

УДК 631.811.93:631.46:631.559:633

ВЛИЯНИЕ КРЕМНИСТЫХ ПОРОД НА СВОЙСТВА ПОЧВЫ И УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

© 2023 г. А. Х. Куликова

*Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина
432017 Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1, Россия**E-mail: volkova-ivinaelena@yandex.ru*

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

В течение последних 25 лет изучали влияние кремнистых пород (диатомита, цеолита, опоки) на свойства почвы (чернозема типичного, чернозема выщелоченного), урожайность и качество продукции сельскохозяйственных культур (зерновых, картофеля, овощных, технических) при применении как в чистом виде, так и совместно с минеральными удобрениями и птичьим пометом. Изучена возможность создания на основе кремнистых пород новых видов более эффективных удобрений обогащением их элементами или соединениями (в частности аминокислотами), наиболее полно отвечающим требованиям культур. Исследования показали, что урожайность зерновых культур при применении диатомита в качестве удобрения мало уступает минеральным удобрениям. Прибавка урожайности зерна озимой пшеницы в среднем за все годы исследования достигала 0.60–1.30, яровой пшеницы – 0.15–0.67, ячменя – 0.50–0.93 т/га. Прибавка урожайности зерна кукурузы в зависимости от дозы внесения цеолита составила от 0.93 (доза 500 кг/га) до 1.36 (доза 2000 кг/га) т/га. Высоко отзывчивыми на применение кремнистых пород в качестве удобрения были картофель и овощные (огурец, томат, морковь, столовая свекла), а также технические культуры (сахарная свекла, подсолнечник). В частности, урожайность корнеплодов сахарной свеклы в среднем при внесении диатомита в дозе 3 т/га повышалась на 6.5, в отдельные годы – до 8.6 т/га. Очень значительно увеличивалась прибавка урожайности культуры при совместном внесении с азотными удобрениями от 30 до 60 кг д.в./га – на 11.3 и 12.5 т/га соответственно. Высокая эффективность кремний-содержащих пород в качестве удобрений сельскохозяйственных культур была обусловлена их комплексным влиянием на фундаментальные свойства почвы: физические (структурное состояние, плотность почвы, строение пахотного слоя), биологические (активность почвенных микроорганизмов), химические (питательный режим, экологическая безопасность), а также на защитные свойства растений.

Ключевые слова: кремнистые породы, свойства почвы, сельскохозяйственные культуры, качество продукции.

DOI: 10.31857/S0002188123120104, **EDN:** SRXNKR

ВВЕДЕНИЕ

Кремний – элемент, изучению которого посвящено огромное количество работ. Тем не менее, интерес к нему не ослабевает. Одно то, что он самый распространенный после кислорода химический элемент земной коры (кларк его составляет 29.5%), свидетельствует о его исключительной роли в живой и неживой природе. В этом отношении справедливы высказывания выдающихся ученых В.И. Вернадского – “Кремний вырисовывается в мироздании как элемент, обладающий исключительным значением” [1], а также Р. Айлера – “Насколько вода является уникальной жидкостью, настолько и аморфный

кремнезем уникален как твердое вещество. Они во многом схожи” [2].

Кремний является неотъемлемой составной частью растительного организма. То, что по общему содержанию элементов в растениях он занимает 4-е место после кислорода, углерода и водорода, и потребление его превышает суммарное потребление азота, фосфора и калия, свидетельствует о важнейшей роли кремния в физиологических процессах организма. Установлено, что основные функции кремния в системе “почва–растение” сводятся к следующему:

– кремниевые вещества являются базовыми компонентами почвенного тела (среднее содер-

жание Si в почвах равно 33%), составляя его физическую основу;

– кремниевые соединения оказывают комплексное положительное влияние на свойства почвы: физические (строение пахотного слоя, структурное состояние, плотность), биологические (деятельность почвообитающих микроорганизмов, ферментативная активность), химические (содержание элементов питания в доступной форме) [3–7];

– кремний определяет активность иммунной системы растений и защиту посевов в любых стрессовых ситуациях (фитопатогенные организмы, загрязнение тяжелыми металлами и остаточными количествами пестицидов, высокие и низкие температуры, окислительные и солевые стрессы и т.д.) [8–14];

– кремний – один из основных макроэлементов, необходимых растениям и являющийся лимитирующим урожайность сельскохозяйственных культур элементом при дефиците в почвах его подвижных соединений [8, 11, 15–17].

Одно это неполное перечисление функций кремния в почвах и растениях обуславливает необходимость применения кремниевых (силикатных) удобрений на почвах, где наблюдается дефицит доступного кремния (монокремниевой кислоты). Дефицит доступного кремния возможен (и наблюдается) в любых почвах в связи с его безвозвратным отчуждением урожаем сельскохозяйственных культур. Подсчитано, что в мире вынос элемента урожаем сельскохозяйственных культур достигает 210–220 млн т и более ежегодно [18], что составляет 30–700 кг Si/га в зависимости от выращиваемой культуры и величины ее урожайности. Например, картофель при урожайности 20 т/га выносит 250 кг Si/га, что примерно в 5 раз больше его доступных запасов в почве. В результате в почвах складывается отрицательный баланс подвижных соединений кремния на уровне 6–20 кг/га. Результатом такого положения становится ряд негативных последствий: снижение емкости обмена в почвенно-поглощающем комплексе и увеличение кислотности пахотного слоя, замедление ряда микробиологических процессов и появление других неблагоприятных факторов. В конечном итоге это приводит к усилению физической и химической деградации почв и в целом к снижению общей экологической устойчивости почвенного покрова в агроландшафтах [19].

