

# Физические, физиологические и генетические основы биологической продуктивности почвенно-растительного комплекса в естественных и регулируемых условиях

*Посвящается памяти  
академика Евгения Ивановича Ермакова*

УДК 631.4:631.588:577.17.049:631.11

## КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИЕ ХЕЛАТНЫЕ МИКРОУДОБРЕНИЯ В ПОВЫШЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИ РАСТЕНИЙ К ДЕЙСТВИЮ СТРЕССОВЫХ ФАКТОРОВ

Г. Г. Панова, Л. М. Аникина, Е. В. Кнаш, О. Р. Удалова, Д. В. Шибанов

*ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии  
195220, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14  
E-mail: raes@agrophys.ru*

Установлено влияние кремнийсодержащих хелатных микроудобрений, разработанных в ГНУ АФИ Россельхозакадемии, на растения и рассмотрены основные механизмы их фитопротекторного эффекта при действии стрессовых факторов различной природы.

**Ключевые слова:** препараты комплексного действия, кремнийсодержащие хелатные микроудобрения, растения, стрессовые факторы, продукционный и адаптационный процесс.

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых высокоэффективных экологически безопасных средств повышения устойчивости растений к действию стрессовых факторов и обеспечения стабильного получения планируемых урожаев качественной растительной продукции остается весьма актуальной задачей современной науки. В этом отношении значительное внимание в мировой науке уделяется кремнию и его соединениям. Выявленная способность кремнийсодержащих соединений повышать устойчивость растений к действию ряда биотических и абиотических стрессоров побуждает исследователей к установлению малоизученных к настоящему времени механизмов их взаимодействия с растительным организмом и разработке высокоэффективных, доступных для растений форм кремнийсодержащих удобрений. Актуальность таких исследований связана еще и с тем, что «растительный» кремний в сравнении с неорганическими силикатами является наиболее доступным и физиологически активным при удовлетворении потребности человека и животных в данном необходимом для их жизнедеятельности элементе (Воронков и др., 1978).

Считается, что кремний поглощается растениями в основном в виде мономерной ортокремниевой кислоты и ее анионов (Yoshida et al., 1962; Epstein, 1999; Mo,

Takahashi, 2002). Несмотря на широкую распространенность кремния и его соединений в природе, содержание доступных для растений низкомолекулярных кремниевых кислот в почве крайне низко и сопоставимо с количеством подвижных форм фосфора и обменного калия (Аммосова и др., 1990; Самсонова, 2005). При этом ежегодный вынос кремния с урожаем в мире составляет 210–224 млн. тонн (FAO, 2004). Таким образом, очевидна необходимость внесения в систему «почва – растение» кремнийсодержащих удобрений в доступной форме или веществ, способствующих повышению доступности почвенного кремния для растений (Капранов, 2010).

Применение кремнийсодержащих удобрений имеет многолетнюю историю. Первые вегетационные опыты в тепличных условиях были проведены Ю. Либихом в 1840 году (Liebig, 1840), который продемонстрировал, что использование силиката натрия в качестве удобрения способствует увеличению массы корнеплода свеклы и содержания сахара в нем. В дальнейшем усилия исследователей в различных странах были направлены на разработку и испытание в полевых условиях в качестве удобрений различных кремнийсодержащих соединений и отходов промышленности, таких как силикаты натрия, калия, кальция, аморфный диоксид кремния, а также шлаки, цементная

пыль, зола (Datnoff et al., 2001; Ma, Takahashi, 2002; Snyder et al., 2006; Ложникова, Сластя, 2010; Бочарникова и др., 2011 и др.). Однако несмотря на многочисленные положительные результаты, кремниевые удобрения до сих пор не получили широкого применения на практике (Капранов, 2010).

При внесении кремнийсодержащих удобрений в почву или почвозаменитель следует учитывать ряд обстоятельств. Концентрация соединений кремния в почвенном или питательном растворе не должна превышать  $120 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ , иначе наблюдается переход их в практически недоступную для растений коллоидную форму (Ермаков, 2009). В присутствии ионов алюминия даже в незначительных количествах кремниевые соединения выпадают в осадок и становятся практически недоступными для растений (Айлер, 1982).

В почве кремнийсодержащие удобрения могут активно закрепляться в составе органического вещества, включаться в органо-минеральные комплексы и, как следствие, терять свою активность и доступность для растений. В связи с указанными обстоятельствами представляется наиболее эффективным применение некорневой обработки растений кремнийсодержащими соединениями.

