

УДК 631.811.98:633.11:633.413:58.036.5

ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ БИОСТИМУЛЯТОРОВ НА ХОЛОДОСТОЙКОСТЬ ПШЕНИЦЫ И САХАРНОЙ СВЕКЛЫ¹

© 2022 г. А. О. Гранкина¹, Е. А. Бочарникова¹, В. В. Матыченок^{1,*}

¹ Федеральный исследовательский центр “Пушкинский научный центр биологических исследований РАН” – Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

*E-mail: vvmatichenkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.03.2022 г.

После доработки 06.04.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

В вегетационном эксперименте изучено влияние жидкого и твердого кремнийсодержащих препаратов на адаптацию растений пшеницы и сахарной свеклы к кратковременному действию низких температур. Кремниевые препараты применяли для опрыскивания растений в дозах 2 и 5 кг Si/га. В отсутствие холодового стресса обработка кремниевыми препаратами увеличила массу корней и надземных органов пшеницы на 27–54 и 13–39%, сахарной свеклы – на 11–33 и на 5–22% соответственно. Применение кремниевых препаратов в условиях низкотемпературного стресса обеспечило увеличение массы корней и надземных органов пшеницы на 33–55 и 14–28%, сахарной свеклы – на 22–44 и на 7–19% соответственно. Оба препарата способствовали усилению активности антиоксидантных ферментов (аскорбатпероксидазы, глутатионредуктазы и гваякол-пероксидазы) и ингибировали интенсивность процессов перекисного окисления липидов. Использование кремниевых препаратов также существенно повысило содержание фотосинтетических пигментов как в отсутствие, так и в условиях низкотемпературного стресса. Полученные данные позволили отнести испытанные препараты к эффективным биостимуляторам и свидетельствовали о перспективности их применения с целью повышения устойчивости растений пшеницы и сахарной свеклы к низкотемпературному стрессу.

Ключевые слова: кремнийсодержащие биостимуляторы, холодостойкость растений, пшеница, сахарная свекла.

DOI: 10.31857/S0002188122080075

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие значительно возросло использование различных видов биостимуляторов роста растений [1]. К данной группе относятся вещества, которые способны улучшать рост и продуктивность растений, качество урожая, устойчивость к биотическим и абиотическим стрессам [2]. В отличие от гормонов и биорегуляторов, биостимуляторы влияют на скорость процессов метаболизма растений, не изменяя при этом конечные продукты биохимических реакций [1]. Важно, что эффективность биостимуляторов проявляется при малых дозах. Дозы биостимуляторов в среднем составляют от нескольких сотен граммов на гектар и не превышают нескольких килограммов на гектар [2].

Для эффективного использования биостимуляторов необходимо понимание механизмов, лежащих в основе их действия на развитие и жизне-

способность растений. В условиях стрессов различной природы происходит усиление синтеза активных форм кислорода (АФК), что является неспецифической реакцией растения на действие любого стресс-фактора [3]. В результате нарушается баланс между активностью антиоксидантной системы растений и интенсивностью процессов окислительной деструкции, что приводит к повреждению метаболически важных соединений и органелл. Антиоксидантная система растений включает комплекс ферментов и низкомолекулярных соединений, таких как аскорбиновая кислота, глутатион, токоферолы и другие, которые являются восстановителями и могут снижать содержание АФК [1, 3]. Поддержание баланса между окислительными и восстановительными процессами является ключевым для защиты растений в условиях стресса. В ряде работ было показано, что биостимуляторы непосредственно участвуют в регулировании окислительно-восстановительного баланса растений [1].

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103-6 и договора АПТ-ЦИ-2020-04 с АО “Апатит”.

Хотя кремний не относят к необходимым элементам питания растений, многие сельскохозяйственные растения поглощают его в больших количествах, чем азот, фосфор или калий [4]. Начало изучения кремниевых удобрений относится к работам Ю. Либиха 1840 г. До начала XX века кремниевые удобрения исследовали совместно с азотными, фосфорными и калийными препаратами. Однако количество работ, посвященных изучению кремния в сельском хозяйстве, заметно сократилось после появления пестицидов [5].