История кремниевых удобрений начинается практически одновременно с установлением наличия кремния в растениях в конце XVIII века.

Первым кремниевым удобрением являлся силикат натрия, который начали применять в 1856 г. на Ротамстедской станции (Англия) [20]. Полученные результаты предопределили дальнейшее изучение и использование кремниевых удобрений. Не останавливаясь на всей истории изучения и применения кремниевых удобрений, следует отметить, что во второй половине XX века и в настоящее время стремительно растет интерес к кремниевым удобрениям, и их производство, начиная с 2000 г., в мире ежегодно растет на 20–30%. В настоящее время их применяют в Японии (с 1955 г. кремниевые удобрения внесены в реестр агрохимикатов), Южной Корее, Китае, Индии, Колумбии, Мексике, США, Австралии, Бразилии. Наша страна силикатные удобрения в широком масштабе не производит. Производятся в определенном количестве кремниевые препараты в качестве стимуляторов и регуляторов роста, средств защиты растений и т.п. (Силиплант, Силацил, Мивал-Агро, Агросил, Кремневит, Аэросил, Энергия – М и др.), физиологическая и агрономическая их эффективность подтверждена в ряде исследований. В этом отношении очень большой интерес в качестве удобрений сельскохозяйственных культур представляют кремнистые породы с высоким содержанием кремния (до 80–85%), в том числе аморфного (активного) до 50% и более, которые чрезвычайно широко распространены в природе. К ним, в первую очередь, относятся диатомиты, цеолиты, бентониты, трепелы, опоки.

Диатомит (кизельгур, инфузорная земля) – уникальная порода осадочного биогенного генеза, образованная из остатков скелетов диатомовых водорослей (Diatomeae). Панцири диатомей представляют из себя полые внутри микроскопические раковины, которые обеспечивают породе очень высокую дисперсность (пористость до 80% и более) и удельную емкость, ионообменную способность и каталитическую активность (рис. 1).

Цеолит – полиминеральная пористая порода, представляющая собой сложный комплекс каркасных полигидратированных алюмосиликатов. Отличительной особенностью цеолитов является их строение, пронизанное каналами и полостями, связанными между собой и окружающей средой, в которых определенным образом находятся ионы K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , а также H_2O , обладающие свободой движения. В связи с этим цеолиты обладают высокой сорбционной, ионообменной способностями и обратимой дегидратацией. Отмеченные особенности цеолита придают ему свойство “молекулярных сит”.

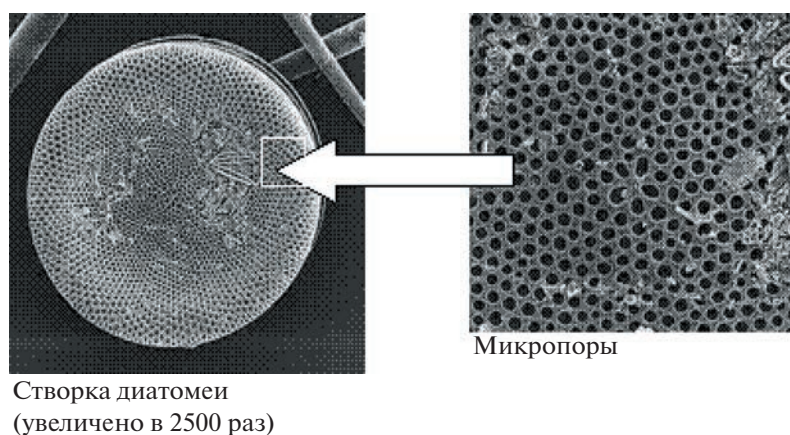


Рис. 1. Скелеты диатомей и их строение.

Бентонит (бентонитовая глина) — полиминеральная глинистая порода преимущественно осадочного генезиса, состоящая в основном из полигидратированных каркасных алюмосиликатов глинистых минералов (монтмориллонита, каолинита, галлуазита, хлорита и др.).

Трепел является тонкозернистой пористой породой осадочного происхождения, который сложен аморфным кремнеземом. По внешнему виду, физическим свойствам и химическому составу трепел почти не отличим от диатомита и отличить эти породы в большинстве случаев можно только под микроскопом.

Опоки (О) состоят из кремнезема, представленного рентгеноморфным опалом и *L*-кристаллитом и содержат до 20–30% глинистого материала, представленного гидрослюдами и монтмориллонитом. Кроме того, в опоках присутствует песчано-алевритовый материал, представленный преимущественно кварцем, а также глауконитом.