В ходе многолетнего эксперимента академиком Россельхозакадемии Е.И. Ермаковым с сотрудниками ГНУ АФИ Россельхозакадемии (Ермаков, 2009) установлено интересное явление взаимосвязи между накоплением и перераспределением кремния в растениях и изменением содержания органического вещества в изначально абиогенном гранулированном минеральном субстрате, что свидетельствует о хелатирующем воздействии водорастворимого органического вещества в корнеобитаемой среде на соединения кремния, обеспечивающим их перенос не только через клеточные мембраны корня, но и транспорт в системе «корни – стебель», «листья», «плоды». Полученные результаты послужили основой для создания кремнийсодержащих хелатных микроудобрений (КХМ, КХМ-Г и КХМ-А), представляющих собой органо-минеральные композиции различного состава, в которых кремний представлен в виде водного раствора метаси-

ликата или силиката натрия/калия (в расчете на содержание  $\text{SiO}_2$  не более  $100 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$  раствора), а в качестве хелатообразователя применены лимонная кислота – КХМ (Ермаков, Медведева, 1980) или гуматы – КХМ-Г и КХМ-А, выделенные оригинальным способом из верхового торфа низкой степени разложения, в сочетании с основными микроэлементами (Панова, 2009). Как известно, каталитическая активность комплексно связанных микроэлементов, включая кремний, возрастает в сотни и более раз. Это дает возможность снизить концентрацию действующего вещества в растворе для обработки растений и исключить избыточное накопление микроэлементов в растениях.

Цель работы – обобщение полученных материалов по изучению влияния разработанных кремнийсодержащих хелатных микроудобрений на растения и объяснение основных механизмов их положительного воздействия.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в регулируемых и полевых условиях на базе биополигонов отдела светофизиологии растений и биопродуктивности агроэкосистем ГНУ АФИ Россельхозакадемии и его Меньковского филиала (Ленинградская область). Помимо этого, агробиологические испытания препаратов КХМ-Г и КХМ-А проводили в хозяйствах Ленинградской области (ЗАО «Победа», К(Ф)Х «Алакюль-1», СПК «Шушары») и на опытной базе Рязанского НИИСХ в Рязанской области.

На биополигонах Агрофизического института некорневое воздействие созданными композициями КХМ оценивалось при моделировании благоприятных и стрессовых условий для роста и развития растений по уровню минерального питания и содержанию почвенной влаги, значениям температурных и световых режимов. В качестве стрессора использовалась также УФ-В радиация. Растения подвергались однократному облучению в дозах 3, 5, 8 и  $12 \text{ кДж}\cdot\text{м}^{-2}$ .

Моделирование дефицита почвенной влаги (две недели поддерживалась влажность почвы на уровне  $30\pm 5\%$  от полной влагоемкости почвы) осуществлялось в опытах с яровым ячменем сорта Белогорский в фазу трубкования. В контроле поддержива-

лась влажность почвы на уровне  $65 \pm 5$  % от полной влагоемкости.

Уровни минерального питания составляли в вегетационных экспериментах  $N_0P_{60}K_{60}$ ,  $N_{60}P_{60}K_{60}$ ,  $N_{120}P_{120}K_{120}$ , в полевых опытах –  $N_0P_0K_0$ ,  $N_{60}P_{60}K_{60}$ ,  $N_{240}P_{240}K_{240}$ .

Влияние композиций КХМ, КХМ-Г и КХМ-А на растения оценивалось по реакции ярового ячменя сорта «Белогорский», пшеницы сорта «Siete cerros», столовой свеклы гибридов  $F_1$  «Пабло» и «Боро», моркови сорта «Нантская», гибридов  $F_1$  «Нарбонне» и  $F_1$  «Нориннэ», картофеля сорта «Невский» репродукции «Элита», белокочанной капусты сорта «Куизор», сои сортов «Светлая» и «Касатка», томата сортов «Ультрабек» и «Ottava-60», огурца гибридов  $F_1$  «Московский тепличный» и  $F_1$  «Зозуля», салата сорта «Одесский кучерявец» и других зеленных культур. В регулируемых условиях исследования проводили с использованием дерново-подзолистой супесчаной почвы (гор. А пах. из Меньковского филиала ГНУ АФИ Россельхозакадемии, Ленинградская область, рН 5,3, содержание гумуса – 3,5%), почвозаменителя, разработанного на основе верхового торфа низкой степени разложения и минеральных компонентов, питательных растворов (Ермаков, 2009). Растения выращивали в вегетационных светоустановках, включая оригинальные ризотроны, с привлечением методов панопоники и гидропонии (Ермаков, 2009). При этом температурный и световой режим среды устанавливали в зависимости от вида культуры. Интенсивность лучистого потока в области ФАР составляла  $100 \pm 10$  Вт·м<sup>-2</sup>, относительная влажность воздуха –  $65 \pm 5$ %, влажность почвы –  $65 \pm 5$ % от полной влагоемкости.

Некорневая обработка зерновых культур растворами КХМ, КХМ-Г и КХМ-А в полевых и регулируемых условиях проводилась 1–3 раза, овощных культур в регулируемых условиях – 4–5 раз на протяжении вегетации по фазам онтогенеза в объеме 0,2 л·м<sup>-2</sup>. Контролем служили растения, обработанные водопроводной водой. Повторность опытов в полевых условиях – 3–4 кратная, в регулируемых – 5–10 кратная.

