

СОДЕРЖАНИЕ КРЕМНИЯ В АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКАХ, ПОЧВАХ И ПОЧВЕННЫХ РАСТВОРАХ, ПОТЕРИ ПРИ ВЫМЫВАНИИ И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЕГО КУЛЬТУРАМИ ЗВЕНА СЕВОБОРОТА, ВОЗДЕЛЫВАЕМЫХ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ЛЕГКОСУГЛИНИСТЫХ И РЫХЛОСУПЕСЧАНЫХ ПОЧВАХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**Г. В. Пироговская¹, И. Е. Ермолович¹, В. В. Матыченков²,
С. С. Хмелевский¹, А. С. Максимчук¹, В. И. Сороко¹**

*¹Институт почвоведения и агрохимии,
г. Минск, Беларусь*

*²Институт фундаментальных проблем биологии,
г. Пущино, Россия*

ВВЕДЕНИЕ

Кремний по распространенности в земной коре является вторым элементом после кислорода. Однако, несмотря на его высокое валовое содержание в почвах, его доступность для растений очень низкая. В настоящее время существует интерес к применению кремния, как к элементу, который совместно с углеродом формирует почвенное плодородие и является экологически чистой альтернативой пестицидам. В почвах при дефиците кремниевых кислот и уменьшении содержания аморфного кремнезема наблюдается разрушение органоминерального комплекса, ухудшается минералогический состав почв, агрофизические свойства и ускоряется деградация почвенного органического вещества. Имеются данные, свидетельствующие о важной роли этого элемента в формировании продуктивности сельскохозяйственных культур, в процессах формирования устойчивости растений к различным неблагоприятным факторам окружающей среды, положительном его влиянии на качество продукции и участии его в процессах жизнеобеспечения сельскохозяйственных животных и человека. В условиях изменяющегося климата в сторону потепления и снижения количества выпадающих атмосферных осадков, внесение в почву природных соединений, положительно влияющих на сохранение агрофизических свойств и плодородия почв, является актуальным направлением исследований [1–4].

Недостаточно изученными являются вопросы влияния кремнийсодержащих материалов на рост и развитие растений, потребление его растениями.

Что касается миграции и трансформации водорастворимого кремния вниз по профилю почв, т. е. потери его при вымывании, то такие данные практически отсутствуют как в отечественной, так и зарубежной литературе.

В связи с этим, комплексное изучение вопроса поступления кремния с атмосферными осадками, миграция его соединений с инфильтрационными водами по почвенному профилю, вынос с основной и соответствующим количеством побочной продукции культур звена севооборота является актуальной темой при

проведении лизиметрических исследований, имеющих важное как научное, так и практическое значение.

По данным, полученным на лизиметрической станции РУП «Институт почвоведения и агрохимии», расположенной в центральной части Республики Беларусь (г. Минск), за последние 35 лет (1981–2015 гг.) среднегодовая температура воздуха увеличилась на 0,8 °С и составила 6,6 °С по сравнению со среднемноголетними значениями за 1961–1990 гг. (5,8 °С), сумма активных температур воздуха выше 5–10 °С в период вегетации растений (май–сентябрь) увеличилась за 1991–2000 гг. на 86,1 °С, а за 2001–2012 гг. – на 208,7 °С. Среднегодовое количество атмосферных осадков за 1981–2015 гг. уменьшилось на 100 мм (на 14,4 %) и составило 596 мм по сравнению с 1961–1990 гг. [5]. Среднемноголетние данные по изменению температуры воздуха и количеству выпавших атмосферных осадков за последние 30 лет (с 1991 по 2020 гг.) показывают, что в г. Минске среднегодовая температура воздуха составила 6,9 °С, а количество атмосферных осадков – 687,5 мм. Все это свидетельствует об изменении климатических факторов в Республике Беларусь.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования по поступлению кремния на поверхность почв с атмосферными осадками, потерям при вымывании, содержанию в почвах и потреблению его сельскохозяйственными культурами в звене севооборота: картофель (2021 г.) – кукуруза (2022 г.) проводились на лизиметрической станции в 2-х лизиметрических опытах на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава.