В табл. 1 и 2 приведены общие физические и физико-химические свойства, среднее содержание макроэлементов в кремнистых породах [21, 22]. Из приведенных данных следует, что природные кремнистые породы имеют различный хими-

ческий и минералогический состав, микроструктуру на наноразмерном уровне, различные свойства. Тем не менее, несмотря на разнородный состав и свойства природных кремнийсодержащих материалов, общим для них является:

- высокое содержание общего кремния, в том числе аморфного;
- высокие адсорбционная, ионообменная способности и каталитическая активность;
- нейтральная, слабо- и среднещелочная реакция среды;
- специфический характер пористости;
- присутствие элементов питания (Ca, Mg, P, K, S, Mn);
- экологическая безопасность (отсутствие вредных примесей, в том числе тяжелых металлов);
- доступность (огромные запасы во многих регионах).

Цель работы — изучение влияния высококремнистых пород Ульяновской обл. на свойства почвы и урожайность сельскохозяйственных культур.

Таблица 1. Общие физические и физико-химические свойства кремнистых пород

Показатель	Единица измерения	Порода			
		диатомит	цеолит	бентонит	трепел
Плотность	г/см ³	0.5–0.9	2.0–2.3	2.6–2.8	0.7–1.0
Удельная поверхность	м ² × 10 ³ /кг	20–50	47–95	50–120	100–130
Эффективный диаметр пор	нм	70–100	0.3–0.6	2–8	40–50
Ионообменная емкость	мг-экв/100 г	12–80	34–48	80–150	20–28
pH _{H₂O}	ед. pH	7.2	8.3	9.5	7.5

Таблица 2. Среднее содержание макроэлементов в кремнистых породах

Показатель		Единица измерения	Порода			
			диатомит	цеолит	бентонит	трепел
Кремний (SiO ₂)	Общий (валовый)	%	83.1	56.6	57.4	51.7
	Аморфный	%	42.1	26.7	18.4	Не определяли
Кальций (CaO)	Общий	%	0.52	13.30	1.81	17.1
	Обменный	мг/кг	10	4800	28	Не определяли
Магний (MgO)	Общий	%	0.48	1.90	3.01	1.2
	Обменный	мг/кг	39	1600	30	Не определяли
Натрий (Na ₂ O)	Общий	%	0.42	0.20	0.78	0.18
	Обменный	мг/кг	—	—	5.46	Не определяли
Алюминий (Al ₂ O ₃)	Общий	%	5.82	19.60	14.70	6.1
Железо (Fe ₂ O ₃)	Общий	%	2.47	2.34	3.0	1.8
Фосфор (P ₂ O ₅)	Общий	%	0.05	0.23	0.004	0.2
	Растворимый	мг/кг	37	260	65	41
Калий (K ₂ O)	Общий	%	1.25	1.82	1.03	1.0
	Растворимый	мг/кг	350	250	0.87	Не определяли

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование по изучению возможности использования высококремнистых пород Ульяновской обл. (на территории области сосредоточено почти 1/4 запасов диатомита страны) в Ульяновском ГАУ (кафедра “Почвоведение, агрохимия и агроэкология”) проводили и проводят, начиная с конца прошлого века, т.е. ≈25 лет. За это время проведены более 150-ти полевых (мелко- и крупноделяночных), а также производственных (более 20-ти) опытов с использованием диатомита и опоки Инзенского, цеолита Майнского месторождений Ульяновской обл. с применением как в чистом виде, так и совместно с минеральными удобрениями (в том числе микроэлементными), птичьим пометом и биопрепаратами, а также для предпосевного опудривания семян и посадочного материала.

Мелко- и крупноделяночные опыты проводили в четырех-, производственные — в трехкратной повторности с рендомизированным размещением делянок. Учетная площадь делянок составляла: зерновых и технических культур — от 20 до 60 м², картофеля и овощных — 10 м², в производственных опытах — 3 и 5 га. Почвы опытных полей: чернозем выщелоченный и чернозем типичный, по гранулометрическому составу среднесуглинистые. Обеспеченность подвижным фосфором и обменным калием (пахотный слой) — от средней до

очень высокой, реакция почвенного раствора — от слабокислой до близкой к нейтральной.

Полевые опыты и статистическую обработку данных проводили со строгим соблюдением методических требований [23], анализы почвенных и растительных образцов — по соответствующим ГОСТам в аккредитованной лаборатории “САС “Ульяновская” (№ RA.RU.510251) и испытательной лаборатории “Ульяновская ГСХА”. Определение урожайности культур осуществляли со всей площади учетных делянок. Схемы полевых опытов приведены в соответствующих таблицах результатов исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Огромный экспериментальный материал, полученный в течение четверти века, позволил установить, доказать, что высококремнистые породы являются многофункциональным, высокоэффективным, экологически безопасным удобрением пролонгированного действия для применения как в чистом виде, так и для производства удобрений нового поколения, которые позволят поднять земледелие страны на новый уровень. Ниже приведены основные результаты исследования при возделывании зерновых, технических, овощных культур.