На протяжении вегетации реакция растений на обработку препаратами оценивалась по изменению их физиологических

характеристик, продуктивности, биохимического состава растительной продукции, численности сопутствующих микроорганизмов, содержания водорастворимого органического вещества в корнеобитаемой среде.

Определение оптических и других физиологических характеристик листьев растений проводилось с помощью оптоволоконного спектрометра HR 2000 фирмы «Ocean Optics» (США) по методу, описанному Е. В. Канаш и Ю. А. Осиповым (2008). Численность микроорганизмов на поверхности листьев, корней и в почве учитывалась методом высева на твердые и жидкие питательные среды (Нетрусов и др., 2005). Содержание нитратов в растениях определялось потенциометрическим методом (Методические указания..., 1989). Оценка качества растительной продукции осуществлялась путем анализа их биохимического состава по общепринятым методам (Руководство..., 1998).. Содержание водорастворимого разлагаемого органического вещества в почве определялось по методу, описанному в работе Шульца и Кершенса (Шульц, Кершенс, 1998).

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с помощью компьютерной программы MS-Excel. В тексте и таблицах приведены средние арифметические значения параметров и их доверительные интервалы при 95%-ном уровне вероятности по t-критерию.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Некорневая обработка растений разработанными кремнийсодержащими хелатными микроудобрениями КХМ-Г и КХМ-А показала их высокую эффективность на широком спектре культур, причем в количественном выражении положительное влияние их на растения было значимо выше в сравнении с действием прототипа – препарата КХМ. Обработка растений указанными препаратами обеспечивала повышение их продуктивности от 20 до 100% и более, улучшение качества растительной продукции за счет снижения содержания нитратов, увеличения содержания витаминов, углеводов и других полезных веществ (Панова, 2009; Панова и др., 2010). Так, продуктивность растений томата, огурца, салата и других культур в регулируемых условиях

после обработки препаратами КХМ-Г, КХМ-А увеличивалась на 18–90% (табл. 1), прибавка урожая корнеплодов столовой свеклы различных гибридов при некорневой обработке растений КХМ-Г в полевых условиях (Меньковский филиал ГНУ АФИ Россельхозакадемии, ЗАО «Победа», Ленинградская область) составляла 26–74% относительно контроля (табл. 2); урожая моркови различных сортов и гибридов в полевых условиях хозяйств Ленинградской области (ЗАО «Победа», К(Ф)Х «Алакюль-1», СПК «Шушары») – преимущественно 15–40% (табл. 3). Повышение урожая данных культур обусловлено большим числом выживших растений на единицу площади, увеличением размеров и массы корнеплода, а также массы ботвы, а, следовательно, фотосинтетически активной поверхности посевов. При этом существенно улучшалось качество урожая: увеличивалась доля стандартной и уменьшалась доля нестандартной продукции.

Результаты исследований влияния препарата КХМ-Г на урожайность растений сои в полевых условиях Рязанской области свидетельствуют о том, что прибавка урожая сои сортов «Светлая» и «Касатка» относительно контроля составила 24% и 36% соответственно (табл. 4). Данный эффект достигался за счет увеличения числа продуктивных ветвей, бобов и семян на растении, а также вследствие более высокой выполненности и, соответственно, массы семян.

На примере картофеля в производственном полевом опыте (Ленинградская область) показана высокая экономическая эффективность применения некорневой обработки растений препаратом КХМ-Г в сочетании с фунгицидами, обеспечивающего дополнительный чистый доход 66868,8 руб.·га<sup>-1</sup>, что на 11000 руб. больше по сравнению эталонным вариантом – подкормка растений удобрением «Акварин 12» в сочетании с фунгицидами (табл. 5). Аналогичные результаты некорневой обработки картофеля получены и в отношении препарата КХМ-А (Панова и др., 2011а).

Следует отметить, что положительное влияние препаратов было наиболее значительным в неблагоприятных условиях для роста и развития растений. Выявлена воз-

можность посредством некорневой обработки препаратами КХМ, КХМ-Г и КХМ-А существенно уменьшать негативный эффект на состояние растений почвенной засухи, повышенных уровней УФ-В радиации, неблагоприятных температурных и световых условий, уровней минерального питания, продемонстрирована способность препаратов ускорять деструкцию высокотоксичных веществ в растениях и в почве. Установлена опосредованная действием данных препаратов на растения возможность снижения дозовой нагрузки минеральных удобрений на агроэкосистему при КХМ, КХМ-Г и КХМ-А сохранении урожая сельскохозяйственных культур и качества растительной продукции (Ермаков, Мухоморов, 2001; Ермаков, Канаш, 2005; Панова и др., 2008а; Ермаков, 2009; Панова, 2009; Панова и др., 2010). Так, в условиях стрессовой для роста и развития ячменя температуры воздуха 30°C некорневая обработка растений препаратом КХМ обеспечивает снижение негативного эффекта стрессового фактора на 35%, препаратом КХМ-Г – на 55%, и в результате обработанные им растения не отличаются по биомассе относительно растений, выращенных в благоприятных условиях (табл. 6).