В статье приводились данные только на дерново-подзолистых легкосуглинистых и рыхлосупесчаных почвах, полученных в лизиметрическом опыте № 2. В опыте применяли как стандартные – карбамид, аммонизированный суперфосфат, калий хлористый (базовый вариант), так и комплексные удобрения с добавками кремнийсодержащих добавок (содержание кремния в удобрениях 8 %). Площадь лизиметров – 3,14 м², глубина лизиметров – 1,0–1,5 м.

Внешний вид состояния картофеля в условиях 2021 г. представлен на фото 1, а кукурузы (2022 г.) – фото 2.



Фото 1. Состояние посева картофеля на лизиметрической станции РУП «Институт почвоведения и агрохимии» (13.07.2021 г.)



Фото 2. Состояние растений кукурузы на лизиметрической станции РУП «Институт почвоведения и агрохимии» (19.07.2022 г.)

В лизиметрических опытах в 2021 г. был посажен картофель сорта Бриз, в 2022 г. высевали гибрид кукурузы Шавокс F1.

На лизиметрической станции имеются два осадкомера. С 1981 г. проводится систематический учет и анализ атмосферных осадках, в которых определяется содержание макро- и микроэлементов. В 2021 и 2022 гг. в атмосферных осадках дополнительно начали определять содержание массовой концентрации кремнекислоты в пересчете на кремний согласно методической документации ПНД Ф 14.1:2:4.215-06 «Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации кремнекислоты (в пересчете на кремний) в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой кислоты» [6].

В почвенных растворах (лизаты из лизиметров) определялось содержание монокремниевых соединений (мономерно-димерных форм кремния) по методике: РД 52.24.433-2018 «Массовая концентрация кремния в водах. Методика измерений фотометрическим методом в виде желтой формы молибдокремниевой кислоты (с поправкой № 1) [7] и ПНД Ф 14.1:2:4.215-06 «Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации кремнекислоты (в пересчете на кремний) в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой кислоты».

Содержание кремния в клубнях картофеля, зеленой массе и зерне кукурузы определено по методу Г. А. Барсуковой, представленном в учебном пособии «Агро- и биохимические методы исследования состояния экосистем» [8].

На лизиметрической станции ежегодно систематически проводятся наблюдения за количеством выпадающих атмосферных осадков и учет инфильтрационных вод, определяются концентрации элементов питания в почвенных растворах и атмосферных осадках, а также их содержанием в пахотном и подпахотном горизонтах исследуемых почв.

Закладка лизиметрических опытов, уход за растениями, учет инфильтрационных вод, уборка и учет урожая проводились в соответствии с общепринятыми методиками по проведению лизиметрических исследований.

Анализ лизиметрических вод и атмосферных осадков выполнялся согласно методикам О. А. Алекина, Е. В. Аринушкиной и Ю. В. Новикова и др. [9–11].

В пробах атмосферных осадков (дождевая вода, снег) и лизиметрических водах дополнительно определялись методом ионной хроматографии: рН, N-NO₂, N-NO₃, N-NH₄, PO₄, K, Na, S, Ca, Mg, F, Br, Li и микроэлементы (Cu, Mn, Zn, Co) – СТБ ГОСТ Р 51309-2001.

Определение показателей почвенного плодородия проводилось согласно общепринятым методам в почвоведении и агрохимии: отбор почвенных образцов – по ГОСТ 2,483-85; рН_{KCl} – потенциометрическим методом ГОСТ 26483-85; подвижные формы фосфора и калия в 0,2 моль/л вытяжке HCl – по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91) с последующим определением фосфора на фотоэлектроколориметре, калия – на пламенном фотометре; обменные катионы Ca²⁺, Mg²⁺ – по К. К. Гедройцу (ГОСТ 26487-85); содержание гумуса – по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91).

В растительных образцах (в зеленой массе и зерне кукурузы) определяли азот, фосфор, калий, кальций, магний после мокрого озоления (смесью серной кислоты и перекиси водорода) согласно следующим ГОСТ: азот – ГОСТ 13496.4-93, фосфор – ГОСТ 28902-91, калий – ГОСТ 30504-97, кальций – ГОСТ 26570-95, магний – ГОСТ 30502-97; содержание кремния в зеленой массе и зерне кукурузы проводилось фотоколориметрическим методом, сухое вещество – весовым методом (ГОСТ 27548-97); содержание нитратов – ионометрическим экспресс методом (ГОСТ 13496.19-86).