Многочисленные современные исследования свидетельствуют, что активные формы кремния положительно влияют на рост растений и устойчивость к стрессам различной природы [6, 7]. Известно несколько кремний-опосредованных механизмов, обеспечивающих защиту растений в условиях стресса: 1 – механическая защита благодаря аккумуляции Si в эпидермальных тканях и образованию двойного кремний–эпидермального слоя, препятствующего атакам насекомых-вредителей и развитию грибковых заболеваний [8]; 2 – физиологическая защита за счет улучшения развития корневой системы и усиления фотосинтеза [9]; 3 – химическая защита посредством химического взаимодействия между монокремниевой кислотой и токсичными соединениями в тканях растений [10]; 4 – оптимизация транспорта микро- и макроэлементов [11]. Возможность действия ряда механизмов косвенно подтверждают высокие концентрации мономеров и полимеров кремниевой кислоты, обнаруженные в клеточном соке растений [12].

В настоящее время можно выделить 3 группы кремниевых препаратов, используемых в сельском хозяйстве: 1 – кремниевые почвенные мелиоранты в основном воздействуют на свойства почвы, такие как адсорбционная способность, структура, pH и другие, их обычно вносят в дозах >500 кг/га. К ним относятся силикат кальция, цеолит, диатомит и другие [13]; 2 – кремниевые удобрения применяют для обеспечения питания растений кремнием. Их вносят в дозах от 50 до 500 кг/га. К данной группе можно отнести аморфный диоксид кремния (микросилика, пирогенная двуокись кремния), кремниевый гель, силикаты натрия и калия [5]; 3 – кремниевые биостимуляторы – новый класс кремниевых агрохимикатов. Их применяют для опрыскивания растений в дозах <10 кг/га [14].

Цель работы – изучение влияния 2-х типов кремниевых биостимуляторов на физиологическое состояние растений пшеницы и сахарной свеклы в условиях кратковременного низкотемпературного стресса.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения тепличного эксперимента были взяты пшеница (*Triticum aestivum* L., сорт Новосибирская 41 как представитель однодольных растений) и сахарная свекла (*Beta vulgaris* L., сорт Богема как представитель двудольных растений). Перед посадкой семена были обработаны раствором 3%-ного H_2O_2 и промыты в дистиллированной воде. Растения выращивали в пластиковых сосудах объемом 1 л, наполненных смесью, содержащей торф верховой (60%), песок (30%) и известь (10%). Величина pH_{H_2O} смеси составила 6.0. В каждый сосуд высевали по 10 семян пшеницы или по 5 семян сахарной свеклы. Растения выращивали в течение 25 сут при следующих условиях: температура воздуха $26 \pm 4^\circ C$ днем и $22 \pm 2^\circ C$ – ночью, световой период 12 ч, относительная влажность воздуха $85 \pm 5\%$ днем и $78 \pm 5\%$ – ночью. Влажность грунта поддерживали в интервале 20–40% ПВ путем полива дистиллированной водой. Затем часть горшков была помещена на 12 ч в холодную комнату с температурой $6^\circ C$ для имитации кратковременного холодового стресса, после чего растения выращивали в прежних условиях в течение еще 1 нед.

Были использованы Si-биостимуляторы 2-х типов: 1 – твердый Si-биостимулятор (**АпаСил**) с содержанием Si 47% (АО “Апатит”, Россия) и 2 – жидкий Si-биостимулятор **Ecosil**, представляющий собой стабилизированную монокремниевую кислоту с содержанием Si 15% и содержанием Na 15% (Beijing Plum Agrochemical Trading Co., Ltd., Китай). Биостимуляторы разбавляли дистиллированной водой в пропорции 1 : 500 и опрыскивали растения в дозах 0.1 и 0.25 мг/сосуд, что соответствовало дозам 1.0 и 2.5 кг/га, дважды – за 3-е сут до и через 1 ч после действия холодового стресса. Суммарные дозы каждого биостимулятора составили 0.2 и 0.5 мг/сосуд, что соответствовало дозам внесения 2.0 и 5.0 кг/га. Параллельно биостимуляторами обрабатывали не подвергавшиеся охлаждению контрольные растения.