Зерновые культуры (озимая и яровая пшеница, ячмень, кукуруза). В табл. 3, 4, 5 представлена уро-

Таблица 3. Урожайность яровой пшеницы и ячменя в зависимости от применения диатомита (Д), макро- и микроэлементов (2003–2005 гг.), т/га

Вариант		Яровая пшеница			Ячмень		
		урожай- ность	отклонение от контроля		урожай- ность	отклонение от контроля	
			т/га	%		т/га	%
Контроль без удобрений		1.58	—	—	1.79	—	—
Д 5 т/га		2.25	+0.67	42	2.72	+0.93	52
Д 2,5 т/га + N28P35K32		2.28	+0.70	44	2.65	+0.86	48
Д 2,5 т/га + N28P35K32 + Mo + Mn*		2.74	+1.16	73	3.19	+0.40	78
N56P70K63		2.31	+0.73	46	2.69	+0.9	50
N56P70K63 + Mo + Mn		2.39	+0.81	51	2.70	+0.91	51
HCP ₀₅	2003 г.	0.13			0.16		
	2004 г.	0.12			0.15		
	2005 г.	0.12			0.13		

*Предпосевная обработка 0.05%-ным водным раствором молибдата аммония и сульфата марганца.

Таблица 4. Урожайность озимой пшеницы в зависимости от применения диатомита (Д) и минеральных удобрений

Вариант	Годы исследования			Отклонение от контроля	
	2004 г.	2005 г.	среднее	т/га	%
Контроль без удобрений	1.83	1.27	1.55	—	—
N40P40K40	2.17	1.47	1.82	+0.27	17
Д 3 т/га	2.28	1.46	1.87	+0.32	21
Д 3 т/га + N20	2.47	1.51	1.87	+0.44	28
Д 3 т/га + N40	2.68	1.62	1.99	+0.60	39
<i>HCP</i> ₀₅	0.10	0.11			

Таблица 5. Урожайность зерна кукурузы в зависимости от доз применения цеолита (Ц) в качестве удобрения (2016–2018 гг.), т/га

Вариант	Урожайность, т/га				Отклонения от контроля	
	2016 г.	2017 г.	2018 г.	Среднее	т/га	%
Контроль без удобрений	6.21	5.59	5.87	5.89	—	—
Ц 500 кг/га	7.36	6.51	6.58	6.82	+0.93	10
Ц 2000 кг/га	7.88	6.73	7.15	7.25	+1.36	23
N60P60K60	8.36	7.27	7.58	7.74	+1.85	31
Ц 500 кг/га + N60	8.64	7.42	7.97	8.01	+2.12	36
Ц 2000 кг/га + N60	9.07	7.72	8.27	8.35	+2.46	42
<i>HCP</i> ₀₅	0.42	0.27	0.31			

жайность зерновых культур в зависимости от применения диатомита и цеолита как в чистом виде, так и совместно с минеральными удобрениями.

Исследование показало, что урожайность зерновых культур при применении диатомита и цео-

лита в качестве удобрения мало уступало или не уступало по эффективности минеральным удобрениям, в отдельные годы — превосходило. Например, прибавка урожайности яровой пшеницы при применении диатомита в чистом виде (доза 5 т/га) в среднем за 3 года составила 0.67 т/га,

Таблица 6. Влияние диатомита и минеральных удобрений на урожайность корнеплодов сахарной свеклы

Вариант		Годы исследования				Отклонение от контроля	
		2003	2004	2005	среднее	т/га	%
1.	Контроль без удобрений	24.2	21.5	42.3	29.3	—	—
2.	N60P60K60	33.0	28.2	49.2	36.8	+7.5	26
3.	Д 3 т/га	32.7	28.0	46.6	35.8	+6.5	22
4.	Д 3 т/га + N30	37.5	30.9	53.4	40.6	+11.3	39
5.	Д 3 т/га + N60	37.9	31.2	56.2	41.8	+12.4	42
<i>HCP₀₅</i>		3.4	2.5	2.9	—		

не уступая варианту с минеральными удобрениями, ячменя — 0.93 т/га, озимой пшеницы (доза диатомита 3 т/га) — 0.32 т/га. Эффективность диатомита в системе удобрения озимой пшеницы значительно повышалась при его применении в дозе 3 т/га совместно с мочевиной в дозе N20–40.

Результаты исследования свидетельствовали об очень высокой отзывчивости кукурузы на применение кремниевых удобрений, в данном случае цеолита: прибавка урожайности зерна в среднем за 3 года составила от 0.93 до 1.36 т/га, мало уступая варианту с полной дозой минеральных удобрений (N60P60K60). Важно отметить, что при внесении в почву цеолита совместно с мочевиной (N_м60) урожайность зерна кукурузы не уступала, более того, в среднем за 3 года превосходила вариант с применением полного минерального удобрения (N60P60K60). Последнее свидетельствовало о том, что при возделывании кукурузы и других сельскохозяйственных культур на почвах с высокой обеспеченностью доступными фосфором и калием в случае применения кремниевых удобрений можно обойтись без фосфорно-калийных удобрений. Однако применение средних доз азота при этом было необходимым.