Гидротермический коэффициент (ГТК) определялся по формуле Г. Т. Селянинова: $ГТК = \Sigma X / \Sigma T * 10$; где: ΣX – сумма осадков за период; ΣT – сумма положительных температур воздуха за тот же период.

Результаты исследований обрабатывали статистически по Б. А. Доспехову с использованием соответствующих программ дисперсионного анализа на ПЭВМ [12].

Работа выполнена в рамках ГПНИ 9. Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность, подпрограмма 9.1 «Плодородие почв и защита растений», по заданию 1.2.6 «Изучение миграции и трансформации кремния в дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава в системе «почва – удобрение – растение» (по данным лизиметрических исследований)».

Авторы выражают признательность сотрудникам лаборатории почвенно-агрохимических анализов РУП «Институт почвоведения и агрохимии» за определение валового содержания кремния в почвах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание водорастворимого кремния в атмосферных осадках различалось в зависимости от погодных условий, количества выпавших атмосферных осадков и по месяцам: в 2020 г. с августа по декабрь его содержание было на уровне от 0,10 до 0,61 мг/дм³, в 2021 г. с января по декабрь – от 0,14 до 0,49 мг/дм³, в январе–ноябре 2022 г. – от 0,23 до 0,44 мг/дм³ и не превышало ПДК (ПДК в воде и объектах питьевого и культурно-бытового назначения составляет 10 мг/л или 10 мг/дм³).

Основная часть соединений кремния играет роль минерального каркаса и инертна по отношению к питанию растений. Растения могут усваивать только подвижные низкомолекулярные формы кремниевые кислоты, содержание которых

в почвах не превышает 150–200 мг (SiO₂)/кг почвы и сопоставимо с наличием подвижных форм фосфора и обменного калия. Запасы усвояемых форм кремния пополняются за счет растворения и разрушения почвенных минералов в процессе выветривания и при разложении растительных остатков, откуда кремниевая кислота освобождается в двух формах – в виде опала, заполняющего клетки эпидермиса надземной части растений, и в виде водорастворимой кремниевой кислоты.

Содержание доступных подвижных (потенциальных, актуальных и активных) соединений кремния в почвах приводим за 2022 г. (весна, осень). Содержание подвижных потенциальных форм кремния определялось в вытяжке 0,1 НСl, актуальных – водная вытяжка и активных – расчетная величина.

Установлено, что содержание вышеуказанных форм кремния в почвах изменяется в зависимости от гранулометрического состава почв, по генетическим горизонтам, и времени отбора проб (весна, осень). На дерново-подзолистой легкосуглинистой почве внесение кремнийсодержащих удобрений не оказывало влияния на снижение данных форм кремния в пахотном и подпахотных слоях почвы к осени (табл. 1).

Таблица 1

Содержание подвижных (потенциальных) форм кремния в дерново-подзолистых легкосуглинистых и рыхлосупесчаных почвах, 2022 г.

Варианты	Содержание подвижных форм кремния (Si), мг/кг почвы					
	Апах		± к 22.03.22	A ₂ B ₁		± к 22.03.22
	22.03.22	27.09.22		22.03.22	27.09.22	
Дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на легком лесовидном суглинке						
Контроль без удобрений	155	148	–7	123	135	12
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	113	100	–13	130	138	8
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	103	113	10	118	130	12
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	95	100	5	98	103	5
Дерново-подзолистая рыхлосупесчаная, развивающаяся на рыхлой супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком						
Контроль без удобрений	160	183	23	165	138	–27
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	128	85	43	145	120	–25
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	115	75	–40	125	115	–10
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	115	70	–45	133	105	–28
НСР ₀₅	6,69	6,38	–	6,98	6,29	–

На дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почве в пахотном слое в вариантах с удобрениями к осени происходит обеднение почв подвижными потенциальными формами кремния по сравнению с контролем. Но в целом, к осени как в пахотных, так и подпахотных горизонтах уменьшается содержание подвижных форм кремния (табл. 1).