При моделировании в регулируемых условиях дефицита почвенной влаги на уровне 30±5% от полной влагоемкости в фазу трубкования ярового ячменя обработанные препаратом КХМ-Г растения достоверно не отличались от контрольных по показателям продуктивности, в то время как обработанные водой растения в условиях стресса снижали продуктивность более чем на 20% (рис.).

При дефиците азота в почве в полевых условиях двух-трехкратная некорневая обработка растений препаратом КХМ-Г в периоды интенсивного роста и закладки генеративных органов (у ярового ячменя – в фазу трубкования, у столовой свеклы – на стадии 4–6 листьев и в период массового формирования корнеплодов) способствовала снижению негативного влияния данного лимитирующего фактора на зерновую продуктивность ячменя на 35% (табл. 7) и на урожай корнеплодов столовой свеклы на 20% (табл. 8).

**Таблица 1.** Урожайность овощных культур и содержание нитратного азота в листьях растений при воздействии препаратами КХМ, КХМ-Г, КХМ-А в регулируемых условиях

Некорневая обработка веществами	Томат**		Салат***			
	Масса плодов кг·м <sup>-2</sup>	Нитраты, % мг·кг <sup>-1</sup>	Сырая масса кг·м <sup>-2</sup>	Нитраты, % мг·кг <sup>-1</sup>		
Вода (контроль)	13,8±1,4	100	2,7±0,5	100	242,7±11,8	
КХМ	17,4±0,8*	126*	3,0±0,5	111	187,2±10,4*	
КХМ-Г	24,2±2,6*	175*	3,8±0,6*	141*	35,4±8,0*	
КХМ-А	26,0±1,8*	188*	4,4±0,8*	163*	46,6±6,8*	

\* значения достоверно отличаются от контроля на 5%-ном уровне значимости; \*\* растения томата обрабатывали 5 раз в период от стадии образования 3–5 листьев до начала плодоношения; \*\*\* растения салата обрабатывали 4 раза, начиная со стадии образования 4–5 листьев, с периодичностью 5–7 дней.

**Таблица 2.** Продуктивность столовой свеклы гибрид F<sub>1</sub> Пабло\*\* при выращивании в полевых условиях на среднекультуренной дерново-подзолистой почве с минеральным фоном N<sub>40</sub>P<sub>0</sub>K<sub>30</sub> и некорневой обработке растений препаратом КХМ-Г (Меньковский филиал ГНУ АФИ Россельхозакадемии, Ленинградская область)

Некорневая обработка веществами	Масса корнеплодов		Диаметр корнеплода		Число растений /		Масса ботвы	
	кг·м <sup>-2</sup>	% к контролю	см	% к контролю 100	шт.·м <sup>-2</sup>	% к контролю	кг·м <sup>-2</sup>	% к контролю
Вода (контроль)	15,6±0,9	100	6,2±0,6		61±5	100	6,8±0,5	100
КХМ-Г	27,1±0,8*	174*	8,2±0,5*	132*	72±5*	118*	8,8±0,5*	129*

\* значения достоверно отличаются от контроля на 5%-ном уровне значимости; \*\* растения обрабатывали 4 раза: 2 – на стадии 4–6 настоящих листьев, 2 – в фазу массового формирования корнеплодов.

**Таблица 3.** Урожайность моркови\*\*, выращенной при некорневой обработке растений препаратом КХМ-Г в полевых условиях Ленинградской области

Некорневая обработка веществами	стандарт	Масса корнеплодов, т·га <sup>-1</sup>		Масса корнеплодов общая	
		отклонение от контроля в %	нестандарт	отклонение от контроля в %	отклонение от контроля в %
Морковь гибрид F1 Нориннэ					
Акварин 5 + растворы фунгицидов (эталон)	15,6	–	12,2	–	27,8
КХМ-Г	21,9*	+40*	14,2*	+16*	36,1*
Морковь гибрид F1 Нарбонне					
Акварин 5 + растворы фунгицидов (эталон)	40,8	–	22,2	–	63,1
КХМ-Г	53,5*	+31*	7,5*	-66*	61,1

\* значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости; \*\* растения обрабатывали 2 раза в период развития от стадии 2–3 лист до 2–4 лист.