Технические и овощные культуры. Высоко отзывчивыми на применение кремнистых пород являются технические и овощные культуры (сахарная свекла, картофель, огурец, томат, морковь, столовая свекла). В табл. 6 приведена урожайность сахарной свеклы, которая в среднем при внесении в почву диатомита в дозе 3 т/га повышалась на 6.5 т/га, в отдельные годы — до 8.5 т/га. Очень значительно увеличивалась прибавка урожайности культуры при совместном внесении диатомита с азотным удобрением в дозах от N30 до N60 (на 11.3 и 12.4 т/га соответственно), а также при локальном внесении удобрений при посеве сахарной свеклы (табл. 7). Применение диатомита на фоне небольших доз минеральных удобрений (N15P15K15)

позволило сформировать урожайность корнеплодов сахарной свеклы, не уступающую варианту с использованием полных доз азотно-фосфорных-калийных удобрений (N60P60K60). При этом важно отметить, что при использовании диатомита как в чистом виде, так и совместно с минеральными удобрениями, повышалась сахаристость корнеплодов и выход сахара с 1-го га увеличился на более чем 40–50%. Последнее обязано, прежде всего, кремнию, присутствующему в диатомите в аморфном состоянии. В научной литературе есть сведения, что кремний участвует в синтезе углеводов в растительном организме [24]. Увеличение массы корнеплодов сахарной свеклы и повышение сахара в них при внесении кремниевых удобрений отмечал еще Ю. Либих [25].

Аналогичные результаты наблюдали при возделывании овощных культур с применением диатомита в качестве удобрения как в чистом виде, так и совместно с птичьим пометом: урожайность огурца в среднем за 3 года увеличилась на 5.1, томата — на 4.9, моркови — на 5.9, свеклы столовой — на 7.1 т/га. Наиболее отзывчивыми на внесение кремниевых удобрений (в данном случае диатомита) были морковь и свекла столовая: в 2001 г. их урожайность превысила контроль на 10.9 т/га. Последнее, по-видимому, кроме кремния было обусловлено присутствием в породе >1% калия, т.к. обе культуры являются калиелюбивыми. Добавление к диатомиту птичьего помета сопровождалось почти удвоением прибавок урожайности овощных культур.

Породы с высоким содержанием кремния, являясь природными сорбентами с высокими сорбционными и ионообменными свойствами, оказывали пролонгированное действие на последующие культуры (рис. 2). Например, на 3-й год после внесения диатомита в дозе 5 т/га урожайность ячменя повышалась на 40%, на 4-й год — на 10% с улучшением качества продукции.

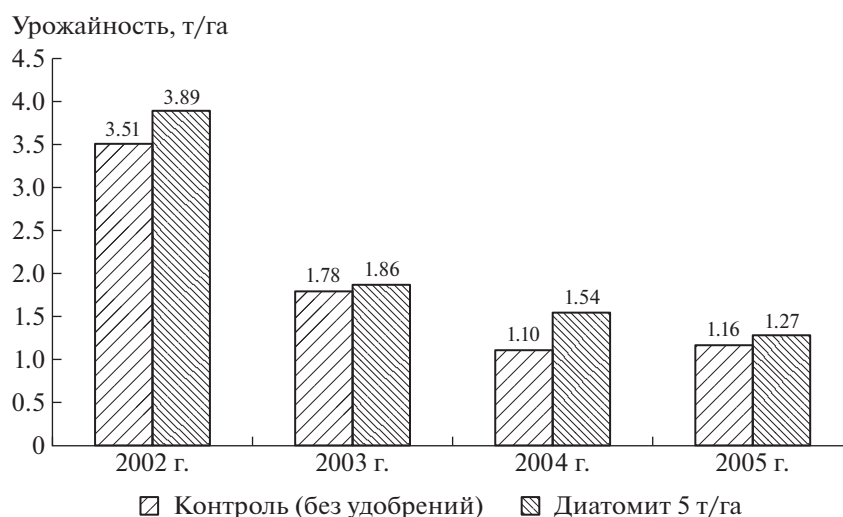


Рис. 2. Последствие диатомита, внесенного в 2001 г. под озимую пшеницу, на урожайность культур (опытное поле УГСХА): 2002 г. — озимая пшеница, 2003 г. — яровая пшеница, 2004 г. — ячмень, 2005 г. — ячмень.

Удобрения на основе кремнистых пород. По мнению большинства исследователей, в том числе в наших опытах, показано, что ценность кремнистых пород в качестве минерального сырья можно значительно повысить при их совместном применении с органическими и минеральными удобрениями. Полученные результаты их применения являются теоретической базой для создания на основе кремнистых пород новых видов экологически безопасных, агрономически и экономически эффективных удобрений, в наибольшей степени отвечающих требованиям отдельных групп культур (зерновые, технические, овощные) к условиям произрастания, в том числе — к питательному режиму. В связи с этим нами совместно с технологами и производителями г. Ульяновска разработаны состав и технология производства удобрений на основе цеолита Майнского месторождения Ульяновской обл. внедрением в него аминокислот животного происхождения. Испытания этих удобрений проводили в течение 2020–2022 гг. при возделывании ряда сельскохозяйственных культур (озимой пшеницы, кукурузы, рапса, проса, сои). В табл. 8 приведены результаты исследования применения цеолита в чистом виде и обогащения его аминокислотами в разных дозах в технологии возделывания проса. Данные свидетельствовали, что обогащение цеолита аминокислотами очень значительно повышало эффективность его в качестве удобрения: прибавка урожайности зерна практически удваивалась и не уступала по влиянию минеральным удобрениям.