Содержание доступных для растений актуальных форм кремния в пахотном слое на дерново-подзолистой легкосуглинистой, развивающейся на легком лесовидном суглинке, почве, к осени снижалось как в пахотном, так и в подпахотном слоях почвы, при внесении удобрений. Исключение составило применение удобрения, в состав которого был включен кремнийсодержащий отход ОАО «Гранит», где наблюдалось его увеличение. На рыхлосупесчаной почве наблюдалось увеличение содержания подвижного актуального кремния к осени как на контроле, где удобрения не вносились, так и в вариантах с удобрениями. В подпахотном слое почвы отмечалось преимущественное его увеличение в осенний период по сравнению с весенним (табл. 2).

Таблица 2

Содержание доступных подвижных (актуальный) форм кремния в дерново-подзолистых легкосуглинистых и рыхлосупесчаных почвах, 2022 г.

Варианты	Содержание подвижных форм кремния (Si), мг/кг почвы					
	Апах		± к	A ₂ B ₁		± к
	22.03.22	27.09.22	22.03.22	22.03.22	27.09.22	22.03.22
Дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на легком лесовидном суглинке						
Контроль без удобрений	2,51	2,51	0,00	3,34	3,34	0,00
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	3,34	2,51	-0,83	4,18	3,34	-0,84
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	4,18	1,67	-2,51	5,01	3,34	-1,67
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	5,85	9,19	3,34	3,34	5,01	1,67
Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на рыхлой супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком						
Контроль без удобрений	7,52	9,19	1,67	2,01	5,85	3,84
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	3,34	14,20	10,86	3,34	5,01	1,67
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	3,34	9,19	5,85	4,18	5,01	0,83
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	2,51	10,02	7,51	5,01	5,01	0,00
НСР ₀₅	0,265	0,581	–	0,203	0,241	–

В пахотном слое дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почвы отмечалось увеличение содержания подвижного активного кремния к осени как на контроле, где удобрения не вносились, так и в вариантах с удобрениями. В подпахотном слое почвы наблюдалось преимущественное его снижение в осенний период по сравнению с весенним. На дерново-подзолистой легкосуглинистой, развивающейся на легком лессовидном суглинке, почве, содержание подвижного активного кремния как в пахотном, так и в подпахотном слое снижалось к осени при внесении удобрений. Исключение составило применение удобрения в состав которого был включен кремнийсодержащий отход ОАО «Гранит», где наблюдалось увеличение его содержания (табл. 3).

Таблица 3

Содержание доступных подвижных (активных) форм кремния в дерново-подзолистых легкосуглинистых и рыхлосупесчаных почвах, 2022 г.

Варианты	Содержание подвижных форм кремния (Si), мг/кг почвы					
	Апах		± к 22.03.22	A ₂ B ₁		± к 22.03.22
	22.03.22	27.09.22		22.03.22	27.09.22	
Дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на легком лессовидном суглинке						
Контроль без удобрений	180,1	172,6	-7,5	155,9	168,4	12,5
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	145,9	125,1	-20,8	171,8	170,9	-0,9
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	144,3	129,2	-15,1	167,6	163,4	-4,2
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	153,5	191,9	38,4	130,9	132,6	1,7
Дерново-подзолистая рыхлосупесчаная, развивающаяся на рыхлой супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком						
Контроль без удобрений	235,2	274,4	39,2	215,1	196,0	-19,1
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	160,9	227,0	66,1	178,4	170,1	-8,3
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	148,4	166,9	18,5	166,8	165,1	-1,7
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	140,1	170,2	30,1	182,6	155,1	-27,5
НСР ₀₅	8,07	10,27	–	8,24	8,55	–

По шкале И. В. Матыченкова, содержание подвижных форм кремния в весенний и в осенний периоды в дерново-подзолистой легкосуглинистой и рыхлосупесчаной почвах относятся по уровню дефицита кремния для растений к среднему и высокому (уровень дефицита Si в почвах «дефицит» или «высокий уровень дефицита» [13].

Содержание кремния в почвенных растворах. В почвенном растворе кремниевые соединения представлены двумя важными группами – инертными и биогеохимически активными. К последней относятся монокремниевая и поликремниевая кислоты, растворимые комплексы с неорганическими и кремнийорганическими соединениями. Они обладают наибольшей химической и биологической активностью.