**Таблица 4.** Урожайность сои\*\* при некорневой обработке препаратом КХМ-Г в полевых условиях Рязанской области

Некорневая обработка веществами	Урожайность, т·га <sup>-1</sup>	Прибавка относительно контроля	
		т·га <sup>-1</sup>	%
Сорт Светлая			
Гумат калия (контроль)	0,98	–	–
КХМ-Г	1,21*	+0,23*	+24*
Сорт Касатка			
контроль	0,94	–	–
КХМ-Г	1,28*	+0,34*	+36*

\* значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости; \*\* растения обрабатывали 4 раза: 1 – в период вегетативного роста (14 дней от начала всходов); 2 – в период бутонизации – цветения; 1 – в период формирования бобов – налива семян.

**Таблица 5.** Показатели эффективности применения препарата КХМ-Г для некорневой обработки картофеля<sup>\*\*</sup>

Некорневая обработка веществами	Прибавка урожая относительно контроля, т·га <sup>-1</sup>	Доход, руб.·га <sup>-1</sup>	Пораженность фитопатогенами, % <sup>***</sup>
Эталон* + фунгициды	3,5	55868,8	71
КХМ-Г + фунгициды	4,1	66868,8	49

\* Эталон – некорневая подкормка удобрением «Акварин 12»; контроль – некорневая обработка растворами фунгицидов; \*\* растения обрабатывали 2 раза в период бутонизации – цветения; \*\*\* через 6 месяцев хранения клубней.

**Таблица 6.** Биомасса растений ячменя сорта Белогорский<sup>\*\*</sup> в условиях температурного стресса (30 °С) при некорневой обработке препаратами КХМ и КХМ-Г (в % к контролю, контроль – растения, выращенные при 20 °С, обработанные водой)

Некорневая обработка растений веществами	Биомасса, % к контролю
вода	40*
КХМ	75*
КХМ-Г	95

\* значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости; \*\* растения обрабатывали 3 раза в период выход в трубку – начало колошения.

**Таблица 7.** Зерновая продуктивность ячменя сорта Белогорский<sup>\*\*</sup> при дефицитном азотном питании (N<sub>0</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>) и некорневой обработке растений препаратами КХМ и КХМ-Г в полевых условиях Меньковского филиала ГНУ АФИ Россельхозакадемии

Некорневая обработка растений веществами	Масса зерна, % к контролю
Минеральный фон N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	
вода (контроль)	100
Минеральный фон N <sub>0</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	
вода	42*
КХМ	55*
КХМ-Г	77*

\* значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости; \*\* растения обрабатывали 3 раза в период выход в трубку – начало колошения.

**Таблица 8.** Урожай столовой свеклы гибрид F<sub>1</sub> Пабло<sup>\*\*</sup> при дефицитном минеральном питании (N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>) и некорневой обработке растений препаратами КХМ и КХМ-Г в полевых условиях Меньковского филиала ГНУ АФИ Россельхозакадемии

Некорневая обработка растений веществами	Масса корнеплодов, % к контролю
Минеральный фон N <sub>100</sub> P <sub>40</sub> K <sub>80</sub>	
Вода (контроль)	100
Минеральный фон N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	
вода	23*
КХМ	30*
КХМ-Г	43*

\* значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости; \*\* растения обрабатывали 4 раза: 2 – на стадии 4–6 настоящих листьев, 2 – в фазу массового формирования корнеплодов.

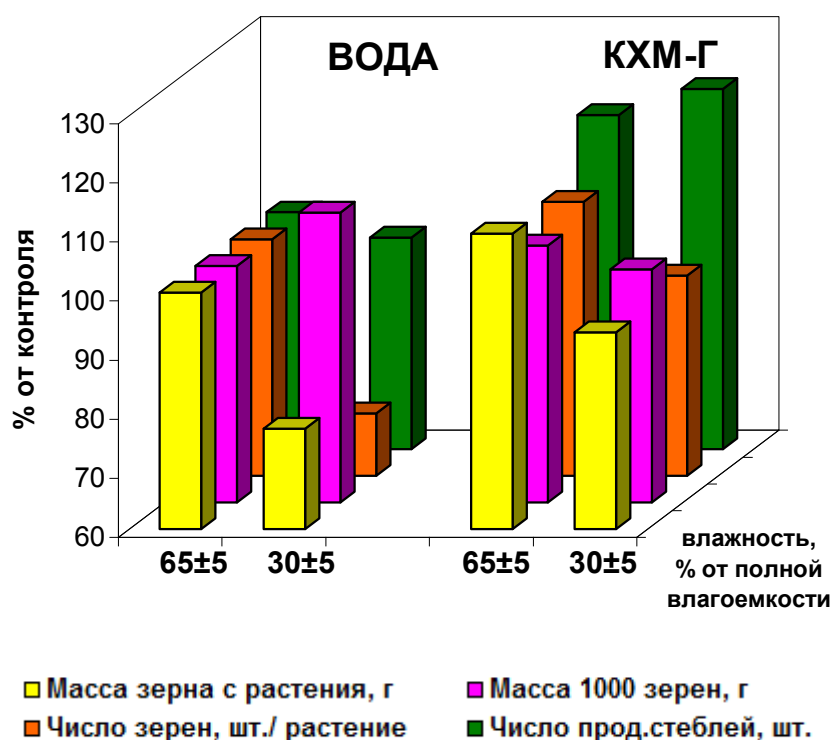


Рис. Влияние некорневой обработки препаратом КХМ-Г на продуктивность растений ячменя при благоприятном и стрессовом уровне содержания влаги в почве (регулируемые условия)