Через 24 ч после охлаждения были взяты образцы листьев пшеницы и сахарной свеклы, из которых сразу был приготовлен грубый гомогенат для анализа активности антиоксидантов. Развитие стресс-реализующих реакций в подверженных холодовому стрессу листьях было оценено по концентрации веществ, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой (**ТБК**), как индикатора интенсивности перекисного окисления липидов и по активности ферментативных антиоксидантов: аскорбатпероксидазы (**АсП**), глутатионредуктазы (**ГР**) и гваякол-пероксидазы (**ГПХ**) [15].

В конце эксперимента измеряли массу растений пшеницы и сахарной свеклы, а также отбирали образцы почв и растений. В почве определяли содержание водорастворимых и кислотораство-

римых форм кремния с использованием описанных ранее методик [16].

Для определения содержания общего кремния в тканях растений, высушенные при 65°C образцы растений сжигали в микроволновой печи с использованием NaOH–H₂O₂ смеси [17], затем в полученных растворах определяли содержание кремния.

Свежие образцы листьев растений анализировали на содержание пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов) с использованием ацетоновых экстрактов [18].

Образцы почв отбирали в 3-кратной повторности, образцы растений – в 5-кратной. Полученные результаты статистически обрабатывали для определения достоверного интервала при $p \leq 0.05$, используя программу EXCEL.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Под действием кратковременного холодого стресса значительно уменьшилась биомасса растений пшеницы и незначительно изменилась биомасса растений сахарной свеклы (табл. 1). Оба кремниевых биостимулятора увеличили биомассу пшеницы на 41 и 40% и биомассу сахарной свеклы – на 27 и 32% в условиях низкотемпературного стресса и в его отсутствие соответственно. Действие обоих биостимуляторов было сходным.

Оба кремниевых биостимулятора не влияли на концентрации водорастворимых и кислоторастворимых форм Si в почве, которые составили 8.3 ± 0.2 и 180 ± 15 мг Si/кг соответственно. Содержание Si в корнях и листьях пшеницы (0.85 ± 0.05 и $0.80 \pm 0.04\%$ Si) и сахарной свеклы (0.43 ± 0.03 и $0.32 \pm 0.03\%$ Si) также не изменилось при обработке тестируемыми препаратами.

Воздействие низкой температуры вызвало снижение содержания фотосинтетических пигментов в листьях контрольных растений (на 2.4–7.1% у пшеницы и на 5.2–6.8% у сахарной свеклы) (табл. 2). Обработка кремниевыми препаратами обеспечила увеличение содержания хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов в обоих видах контрольных и подверженных холодому стрессу растений. Различия в эффективности кремниевых биостимуляторов было незначительным. Содержание фотосинтетических пигментов увеличивалось с увеличением дозы препарата.

Без обработки кремнием содержание ТБК-продуктов при воздействии низкой температуры не изменилось в листьях пшеницы и незначительно увеличилось (от 56 до 59 нмоль/г сырой массы) в листьях сахарной свеклы. Оба кремниевых биостимулятора существенно снизили содержание ТБК-продуктов в листьях обоих видов растений по сравнению с контролем (табл. 3). Более значительное снижение наблюдали при обработке растений препаратом Ecosil 5 кг/га.

Таблица 1. Влияние кремниевых биостимуляторов на сухую биомассу растений пшеницы и сахарной свеклы, г/растение

	Пшеница		Сахарная свекла	
	корни	стебли	корни	стебли
В отсутствие холодого стресса				
Контроль	0.11	0.23	0.09	0.076
АпаСил 2 кг/га	0.15	0.29	0.10	0.081
АпаСил 5 кг/га	0.17	0.31	0.11	0.093
Ecosil 2 кг/га	0.14	0.26	0.11	0.080
Ecosil 5 кг/га	0.15	0.32	0.12	0.092
В условиях холодого стресса				
Контроль	0.09	0.21	0.09	0.077
АпаСил 2 кг/га	0.12	0.25	0.11	0.083
АпаСил 5 кг/га	0.13	0.27	0.13	0.092
Ecosil 2 кг/га	0.13	0.24	0.12	0.084
Ecosil 5 кг/га	0.14	0.28	0.13	0.091
HCP ₀₅	0.02	0.02	0.02	0.002