Содержание монокремниевых соединений в почвенных растворах, где применяли как стандартные, так и кремнийсодержащие удобрения приведено в таблицах 4, 5.

При возделывании картофеля (2021 г.) на дерново-подзолистых легкосуглинистых и рыхлосупесчаных почвах при применении разных форм удобрений содержание мономерно-димерных форм кремния в почвенных растворах изменялось в зависимости от гранулометрического состава почв и сезона года. К концу вегетационного периода значительно уменьшалось их содержание на контрольных вариантах без внесения минеральных удобрений (табл. 4).

Таблица 4

Содержание мономерно-димерных форм кремния (в пересчете на кремний) в почвенных растворах (лизатах) дерново-подзолистых легкосуглинистых и рыхлосупесчаных почвах, 2021 г.

Тип почвы и гранулометрический состав	Содержание кремния (Si), мг/л (мг/дм ³)		
	22.03.2021	28.09.2021	± к осени
Дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на легком лессовидном суглинке			
Контроль без удобрений	7,86	5,20	-2,66
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	4,41	4,91	0,50
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	4,19	4,20	0,01
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	4,32	4,52	0,20
Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на рыхлой супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком			
Контроль без удобрений	1,84	1,70	-0,14
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	2,12	2,92	0,80
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	2,00	2,29	0,29
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	1,63	2,16	0,53
НСП ₀₅	0,29	0,31	–

В условиях 2022 г. содержание растворимых мономерно-димерных форм кремния в почвенных растворах во всех трех отборах изменялось в зависимости от типа и гранулометрического состава почв, а также вносимых удобрений. Установлено, что содержание монокремниевых соединений в почвенных растворах было более высоким в легкосуглинистых почвах и самое низкое – в рыхлосупесчаных почвах. Применение в опыте удобрений способствовало преимущественному увеличению мономерно-димерных форм кремния в лизатах к концу вегетационного периода, в то время как на контроле наблюдалось их уменьшение. Четко выраженного влияния кремнийсодержащих удобрений на содержание монокремниевых соединений в лизатах не выявлено (табл. 5).

**Содержание мономерно-димерных форм кремния (в пересчете на кремний)
в почвенных растворах (лизатах) дерново-подзолистых легкосуглинистых
и рыхлосупесчаных почвах, 2022 г.**

Тип почвы и гранулометрический состав	Содержание кремния (Si), мг/л, (мг/дм ³)			
	04.01.2022	16.03.2022	19.09.2022	± к весне
Дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на легком лессовидном суглинке				
Контроль без удобрений	4,42	4,14	4,06	-0,08
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	3,44	4,69	4,47	-0,22
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	3,45	4,50	3,56	-0,94
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	4,44	4,86	5,05	0,19
Среднее	3,94	4,55	4,29	-0,26
Дерново-подзолистая рыхлосупесчаная, развивающаяся на рыхлой супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком				
Контроль без удобрений	1,86	1,48	1,44	-0,04
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	1,77	1,85	1,91	0,06
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	1,79	1,44	1,70	0,26
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	1,62	1,33	1,41	0,08
Среднее	1,76	1,53	1,62	0,09
HCP ₀₅	0,255	0,286	0,218	–

Потери кремния при вымывании с лизиметрическими водами различались преимущественно в зависимости от гранулометрического состава почв. Так, наибольшими значениями потерь кремния при вымывании в 2021–2022 гг. характеризовались дерново-подзолистые легкосуглинистые почвы, где потери в контрольных вариантах составляли в зависимости от года исследований от 5,91 до 12,70 кг/га, со стандартными удобрениями – 4,04–4,72 кг/га. Вынос кремния из рыхлосупесчаной почвы составил на контроле 2,56–4,50 кг/га, со стандартными удобрениями – 1,61–1,72 кг/га. Внесение кремнийсодержащих удобрений достоверно увеличивало потери кремния из изучаемых почв, по сравнению с вариантом где применялись стандартные удобрения, в том числе на легкосуглинистых почвах в зависимости от кремнийсодержащего удобрения, до 4,45–7,62 кг/га, из рыхлосупесчаных почв – 1,84–3,33 кг/га (табл. 6).