Некорневая обработка растений композицией КХМ-Г обеспечивает повышение устойчивости растений также к биотическим стрессам. Выявлено существенное сдерживающее влияние (20–40%) препарата КХМ-Г на развитие фитофтороза, ризоктониоза и других заболеваний у картофеля, белокочанной капусты (табл. 9), что положительным образом сказалось на качестве кочанов капусты и клубней картофеля в момент уборки и при их хранении.

Установлено, что положительный эффект некорневой обработки кремнийсодержащими препаратами растений проявляется и в последующих их репродукциях. Так, от обработанных КХМ-Г растений ярового ячменя, выращенных в благоприятных условиях и при действии дефицита почвенной влаги, облучении УФ-В радиацией, получена следующая репродукция с более высокой зерновой продуктивностью (на 10–48%) и устойчивостью к данным стрессовым факторам (Панова и др., 2011б).

Обсуждая возможные механизмы положительного воздействия препаратов КХМ-Г и КХМ-А на растения, прежде всего, следует привести данные, свидетельствующие о важной роли присутствия кремния в составе

удобрений (табл. 10) Из таблицы видно, что составные компоненты микроудобрения (на примере КХМ-Г) при действии на растения менее эффективны, чем в сочетании друг с другом.

Выявленные положительные эффекты препаратов КХМ, КХМ-А и КХМ-Г на растения можно объяснить, судя по результатам микробиологических, биохимических и агрохимических анализов листьев, корней и почвы, их прямым и опосредованным действием на систему «почва – микроорганизмы – растение».

На примере применения препаратов КХМ и КХМ-Г установлено, что некорневая обработка растений их растворами приводит к укреплению механических тканей, к увеличению площади корневого питания, интенсификации поглощения минеральных элементов, увеличению содержания хлорофиллов и каротиноидов, усилению аттракции пластичных веществ из вегетативных органов в генеративные, запуску процессов синтеза вторичных метаболитов фитопротекторного характера, к активизации микроорганизмов – своеобразного биореактора на корнях и в прикорневой зоне, обеспечивающих переработку экскретируемых растения-

ми веществ (Панова и др., 2008б; 2010, 2011б).

Так, в регулируемых условиях выявлено, что после некорневой обработки препаратами КХМ, КХМ-Г на корнях растений пшеницы сорта «Сiete церрос», выращиваемой в ризотроне, значительно увеличивается доля протеолитических, амилолитических и олигонитрофильных бактерий, использующих легкодоступные минеральные и органические формы азота в метаболизме, при этом наблюдается снижение относительного числа микромицетов, в том числе потенциально патогенных форм (табл. 11). Подобная картина наблюдается и в естественных условиях. При выращивании ярового ячменя на дерново-подзолистой супесчаной почве с дефицитным и повышенным фоном азотного питания число микромицетов на корнях необработанных растений было соответственно выше на 8 и 85% по сравнению с таковым у растений, обработанных препаратами КХМ-Г (Панова и др., 2008б).

Отмеченное явление свидетельствует об интенсификации экскреторной деятельности корней и указывает на регуляторную роль разработанных кремнийсодержащих препаратов в метаболизме растений, изменения которого прямо и опосредованно влияют на сопутствующую микрофлору и процессы в прикорневой зоне. Косвенным подтверждением этому служат данные по содержанию легкодоступного подвижного органического вещества в почве под обработанными

растениями, показывающие значимое увеличение его содержания (табл. 12).

С активизацией процессов фотосинтеза и синтеза вторичных метаболитов под действием КХМ, КХМ-Г и КХМ-А очевидно связано наблюдаемое у растений уменьшение содержания нитратов в листьях и, как следствие, повышение качества выращиваемой растительной продукции.

Вышесказанное согласуется с литературными данными о влиянии кремнийсодержащих соединений на растения (Adata, Besford, 1986; Datnoff et al., 2001; Ma, Takahashi, 2002; Liang et al., 2003; Ермаков, Канаш, 2005; Ермаков, 2009; Бочарникова и др., 2011).

Таким образом, созданные препараты КХМ-Г и КХМ-А обладают комплексом полезных свойств для растений, выполняя функции биостимуляторов, адаптогенов и фитопротекторов, и при некорневой обработке обеспечивают повышение устойчивости и продуктивности агрофитоценозов.