Воздействие низких температур, а также обработка препаратами кремния оказали слабое либо незначительное влияние на активность ГР. В условиях холодого стресса активность ГР в листьях пшеницы уменьшалась от 0.88 до 0.68 мкмоль/г сырой массы. Обработка кремниевыми биостимуляторами вызвала увеличение активности ГР только в растениях пшеницы, подверженных низкой температуре. В растениях сахарной свеклы кремниевые биостимуляторы увеличили активность ГР независимо от наличия холодого стресса. Более высокую эффективность продемонстрировал препарат Ecosil в дозе 5 кг/га, увеличив активность ГР от 0.20 до 0.29 мкмоль/г и от 0.22 до 0.33 мкмоль/г в отсутствие и в условиях холодого стресса соответственно.

В отношении активности АсП растения пшеницы были более отзывчивы на обработку кремниевыми препаратами по сравнению с сахарной свеклой. Низкотемпературное воздействие привело к снижению активности АсП от 5.8 до 4.6 мкмоль/г в пшенице и к увеличению данного показателя от 3.1 до 4.1 мкмоль/г в сахарной свекле. Обработка кремниевыми биостимуляторами обеспечила двукратное увеличение активности АсП в пшенице, тогда как в сахарной свекле увеличение активности составило только 19 и 9.7% в отсутствие и в условиях холодого стресса соответственно.

Активность ГПХ также более заметно изменилась под влиянием кремниевых препаратов в пшенице по сравнению с сахарной свеклой. Охлаждение вызвало активацию ГПХ от 15.6 до 17.5 мкмоль/г в листьях пшеницы и от 0.58 до 0.68 мкмоль/г в листьях сахарной свеклы. Обработка препаратом Ecosil привела к увеличению

Таблица 2. Содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов в листьях пшеницы и сахарной свеклы, мг/кг сухой массы

	Пшеница			Сахарная свекла		
	хл. <i>a</i>	хл. <i>b</i>	каротиноиды	хл. <i>a</i>	хл. <i>b</i>	каротиноиды
В отсутствие холодного стресса						
Контроль	0.903	0.802	0.604	0.745	0.586	0.804
АпаСил 2 кг/га	0.917	0.814	0.613	0.759	0.593	0.824
АпаСил 5 кг/га	0.922	0.816	0.622	0.775	0.603	0.829
Ecosil 2 кг/га	0.918	0.813	0.620	0.760	0.605	0.823
Ecosil 5 кг/га	0.925	0.817	0.621	0.783	0.604	0.828
В условиях холодного стресса						
Контроль	0.845	0.745	0.589	0.706	0.546	0.756
АпаСил 2 кг/га	0,900	0.783	0.585	0.735	0.548	0.778
АпаСил 5 кг/га	0.911	0.811	0.603	0.754	0.559	0.784
Ecosil 2 кг/га	0.905	0.794	0.594	0.730	0.550	0.779
Ecosil 5 кг/га	0.913	0.814	0.602	0.759	0.559	0.785
<i>HCP</i> ₀₅	0.025	0.025	0.20	0.020	0.025	0.020

активности ГПХ до 21.6 мкмоль/г (на 38.4%) в не подверженной охлаждению пшенице и до 24.6 мкмоль/г (на 40.6%) при охлаждении, тогда как соответствующее увеличение активности ГПХ в сахарной свекле составило 25.8 и 22.0%.

Полученные результаты свидетельствовали, что использованные кремниевые препараты могли быть классифицированы как эффективные биостимуляторы. Действие обоих кремниевых препаратов было сходным. Предполагаем, что оба препарата служат источником образования монокремниевой кислоты – биохимически активной формы кремния, способной стимулировать антиоксидантную систему растений. Si-опосредованная активация ферментов-антиоксидантов зависела от вида растения. В случае пшеницы низкотемпературное воздействие и обработка кремнием оказывали слабое и неоднозначное влияние на активность ГР, тогда как в сахарной свекле оба фактора вызвали значительное увеличение данного показателя. Изменение активности АСП под действием кремния, напротив, было более существенным в растениях пшеницы по сравнению с сахарной свеклой.