Влияние кремнистых пород на свойства почвы. Высокая эффективность высококремнистых пород в качестве удобрения сельскохозяйственных культур обусловлена их комплексным положительным влиянием на свойства и режимы почв.

Прежде всего, кремнистые породы оказывали несомненное оструктурирующее действие на почву, что наблюдали во все годы исследования. Внесение в почву цеолита, в том числе обогащенного аминокислотами, в достаточно небольших дозах (250 и 500 кг/га) при возделывании кукурузы сопровождалось улучшением всех агрофизических показателей почвы (табл. 9): увеличилось количество агрономически ценных агрегатов (10–0.25 мм) на 10.9 и 19.9%, в том числе водопропрочных — на 1.7 и 3.7%. Соответственно уменьшилась плотность почвы и приобрела показатель, оптимальные для возделывания кукурузы. Последнее было обусловлено тем, что поликремниевые кислоты способны склеивать почвенные частицы в агрегаты [26]. Эффективность цеолита при обогащении его аминокислотами в улучшении физических показателей пахотного слоя почвы усиливалась.

Использование цеолита способствовало повышению водоудерживающей способности почвы, экономному и рациональному использованию запасов продуктивной влаги в течение вегетации сельскохозяйственных культур (табл. 10). К концу вегетации кукурузы запасы продуктивной влаги при использовании как цеолита, так и удобрения на его основе, в пахотном слое превышали контроль на 4–8, в 1-метровом слое — на 7–15 мм.

Таблица 7. Влияние диатомита (припосевное опудривание семян) и минеральных удобрений на урожайность и качество корнеплодов сахарной свеклы

Вариант		Урожайность, т/га			Отклонение от контроля		Содержание сахара, %		Выход сахара	
		2007 г.	2008 г.	среднее	т/га	%	2007 г.	2008 г.	т/га	отклонение от контроля
1	Контроль без удобрений	36.8	22.2	29.5	—	—	18.3	15.2	5.0	—
2	N60P60K60	50.3	30.1	40.2	+10.7	36	19.3	15.3	7.0	40
3	Д 40 кг/га	48.9	25.5	37.2	+7.7	26	21.6	16.6	7.1	42
4	N60P60K60 + Д 40 кг/га	52.2	32.2	42.2	+12.7	43	21.6	17.1	8.2	64
5	N30P30K30 + Д, 40 кг/га	48.6	28.2	38.4	+8.9	30	22.0	17.0	7.5	50
6	N15P15K15 + Д 40 кг/га	52.1	27.5	39.8	+10.3	35	20.0	17.0	7.4	48
	<i>HCP</i> ₀₅	2.1	1.9	—	—	—	0.2	0.3	—	—

Таблица 8. Влияние цеолита (Ц), в том числе обогащенного аминокислотами, на урожайность проса (2020–2022 гг.), т/га

Вариант	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее	Отклонения от контроля	
					т/га	%
Контроль	2.33	2.62	3.56	2.84	—	—
Ц 250 кг/га	2.55	3.06	3.88	3.16	+0.32	11
Ц 500 кг/га	2.72	3.11	4.23	3.35	+0.51	18
Ц, обогащенный аминокислотами, 250 кг/га	3.08	3.35	4.32	3.58	+0.74	26
Ц, обогащенный аминокислотами, 500 кг/га	3.17	3.42	4.47	3.69	+0.85	30
N60P60K60	3.24	3.45	4.66	3.78	+0.94	33
<i>HCP</i> ₀₅	0.18	0.12	0.15			

Таблица 9. Показатели физического состояния чернозема выщелоченного под посевами кукурузы при внесении в почву цеолита (Ц) как в чистом виде, так и обогащенного аминокислотами и карбамидом (среднее за 2020–2022 г.)

Вариант	Содержание агрегатов, % (сухое просеивание)			K_c^*	Содержание водопрочных агрегатов, %		Плотность почвы, г/см ³
	>10 мм	10–0.25 мм	<0.25 мм		3–0.25 мм	<0.25 мм	
Контроль без удобрений	39.8	53.0	7.2	1.13	67.8	32.2	1.25
Ц 250 кг/га	29.7	63.9	6.4	1.77	69.5	30.5	1.19
Ц 500 кг/га	20.6	72.9	6.5	2.69	71.5	28.5	1.16
Ц, обогащенный аминокислотами, 250 кг/га	20.8	73.2	6.0	2.73	71.2	28.8	1.18
Ц, обогащенный аминокислотами, 500 кг/га	18.4	75.8	5.8	3.13	72.7	27.3	1.14
N60P60K60	33.1	59.8	7.1	1.49	67.0	33.0	1.26

* K_c — коэффициент структурности.