Урожайность клубней картофеля в условиях 2021 г. на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в контрольном варианте составила 331 ц/га, в варианте со стандартными удобрениями – 420, при внесении комплексного NPK удобрения с добавками отхода кремния Гомельского химического завода в дозе N₉₀P₆₈K₁₃₅ – 483, а NPK удобрения с добавками отхода кремния ОАО «Гранит» –

468 ц/га. Прибавка урожайности картофеля от кремнийсодержащих соединений, включенных в состав комплексного удобрения, составила от 48 до 63 ц/га (11,4–15,0 %) по сравнению с внесением стандартных удобрений.

Таблица 6

Вынос кремния с лизиметрическими водами на дерново-подзолистых легкосуглинистых и рыхлосупесчаных почвах, 2021–2022 гг.

Варианты	Потери кремния при вымывании, кг/га	
	2021 г.	2022 г. (на 19.09.2022 г.)
Дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на легком лессовидном суглинке		
Контроль без удобрений	12,70	5,91
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	4,72	4,04
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	5,84	4,45
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием, (отходы ОАО «Гранит»)	5,59	7,62
Среднее	7,21	5,51
Дерново-подзолистая рыхлосупесчаная, развивающаяся на рыхлой супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком		
Контроль без удобрений	4,50	2,56
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	1,72	1,61
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	3,21	1,84
N ₉₀₊₃₀ P ₈₅ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	3,33	2,53
Среднее	3,19	2,14
НСП ₀₅	0,338	0,237

Урожайность зеленой массы кукурузы в 2022 г. на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в контрольном варианте составила 338 ц/га, в варианте со стандартными удобрениями – 655, при внесении комплексного NPK удобрения с добавками отхода кремния Гомельского химического завода – 699, а NPK удобрения с добавками отхода кремния ОАО «Гранит» – 715 ц/га. Прибавка урожайности зеленой массы кукурузы от кремнийсодержащих соединений, включенных в состав комплексного удобрения на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах, составила от 44 до 60 ц/га (6,7–9,2 %) по сравнению с внесением стандартных удобрений.

Самая низкая урожайность зеленой массы кукурузы получена на дерново-подзолистой рыхлосупесчаной, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком, почве: на контроле – 204 ц/га, в вариантах с удобрениями – от 409 до 500 ц/га. При этом прибавка зеленой массы кукурузы от внесения кремнийсодержащих удобрений по сравнению со стандартными была самой высокой и составила 73–91 ц/га, или 17,8–22,2 %.

Урожайность зерна кукурузы различалась в зависимости от гранулометрического состава почв, а также применяемых удобрений и составляла в условиях 2022 г. от 76,8 до 151,0 ц/га. Применение комплексных удобрений с добавками кремнийсодержащих соединений при возделывании кукурузы на дерново-подзолистых легкосуглинистых, связно- и рыхлосупесчаных почвах обеспечило

высокую урожайность зерна кукурузы – 142,0–151,0 ц/га, с тенденцией увеличения урожайности зерна по отношению к вариантам со стандартными удобрениями на 2,3–6,9 ц/га, при НСР₀₅ = 7,39 ц/га. Исключение составил вариант с внесением комплексного удобрения с кремнийсодержащим отходом ОАО «Гранит» на дерново-подзолистой рыхлосупесчаной почве, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком, где было получено достоверное увеличение урожайности зерна кукурузы по отношению к стандартным удобрениям на 11,3 ц/га.

Данные по накоплению кремния основной и соответствующим количеством побочной продукции культур звена севооборота (картофель – кукуруза) представлены в таблице. 7.

Содержание кремния в клубнях картофеля (2021 г.) сорта Бриз в клубнях картофеля на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в контрольном варианте составляло 1,11 %, с удобрениями стандартными – 2,35 и с кремнийсодержащими удобрениями – 4,78–5,35 %, соответственно на рыхлосупесчаной почве – 0,89, 2,23 и 4,77–5,10 %. Это свидетельствует о том, что при внесении кремнийсодержащих удобрений доступность для растений кремния увеличивается.