Кремний-опосредованная защита растений могла быть обусловлена: 1 – косвенным влиянием на механизмы передачи внутриклеточных сигналов, что приводило к формированию ответной реакции клетки на внешнее воздействие, либо 2 – непосредственным влиянием на синтез соединений, участвовавших в инактивации АФК.

Участие активных форм кремния в функционировании сигнальной системы растений сложно подтвердить непосредственно существующими химическими и физическими методами, однако ряд авторов указывал на такую возможность [19].

Известно, что любой стресс инициирует усиленное поглощение и перераспределение Si внутри растения, обеспечивая его накопление в местах, подверженных стрессу [20]. Предполагаем, что активные формы Si способны напрямую участвовать в синтезе ферментов и стресс-белков. Этот механизм может включать следующие этапы:

1 – инициация. Кремнийсодержащий биостимулятор активирует сигнальную систему растения, что может привести к дополнительной транслокации Si в ткани, подверженные стрессу;

2 – поглощение кремния. Монокремниевая кислота начинает активно поглощаться из почвы через корневую плазмалемму (клеточный “шлюз”) и образовывать полимеры кремниевой кислоты [4, 12];

3 – распределение кремния. Соединения кремния частично поступают в эпидермальный слой, корневые чехлики, клеточные стенки и другие органы и ткани. Часть поглощенного Si аккумулируется в клетке в виде кремниевого геля, который может являться основой для дальнейшего низкотемпературного синтеза органических соединений. Другая часть Si хранится “про запас” в виде поликремниевой кислоты или геля внутри клеток или в межклеточном пространстве [12];

4 – синтез органических соединений. Синтез возможен на поверхности новообразованного кремниевого геля [22]. Процесс начинается с адсорбции органических молекул на поверхности геля и сопровождается определенными изменениями поверхности, приводящими к формированию специальной матрицы, которая “запоминает” структуру адсорбированной молекулы. После удаления реплицирующийся молекулы модифи-

Таблица 3. Содержание ТБК-продуктов и активность ферментов-антиоксидантов в листьях пшеницы и сахарной свеклы

Вариант	ТБК-продукты, нм/г сырой массы	ГР	АсП	ГПХ
		мкмоль/г сырой массы		
Листья пшеницы				
В отсутствие холодового стресса				
Контроль	69	0.88	5.8	15.6
АпаСил 2 кг/га	54	0.75	6.8	17.5
АпаСил 5 кг/га	35	0.75	7.9	19.4
Ecosil 2 кг/га	35	0.82	8.5	20.4
Ecosil 5 кг/га	32	0.79	10.4	21.6
В условиях холодового стресса				
Контроль	70	0.68	4.6	17.5
АпаСил 2 кг/га	78	0.61	5.4	22.5
АпаСил 5 кг/га	70	0.72	7.9	20.5
Ecosil 2 кг/га	58	0.68	6.4	23.2
Ecosil 5 кг/га	69	0.83	8.2	24.6
HCP ₀₅	3	0.08	0.3	0.6
Листья сахарной свеклы				
В отсутствие холодового стресса				
Контроль	56	0.20	3.1	0.58
АпаСил 2 кг/га	47	0.25	3.5	0.63
АпаСил 5 кг/га	42	0.28	3.6	0.2
Ecosil 2 кг/га	45	0.26	3.4	0.62
Ecosil 5 кг/га	41	0.29	3.7	0.73
В условиях холодового стресса				
Контроль	59	0.22	4.1	0.68
АпаСил 2 кг/га	50	0.28	3.9	0.78
АпаСил 5 кг/га	48	0.32	4.0	0.83
Ecosil 2 кг/га	48	0.27	4.2	0.76
Ecosil 5 кг/га	45	0.33	4.5	0.82
HCP ₀₅	3	0.03	0.3	0.05

Примечание. Тиобарбитуровая кислота – ТБК, аскорбатпероксидаза – АсП, глутатионредуктаза – ГР, гваякол-пероксидаза – ГПХ.

