https://doi.org/10.1080/02571862.2006.10634750>
 56. Shen G.-H., Xue Q.-H., Tang M. Inhibitory effects of potassium silicate on five soil-borne phytopathogenic fungi *in vitro* // J. Plant Diseases. Protect. – 010. V. 11. № 4. P. 180–184.
 57. Немцова Е.В., Харин А.В., Разлуго И.А., Выхорь Т.П. Влияние аморфного диоксида кремния “КОВЕЛОС” на урожайность, морфометрические и физиологические показатели овощных культур // Изв. Самар. НЦ РАН. 2019. Т. 21. № 2. С. 95–100.
 58. Аминова Е.В., Мушинский А.А. Оптимизация применения нанокремния на *Solanum tuberosum* L. // Изв. ОренбургГАУ. 2019. № 5 (79). Ч. 1. С. 116–118.
 59. Gawayed S.M.H., Al-Zahrani H.S., Metwali E.M.R. Improving the salinity tolerance in potato (*Solanum tuberosum*) by exogenous application of silicon dioxide nanoparticles // Inter. J. Agricult. Biol. 2017 V. 19. P. 183–194.
<https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0262>
 60. Mahmoud A.W.M., Abdeldaym E.A., Abdelaziz S.M. Tolerance in potato plants subjected to salinity // Agronomy. 2020. V. 10. № 19.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10010019>
 61. Soltani M., Kafī M., Nezami A., Taghiyari H.R. Effects of silicon application at nano and micro scales on the growth and nutrient uptake of potato minitubers (*Solanum tuberosum* var. Agria) in greenhouse conditions // BioNanoScience. 2018. V. 8. P. 218–228.
<https://doi.org/10.1007/s12668-017-0467-2>

Plant-Friendly Silicon – a Factor in Sustainable Potato Production

E. V. Bezruchko^{a, b, #} and L. S. Fedotova^a

^a A. G. Lorkh Federal Research Center of Potatoes
 ul. Lorkha 5, Moscow region, Lyuberetsky district, p. Kraskovo 140051, Russia

^b LLC “AGROGALAKTIKA”, per. Orlikov 5, Moscow 107078, Russia

[#]E-mail: ae-agro@mail.ru

The review analyzes the results of studies conducted to study the effect of silicon on productivity, resistance to diseases and pests, and changes in the metabolism of potatoes. The presented material is based on data from 41 scientific publications covering the period from 2006 to 2020 and a wide geography (13 countries). The pros and cons of various sources of silicon are considered: industrial waste (slags), zeolite, diatomite, silicates, stabilized silicic acid, nanosilicon. The stated conclusions allow us to unambiguously characterize silicon as an element that contributes to the growth of yield and improvement of the quality of potatoes, primarily by providing greater stress resistance of this crop. This allows us to recommend silicon-containing fertilizers as an element of an integrated system of nutrition and protection of potatoes in order to increase the level of environmental stability of their cultivation.

Key words: potato, silicon, zeolite, diatomite, silicates, silicic acid, nanosilicon, silicon-containing fertilizers, yield, quality, resistance to adverse factors.