Содержание кремния в ботве на первой почве, в зависимости от вариантов опыта, было в пределах от 0,57 до 3,54 %, на второй почве – от 0,16 до 2,06 и на третьей – от 0,40 до 3,17 %. При этом минимальное его значение было в контрольных вариантах и со стандартными удобрениями (базовые варианты) (табл. 7).

Содержание кремния в зерне кукурузы на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве изменялось от 0,063 до 0,132 %, на рыхлосупесчаной – от 0,075 до 0,115 %. Применяемые в опыте удобрения с кремнийсодержащими отходами значительно увеличили содержание кремния в зерне кукурузы по сравнению с внесением стандартных удобрений: на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве – на 0,057–0,069 %, на рыхлосупесчаной – на 0,007–0,019 % (табл. 7).

Таблица 7

Содержание кремния в клубнях, ботве картофеля и зерне кукурузы на дерново-подзолистых легкосуглинистых и рыхлосупесчаных почвах, 2021–2022 гг.

Почвы	Содержание кремния в картофеле, % на сухое вещество		Содержание кремния в зерне кукурузы, % на сухое вещество,
	в клубнях	в ботве	
Дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на легком лессовидном суглинке			
Контроль без удобрений	1,11	0,57	0,088
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	2,35	0,89	0,063
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	5,35	3,54	0,120
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «Гранит»)	4,78	2,42	0,132
Дерново-подзолистая супесчаная, развивающаяся на рыхлой супеси, подстилаемой с глубины 0,3 м рыхлым песком			
Контроль без удобрений	0,89	0,40	0,075
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ (стандартные) без кремния – базовый	2,23	1,37	0,096
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ с кремнием (отходы ОАО «ГХЗ»)	5,10	3,17	0,103
N ₉₀ P ₆₈ K ₁₃₅ с кремнием, (отходы ОАО «Гранит»)	4,77	2,73	0,115
НСР ₀₅	0,236	0,119	0,0069

ВЫВОДЫ

Содержание водорастворимого кремния в атмосферных осадках различается в зависимости от погодных условий, количества выпавших атмосферных осадков и месяцам: в годы исследований (2020–2022 гг.) этот показатель изменялся в пределах от 0,10 до 0,61 мг/дм³ и не превышал ПДК (ПДК в воде и объектах питьевого и культурно-бытового назначения составляет 10 мг/л или 10 мг/дм³).

Содержание подвижных соединений (потенциального, актуального и активного) кремния в дерново-подзолистых легкосуглинистых и рыхлосупесчаных почвах изменялось в зависимости от гранулометрического состава почв, по генетическим горизонтам и форм применяемых удобрений: в весенний и в осенний периоды наблюдался дефицит кремния для растений, уровень дефицита Si в почвах «дефицит» или «высокий уровень дефицита».

Содержание мономерно-димерных форм кремния (в пересчете на кремний) в почвенных растворах в вариантах с удобрениями на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах в ранневесенний период перед посадкой картофеля изменялось от 4,19 до 4,41 мг/дм³ (мг/л), перед посевом кукурузы – от 3,44 до 4,44 мг/л, соответственно на рыхлосупесчаных почвах – от 1,63 до 2,12 мг/л и от 1,62 до 1,79 мг/л, после уборки картофеля на легкосуглинистой почве – 4,20–4,91 и кукурузы – 3,56–5,05 мг/л и на рыхлосупесчаной почве – 2,16–2,92 и 1,41–1,91 мг/л.

Потери кремния при вымывании с лизиметрическими водами различались преимущественно в зависимости от гранулометрического состава почв. Так, наибольшими значениями потерь кремния при вымывании в 2021–2022 гг. характеризовались дерново-подзолистые легкосуглинистые почвы, где его потери в контрольных вариантах составляли в зависимости от года исследований от 5,91 до 12,70 кг/га, с удобрениями – от 4,04 до 7,62 кг/га. Вынос кремния из рыхлосупесчаной почвы составил на контроле 2,56–4,50 кг/га, с удобрениями – от 1,61 до 3,33 кг/га.

Применение кремнийсодержащих комплексных удобрений под картофель на дерново-подзолистых легкосуглинистых и рыхлосупесчаных почвах позволяло увеличить урожайность клубней картофеля на 48–63 ц/га по сравнению с внесением стандартных удобрений, зеленой массы кукурузы – на 44–91 ц/га, зерна кукурузы – на 2,3–11,3 ц/га соответственно.