цированная Si-гелевая матрица обеспечивает каталитический синтез копий данной молекулы [22]. Этот процесс широко используется в органической химии и фармакологии [23].

Таким образом, стресс-фактор активирует сигнальную систему растений, инициируя дополнительный синтез стресс-белков и антиоксидантов. Одновременно с этим растение усиливает поглощение Si извне и инициирует перераспределение уже накопленного Si в подверженный стрессу орган. Получив информацию о стрессе, ядро клетки инициирует дополнительный синтез со-

единений защиты или их фрагментов, таких как стресс-белки, антиоксидантные ферменты и низкомолекулярные антиоксиданты. Синтезированные молекулы затем транспортируются в поврежденные органы. Однако при сильном стрессе скорость синтеза и количество синтезируемых соединений могут быть недостаточными. В результате нарастающего дефицита энергии и времени процесс синтеза “обычных” соединений, необходимых для функционирования клеток, замедляется или даже прекращается. Предполагаем, что некоторые из защитных соединений (или их фрагментов) могут перемещаться внутри клетки и сорбироваться кремниевым гелем, что обеспечивает их низкотемпературный каталитический синтез. Таким образом, Si-гелевая матрица может способствовать дополнительному синтезу защитных соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что как жидкая, так и твердая формы препаратов Si, использованные в низких дозах (2–5 кг Si/га), способствовали повышению устойчивости пшеницы и сахарной свеклы к холодовому стрессу. Оба препарата можно классифицировать как эффективные биостимуляторы благодаря способности повышать активность антиоксидантных ферментов, таких как аскорбатпероксидаза (АсП), глутатионредуктаза (ГР), гваякол-пероксидаза (ГПХ) и снижать уровень перекисного окисления липидов.

Особенности антиоксидантной системы испытанных растений различались в зависимости от вида. У пшеницы холодовой стресс в основном усиливал активность АсП и ГПХ, в то время как у сахарной свеклы он приводил к активации ГР.

Выдвинуто предположение, что кремниевые соединения могут непосредственно участвовать в синтезе стресс-белков и ферментов или их фрагментов. При этом ключевую роль играют поликремниевые кислоты. Поликремниевые кислоты могут образовывать кремниевый гель, обладающий специфическими поверхностными свойствами, облегчающими синтез органических молекул. Однако данная гипотеза нуждается в экспериментальном подтверждении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Posmyk M.M., Szafranska K. Biostimulators: a new trend towards solving an old problem // Front. Plant Sci. 2016. № 7. P. 748.
2. Rouphael Y., Colla G. Biostimulants in agriculture // Front. Plant Sci. 2020. № 11. P. 40.
3. Choudhury F. K., Rivero R. M., Blumwald E., Mittler R. Reactive oxygen species. Abiotic stress and stress combination // Plant J. 2017. V. 90. № 5. C. 856–867.
4. Epstein E. Silicon // Annual Review of Plant Biology. 1999. V.50. № 1. C. 641–664.