Таблица 10. Запасы продуктивной влаги в черноземе выщелоченном под посевами кукурузы при внесении экспериментальных удобрений, мм

Вариант	Посев				Уборка			
	Слой почвы, см							
	0–30 см		0–100 см		0–30 см		0–100 см	
	запасы	отклонение от контроля	запасы	отклонение от контроля	запасы	отклонение от контроля	запасы	отклонение от контроля
Контроль (без удобрений)	37	–	149	–	30	–	111	–
Ц 250 кг/га	41	+4	159	+10	34	+4	118	+7
Ц 500 кг/га	49	+12	162	+13	38	+8	123	+12
Ц, обогащенный аминокислотами, 250 кг/га	43	+6	157	+8	38	+8	121	+10
Ц, обогащенный аминокислотами, 500 кг/га	45	+8	165	+16	38	+8	126	+15
N60P60K60	36	–1	150	+1	29	–1	104	–7
НСП ₀₅	3		7		4		6	

Таблица 11. Степень поражения листьев свеклы возбудителями болезней и вредителями

Вариант	Степень поражения	Охвачено листовой поверхностью, %	Характерные признаки поражения
Контроль без удобрений	Сильная	>51	Отмерли листья нижнего и часть листьев среднего яруса
N60P60K60	Средняя	26–50	Поражены листья верхнего и частично среднего ярусов
Д 40 кг/га	Незначительная	<5	Отдельные пятна на листьях нижнего и среднего ярусов
N60P60K60 + средства защиты растений (СЗР)	Отсутствует	<1	Отсутствуют

Диатомит благоприятно (через улучшение агрофизических показателей и водного режима почвы) влиял на ее биогенность: активность почвенных микроорганизмов повышалась на 20–30%, что положительно сказалось на питательном режиме почвы. Содержание в пахотном слое основных элементов питания значительно увеличилось, в том числе водорастворимого кремния — на 20–25%, что способствовало оптимизации кремниевого питания растений.

В связи с высоким содержанием аморфного кремния кремнистые породы обладают защитными свойствами: поражаемость грибными заболеваниями томата снижалась на 80%, повышалась устойчивость к полеганию зерновых культур, степень поражаемости листьев свеклы возбудителями болезней, вредителями снижалась сравнимо с

использованием химических средств защиты растений (табл. 11). Применение кремнистых пород в системе удобрения очень значительно повышало экологическую безопасность продукции.

ВЫВОДЫ

1. Кремнистые породы (диатомиты, цеолиты и др.) являются высокоэффективным комплексным удобрением пролонгированного действия при возделывании зерновых (озимой и яровой пшеницы, ячменя, кукурузы, проса), картофеля и овощных (томата, моркови, огурца, свеклы столовой) культур, в ряде случаев не уступающим минеральным удобрениям. При этом урожайность культур в зависимости от доз кремнистых пород повышалась на 40–50% и более.

2. Высокая эффективность кремнистых пород в качестве удобрения сельскохозяйственных культур обусловлена их комплексным положительным влиянием на свойства почвы: физические и водно-физические (структурное состояние, плотность приобретали оптимальные параметры для любых культур, запасы продуктивной влаги в пахотном слое увеличивались на 4–13 мм), биологические (активность почвенных микроорганизмов повышалась на 20–30%), химические (содержание элементов питания, в том числе кремния в доступной форме, увеличивалось на 20–25%).

3. Кремнистые породы в связи с высоким содержанием аморфного кремния обладают защитными свойствами, почти не уступающими химическим средствам защиты растений.