По результатам апробации препаратов КХМ-Г и КХМ-А в полевых и регулируемых условиях можно рекомендовать их для широкого использования в растениеводческих хозяйствах в качестве высокоэффективных экологически безопасных биостимуляторов с адаптогенными и фитопротекторными свойствами, обеспечивающих снижение затрат энергии и ресурсов на производство растительной продукции.

**Таблица 9.** Степень развития фитофтороза картофеля и бактериальной гнили белокочанной капусты при некорневой обработке растений препаратом КХМ-Г (Меньковский филиал ГНУ АФИ Россельхозакадемии).

Некорневая обработка веществами	Степень развития болезни, %		
	Картофель Фаза бутонизации	Картофель Фаза цветения	Белокочанная капуста Стадия формирования кочана
Контроль (растворы фунгицидов)	90	100	56,5
КХМ-Г + фунгициды	53*	79*	37,8*

\* значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости.



**Таблица 10.** Продуктивность растений томата сорта Ottawa-60 и растений пшеницы сорта Siete cerros при некорневой обработке препаратом КХМ-Г и его составными компонентами в регулируемых условиях.

Некорневая обработка веществами	Масса плодов томата **, г·растение <sup>-1</sup>	Масса зерна пшеницы ***, г·растение <sup>-1</sup>
Вода	972,0±44,6	0,94±0,18
Гумусовые кислоты + микроэлементы	1295,0±44,2*	1,18±0,22
Силикат калия	1250,0±56,0*	1,12±0,16
КХМ-Г	1945,0±46,4*	1,45±0,28*

\* значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости; \*\* растения томата обрабатывали 5 раз в период от стадии образования 3–5 листьев до начала плодоношения; \*\*\* растения пшеницы – 3 раза в период кущение – трюбование.

**Таблица 11.** Численность микроорганизмов в ризоплане растений яровой пшеницы сорта Сиете церрос после обработки их надземной части препаратами КХМ и КХМ-Г

Вариант опыта	КОЕ, ×10 <sup>6</sup> ·г <sup>-1</sup> сухой массы корней				
	протеолитические	Бактерии			Актиномицеты
		амилолитические	олигонитрофильные		
контроль	1238,8 ±227.1	284,4 ±36.0	233.3 ±34.4	0.274±0.021	0.311±0.029
КХМ	2808,9* ±195.1	692,1* ±29.4	774.7* ±58.4	0.293±0.018	0.169* ±0.019
КХМ-Г	3900,0* ±180.2	1935,0* ±140,2	1625,4* ±150,4	0,320±0,026	0,183* ±0,025

\* значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости

**Таблица 12.** Содержание подвижного органического вещества в дерново-подзолистой супесчаной почве с минеральным фоном N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> при облучении растений ячменя сорта Белогорский УФ-В радиацией и некорневой обработке препаратом КХМ

Вариант опыта	Органическое вещество, мг 100 г <sup>-1</sup> почвы
N60P60K60	32,5±0,2
N60P60K60+УФ-В	36,4±0,5
N60P60K60+КХМ	37,7±0,1*
N60P60K60 +КХМ+ УФ-В	35,3±0,1

\* значение достоверно отличается от контроля на 5%-ном уровне значимости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айлер Р. 1982. Химия кремнезема. М.: Мир. 1127 с.
- Аммосова Я. М., Балабко П. Н., Матыченков В. В., Аветян Н. А. 1990. Кремнезем в системе почва-растение. Агрoхимия. 10: 103-108.
- Бочарникова Е. А., Матыченков В. В., Матыченков И. В. 2011. Кремниевые удобрения и мелиоранты: история изучения, теория и практика применения. Агрoхимия. 7: 84-96.
- Воронков М. Г., Зелчан Г. И., Лукевиц А. Ю. 1978. Кремний и жизнь. Рига: Zinatne.
- Ермаков Е. И. 2009. Избранные труды. Изд-во ПИЯФ РАН. Санкт-Петербург. 191 с.
- Ермаков Е. И., Канаш Е.В. 2005. Современные проблемы УФ-В радиации в экофизиологии и растениеводстве. С.-х. биология. Сер.: биол. Раст. 1: 3-20.
- Ермаков Е. И., Медведева И.В. 1980. Комплексное водорастворимое микроудобрение // А.с. № 74641. БИ № 21.
- Ермаков Е. И., Мухоморов В. К. 2001. Антистрессовое воздействие кремнийсодержащего хелатного микроудобрения на растения при некорневой обработке в защищенном грунте. Гавриш. 3:16-18.
- Канаш Е. В., Осипов Ю. А. 2008. Диагностика физиологического состояния и устойчивости растений к действию стрессовых факторов среды (на примере УФ-В радиации). Метод. рекомендации. СПб.: РАСХН / ГНУ АФИ Россельхозакадемии. 35 с.
- Капанов В. К. 2010. Эффективность кремнийсодержащего вещества диатомита на дерново-подзолистой почве / Проблемы агрохимии и экологии. 2: 10-14.