Содержание кремния в клубнях картофеля в вариантах с удобрениями на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах изменялось в пределах от 2,35 (стандартные удобрения) до 4,78–5,35 % (кремнийсодержащие), рыхлосупесчаных – от 2,23 до 4,77–5,10%, в ботве картофеля – от 0,89 до 2,42–3,54 % и от 1,37 до 2,73–3,17 %, зерне кукурузы – от 0,063 до 0,120–0,132 и от 0,096 до 0,103–0,115 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронков, М. Г.* Биохимия, фармакология и токсикология соединений кремния / М. Г. Воронков, Г. И. Зелчан, Э. Я. Лукевиц. – Рига: ЗИНАТНЕ, 1987. – 587 с.
2. *Ермолаев, А. А.* Кремний в сельском хозяйстве / А. А. Ермолаев. – Москва, 1992. – 253 с.
3. *Куликова, А. Х.* Кремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур / А. Х. Куликова, А. В. Карпов, Е. А. Яшин; Мин-во сельского хоз-ва Рос. Фед., ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ им. П. А. Столыпина». – Ульяновск, 2020. – 174 с.

4. Соколова, Т. А. Глинистые минералы в почвах / Т. А. Соколова, Т. Я. Дронова, И. И. Толпешта. – М., 2005. – 336 с.
5. Пироговская, Г. В. Поступление, потери элементов питания растений в системе «атмосферные осадки – почва – удобрение – растение» / Г. В. Пироговская. – Минск: Беларуская навука, 2018. – 227 с.
6. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации кремнекислоты (в пересчете на кремний) в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой кислоты / ПНД Ф 14.1:2:4.215-06. – М., 2022. – 22 с.
7. Массовая концентрация кремния в водах. Методика измерений фотометрическим методом в виде желтой формы молибдокремниевой кислоты (с попр. № 1) / РД 52.24.433-2018. – Ростов на Дону, 2025. – 40 с.
8. Титова, В. И. Агро- и биохимические методы исследования состояния экосистем: учеб. пособие для вузов / В. И. Титова, Е. В. Дабахова, М. В. Дабахов; Нижегород. гос. с.-х акад. – Н. Новгород: изд-во ВВАГС, 2011. – 170 с.
9. Аринушкина, Е. В. Руководство по химическому анализу почв / Е. В. Аринушкина. – изд. 2-е переработ. и доп. – М., МГУ, 1970. – 487 с.
10. Новиков, Ю. В. Методы исследования качества воды водоемов / Ю. В. Новиков, К. О. Ласточкина, З. Н. Болдина; под ред. А. П. Шицковой. – М.: Медицина, 1990. – 339 с.
11. Алекин, О. А. Руководство по химическому анализу вод суши / О. А. Алекин, А. Д. Семенов, Б. А. Скопинцев. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 270 с.
12. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – 5-е изд., доп. и перераб. / Б. А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
13. Подвижные кремниевые соединения в системе почва – растение и методы их определения / И. В. Матыченков [и др.] // Вестник Московского ун-та. – Сер. 17. – Почвоведение. – 2016. – № 3. – С. 37–46.

SILICON CONTENT IN ATMOSPHERIC PRECIPITATION, SOILS AND SOIL SOLUTIONS, LOSS DURING LEACHING AND CONSUMPTION BY CROPS OF THE CROP ROTATION LINK CULTIVATED ON SOD-PODZOLIC LIGHT LOAMY AND LOOSE SANDY SOILS OF THE REPUBLIC BELARUS

**G. V. Pirogovskaya, I. E. Ermolovich, V. V. Machenkov, S. S. Khmelevsky,
A. S. Maksimchuk, V. I. Soroko,**

Summary

The article presents the results of research for 2020–2021. according to the intake of silicon compounds with atmospheric precipitation, the accumulation of mobile (potential, actual and active) silicon compounds in soddy-podzolic light loamy and loose sandy soils, with which lysimeters are filled, monosilicon compounds in soil solutions, data on the yield and accumulation of silicon of the first and the second crops of the crop rotation link (potatoes, corn), depending on the forms of fertilizers used.

Поступила 09.12.22