Автор приносит искреннюю признательность и благодарность всем своим ученикам и коллективу кафедры “Почвоведение, агрохимия и агроэкология” за понимание и совместный труд, результаты которого приведены в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Биосфера (Избранные труды по биогеохимии). М.: Мысль, 1967. 374 с.
2. Айлер Р. Химия кремнезема. В 2-х т. М.: Мир, 1982. 1127 с.
3. Munk H. Zur bedeutung silikatisher stoffe bei der oun-gung landwirtschaftlecker rulturpflanzen // Landwirt Forsch. 1982. V. 34. Sonder 38. P. 264–277.
4. Никитин Е.Д., Сабодина Е.П., Иванов О.П., Витязев В.Г. Почва как сложная система, ее экофункции и их антропогенная трансформация // Сложные системы. 2012. № 4 (5). С. 41–54.
5. Козлов А.В., Куликова А.Х., Уромова И.П. Влияние высококремнистых пород (диатомита, цеолита и бентонитовой глины) на активность олиготрофного и автохтонного микробного пула // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2017. № 4 (40). С. 44–65.
6. Самсонова Н.Е. Кремний в почвах и растениях // Агрохимия. 2005. № 6. С. 76–86.
7. Агафонов Е.В., Хованский М.В. Влияние бентонита на повышение плодородия чернозема обыкновенного // Почвоведение. 2014. № 5. С. 597–601.
8. Gong H.J., Chen K.M., Zhao Z.G., Chen G.C., Zhou W.J. Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages // Biol. Plantarum. 2008. V. 52. P. 592–596.
9. Tubana B.S., Babu T., Datnoff L.E. A review of silicon in soils and plants and its role US agriculture; history and future perspectives // Soil Sci. 2016. V. 181 (9/10). P. 33–41.
10. Artyszak A. Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality – a literature review in Europe // Plants. 2018. V. 7 (54). P. 1–17.
11. Самсонова Н.Е., Капустина М.В., Зайцева З.Ф. Влияние соединений кремния и минеральных удобрений на урожайность яровых зерновых культур и содержание в них антиоксидантных ферментов // Агрохимия. 2013. № 10. С. 66–74.
12. Wang X., Ou-Yang C., Fan Z. Effects of exogenous silicon on seed germination and antioxidant enzyme activities of *Monordiacharantin* under salt stress // Plant Sc. 2010. № 6. P. 700–708.
13. Pirzad A., Mohammadzadeh S. Zeolite use efficiency variation under water deficit stress in grass pea and lentil // Журн. Сибир. фед. ун-та. Сер.: Биол. 2016. № 9 (3). С. 291–303.
14. Пашкевич Е.Б., Кирюшин Е.П. Роль кремния в питании растений и в защите сельскохозяйственных культур от фитопатогенов // Пробл. агрохим. и экол. 2008. № 2. С. 52–57.
15. 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.
16. Козлов А.В., Куликова А.Х., Яшин Е.А. Роль и значение кремния и кремнийсодержащих веществ в агроэкосистемах // Вестн. Минин. ун-та. 2015. № 2(10). С. 23.
17. Куликова А.Х. Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур: монография. Ульяновск: Ульяновск. ГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. 176 с.
18. Матыченков В.В., Бочарников Е.А., Аммосова Я.М. Влияние кремниевых удобрений на растения и почву // Агрохимия. 2002. № 2. С. 86–93.
19. Самсонова Н.Е. Кремний в растительных и животных организмах // Агрохимия. 2019. № 1. С. 80–96.
20. Аммосова Я.М., Дьяков В.М., Матыченков В.В., Чернышев Е.А. Использование соединений кремния в сельском хозяйстве. М.: Минхимпром, 1990. Вып. 7 (98). 32 с.
21. Козлов А.В. Роль кремниевых соединений и пород в функционировании почвенно-поглощающего комплекса и микробно-ферментной системы дерново-подзолистой почвы: Дис. д-ра биол. наук. Н. Новгород, 2021. 508 с.
22. Дистанов У.Г., Конюхова Т.П. Природные сорбенты и охрана окружающей среды // Химизация сел. хоз-ва. 1990. № 9. С. 34–35.
23. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
24. Yamaji N., Mitatni N., Ma J.F. A Transporter regulating silicon distribution in rice shoots // Plant Cell. 2008. № 20 (5). P. 1381–1389.
25. Либих Ю. Химия в приложении к земледелию и физиологии. М.–Л.: Сельхозгид, 1936. Вып. 39. С. 41–69.
26. Norton L.D. Mineralogy of high calcium sulfur-containing coal combustion by-products and their effect on soil surface sealing // Agriculture Utilization of Urban and Industrial By-products. 1995. P. 87–106.

Siliceous Rocks in the Fertilizer System of Agricultural Crops

A. Kh. Kulikova

*P.A. Stolypin Ulyanovsk State Agrarian University
Novy Venets Boulevard 1, Ulyanovsk 432017, Russia
E-mail: volkova-ivinaelena@yandex.ru*

Over the past 25 years, the influence of siliceous rocks (diatomite, zeolite, flask) on soil properties (typical chernozem, leached chernozem), yield and quality of agricultural crops (cereals, potatoes and vegetables, technical) when used both in pure form and together with mineral fertilizers and bird droppings has been studied. The possibility of creating new types of more effective fertilizers based on siliceous rocks by enriching them with elements or compounds (in particular amino acids) that most fully meet the requirements of crops has been studied. Studies have shown that the yield of grain crops when using diatomite as a fertilizer is little inferior to mineral fertilizers. Thus, the increase in grain yield of winter wheat on average over all the years of research reached 0.60–1.30, spring wheat – 0.15–0.67, barley – 0.50–0.93 t/ha. The increase in corn grain yield, depending on the dose of zeolite application, ranged from 0.93 (dose of 500 kg/ha) to 1.36 (dose of 2000 kg/ha) t/ha. Potatoes and vegetables (cucumbers, tomatoes, carrots, table beets), as well as industrial crops (sugar beet, sunflower) are highly responsive to the use of siliceous products as fertilizers. In particular, the yield of sugar beet root crops increased by 6.5 t/ha on average when diatomite was applied at a dose of 3 t/ha, and in some years – up to 8.6 t/ha. The increase in crop yield increased very significantly when combined with nitrogen fertilizers from N30 to N60 – by 11.3 and 12.5 t/ha. The high efficiency of silicon-containing rocks as fertilizers of agricultural crops is due to their complex influence on the fundamental properties of the soil: physical (structural condition, soil density, structure of the arable layer), biological (activity of soil microorganisms), chemical (nutritional regime, environmental safety), as well as on the protective properties of plants.

Keywords: siliceous rocks, soil properties, agricultural crops, product quality.