5. Tubana B.S., Babu T., Datnoff L.E. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives // *Soil Sci.* 2016. V. 181. № 9/10. С. 393–411.
6. Kim Y.H., Khan A.L., Waqas M., Lee I.J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review // *Front. Plant Sci.* 2017. № 8. P. 510.
7. Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system // *Biotech.* 2019. V. 9. № 3. P. 73.
8. Vivancos J., Labbé C., Menzies J.G., Bélanger R.R. Silicon-mediated resistance of *Arabidopsis* against powdery mildew involves mechanisms other than the salicylic acid (SA)-dependent defense pathway // *Mol. Plant Pathol.* 2015. V. 16. № 6. P. 572–582.
9. Frazão J.J., de Mello Prado R., de Souza Júnior J.P., Rossatto D.R. Silicon changes C : N : P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 1–10.
10. Ji X., Liu S., Huang J., Bocharnikova E., Matichenkov V. Monosilicic acid potential in phytoremediation of the contaminated areas // *Chemosphere.* 2016. V. 157. P. 132–136.
11. Souri Z., Khanna K., Karimi N., Ahmad P. Silicon and plants: current knowledge and future prospects // *J. Plant Growth Regul.* 2021. V. 40. № 3. P. 906–925.
12. Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Кособрохов А.А., Биль К.Я. О подвижных формах кремния в растениях // *Докл. РАН.* 2008. Т. 418. № 2. С. 279–281.
13. Куликова А.Х. Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. 176 с.
14. Artyszak A., Gozdowski D., Siuda A. Effect of the application date of fertilizer containing silicon and potassium on the yield and technological quality of sugar beet roots // *Plants.* 2021. V.10. № 2. P. 370.
15. Балахнина Т.И., Надёжкина Е.С. Влияние селена на рост и антиоксидантный потенциал пшеницы *Triticum aestivum* L. при развитии окислительного стресса, индуцированного свинцом // *Физиология растений.* 2017. Т. 64. № 2. С. 151–160.
16. Матыченков И.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В. Подвижные кремниевые соединения в системе почва–растение и методы их определения // *Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение.* 2016. № 3. С. 37–46.
17. Saihua L., Yunhe X., Ji X., Juan H., Bocharnikova E.A., Matichenkov V.V. Microwave digestion for colorimetric determination of total Si in plant and mineral samples // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2018. V. 49. № 7. P. 840–847.
18. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determination of total carotenoids and chlorophylls A and B of leaf in different solvents // *Biochem. Soc. Trans.* 1985. № 11. P. 591–592.
19. Johnson S.N., Hartley S.E., Ryalls J.M., Frew A., Hall C.R. Targeted plant defense: silicon conserves hormonal defense signaling impacting chewing but not fluid-feeding herbivores // *Ecology.* 2021. V. 102. № 3. e03250.
20. Verma K.K., Singh P., Song X.P., Malviya M.K., Singh R.K., Chen G.L., Solomon S., Li Y.R. Mitigating climate change for sugarcane improvement: role of silicon in alleviating abiotic stresses // *Sugar Tech.* 2020. V. 22. P. 741–749.
21. Wei W., Ji X., Saihua L., Bocharnikova E., Matichenkov V. Effect of monosilicic and polysilicic acids on Cd transport in rice, a laboratory test // *J. Plant Growth Regul.* 2021. № 1–12.
22. Banerjee A.K., Laya Mimo M.S., Vera Vegas W.J. Silica gel in organic synthesis // *Russ. Chem. Rev.* 2001. V. 70. № 11. P. 971–990.
23. Maurya C. K., Mazumder A., Kumar A., Gupta P.K. Synthesis of disulfanes from organic thiocyanates mediated by sodium in silica gel // *Synlett.* 2016. V. 27. № 3. P. 409–411.

Effect of Silicon-Containing Biostimulants on the Cold Resistance of Wheat and Sugar Beet

A. O. Grankina^a, E. A. Bocharnika^a, and V. V. Matychenkov^{a, #}

^a Federal Research Center “Pushchinsky Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences” –
Institute of Fundamental Problems of Biology of the RAS

ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia

[#]E-mail: vvmatichenkov@yandex.ru

The effect of liquid and solid silicon-containing preparations on the adaptation of wheat and sugar beet plants to the short-term effect of low temperatures was studied in a vegetation experiment. Silicon preparations were used for spraying plants in doses of 2 and 5 kg Si/ha. In the absence of cold stress, treatment with silicon preparations increased the mass of roots and aboveground organs of wheat by 27–54 and 13–39%, sugar beet – by 11–33 and 5–22%, respectively. The use of silicon preparations under conditions of low-temperature stress provided an increase in the mass of roots and aboveground organs of wheat by 33–55 and 14–28%, sugar beet – by 22–44 and 7–19%, respectively. Both drugs enhanced the activity of antioxidant enzymes (ascorbate peroxidase, glutathione reductase and guaiacol peroxidase) and inhibited the intensity of lipid peroxidation processes. The use of silicon preparations also significantly increased the content of photosynthetic pigments both in the absence and in conditions of low-temperature stress. The data obtained made it possible to attribute the tested drugs to effective biostimulants and testified to the prospects of their use in order to increase the resistance of wheat and sugar beet plants to low-temperature stress.

Key words: silicon-containing biostimulants, plant cold resistance, wheat, sugar beet.