- Ложникова В. Н., Сластя И. В. 2010. Рост растений ярового ячменя и активность эндогенных фитогормонов под действием кремния. *Сельскохозяйственная биология*. 3: 102-107.
- Методические указания по определению нитратов и нитритов в продукции растениеводства – МУ 5048-89. 1989. 51 с.
- Нетрусов А. И., Егорова М. А., Захарчук Л. М. и др. 2005. Практикум по микробиологии / Ред. А. И. Нетрусова. М.: Изд. Центр «Академия». 608 с.
- Панова Г.Г. 2009. Фитопротекторная роль кремнийсодержащих хелатных микроудобрений. *Вестник РАСХН*. 2: 19-21.
- Панова Г. Г., Аникина Л. М., Канаш Е. В., Степанова О. А., Шибанов Д. В. 2008а. Кремнийсодержащие хелатные микроудобрения как адаптогены и протекторы растений в условиях защищенного и открытого грунта / В: *Овощеводство: сб. науч. трудов. НАН Беларуси; РУП «Институт овощеводства»*. Минск. Т. 15. С. 82–88.
- Панова Г. Г., Аникина Л. М., Канаш Е. В., Степанова О. А., Шибанов Д. В. 2008б. Некорневая обработка посевов кремнийсодержащими хелатными удобрениями как ресурсосберегающий прием в адаптивно-ландшафтном земледелии // *Сб. докладов Межд. науч.-практич. конф. «Интенсификация, ресурсосбережение и охрана почв в адаптивно-ландшафтных системах земледелия» (ГНУ ВНИИиЗПЭ, Курск, 10–12 сентября 2008 г.)*. Курск. С. 323–328.
- Панова Г. Г., Аникина Л. М., Канаш Е. В., Удалова О. Р. и др. 2011б. КХМ как ресурсосберегающее средство повышения устойчивости агроэкосистем к действию стрессовых факторов различной природы / *Материалы Всеросс. конф. «Методы оценки сельскохозяйственных рисков и технологии смягчения последствий изменения климата в земледелии» 13–14 октября 2011 г.*, СПб: АФИ. С. 230–232.
- Панова Г. Г., Аникина Л. М., Удалова О. Р., Канаш Е. В. и др. 2010. Методические рекомендации по применению кремнийсодержащих хелатных микроудобрений для повышения продуктивности и устойчивости растений. СПб. 24 с.
- Панова Г. Г., Канаш Е. В., Кочетов А. А., Архипов М. В. и др. 2011а. Методы исследования, диагностики и оптимизации взаимодействия генотип – среда в защищенном и открытом грунте / *Матер. Науч. сессии Агрофизического института «Современное состояние агрофизики и ее задачи»*. Санкт-Петербург, 23–24 декабря 2010 г. СПб. С. 113–130.
- Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов / Ред. И. М. Скурихина и В. А. Тутельяна. М: Брандес – Медицина. 1998. 342 с.
- Самсонова Н. Е. 2005. Кремний в почве и растениях // *Агрохимия*. 6: 76-86.
- Шульц Э., Кершенс М. 1998. Характеристика разлагаемой части органического вещества почв и ее трансформации при помощи экстракции горячей водой. *Почвоведение*. 7:890–894.
- Adatia M. H., Besford R. T. 1986. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. *Ann. Bot.* 58: 343-351.
- Datnoff L. E., Snyder G. H., Korndorfer G. H. 2001. Silicon in Agriculture / Elsevier Science, The Netherlands. 403 p.
- Epstein E. 1999. Silicon // *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50: 641-664.
- FAOSTAT Agricultural statistic Data-Base Gateway. FAO, 2004. World Agricultural Center,
- Liang Y., Chen Q., Liu Q., Zhang W., Ding R. 2003. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *J. of Plant Physiology*. V. 160. Issue 10. P. 1157–1164.
- Liebig, J. 1840. Organic chemistry in its application to agriculture and physiology. Ed. from the manuscript of the author by Lyon Playfair. Taylor and Walton, London. 137 p.
- Ma J. F., Takahashi E. 2002. Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan. The Netherlands: Elsevier. 281 p.
- Snyder G. H. Matichenkov V. V., Datnoff L. E. 2006. Silicon. Handbook of Plant Nutrition. Massachusetts University Press. P. 551–568.
- Yoshida S, Ohnishi Y, Kitagishi K. Histochemistry of silicon in rice plant. III. 1962. The presence of cutical-silica double layer in epidermal tissues. *Soil Science and Plant Nutrition*. 8: 1–5.

