

Номер 12

ISSN 0002-1881

Декабрь 2023



# АГРОХИМИЯ

[www.sciencejournals.ru](http://www.sciencejournals.ru)



# СОДЕРЖАНИЕ

Номер 12, 2023

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

### Плодородие почв

Влияние активных форм кремния на фосфатное состояние дерново-подзолистой почвы <i>Е. А. Бочарникова, В. В. Матыченков, Г. В. Пироговская</i>	3
Влияние кремнистых пород на свойства почвы и урожайность сельскохозяйственных культур <i>А. Х. Куликова</i>	11
Влияние диатомита, цеолита и бентонитовой глины на агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы и урожайность сельскохозяйственных культур <i>А. В. Козлов, А. Х. Куликова, И. П. Уромова</i>	22
Оценка показателей кислотности-основности буферности и направления трансформации соединений кремния в дерново-подзолистой почве при применении различных кремнистых пород <i>А. В. Козлов, А. Х. Куликова</i>	31
Запасы почвенного органического углерода при нулевой обработке почвы в условиях среднего Поволжья <i>К. В. Иващенко, С. В. Сушко, Ю. А. Дворников, Л. А. Мирный, Л. В. Орлова, Н. Д. Ананьева, С. В. Непримерова, А. В. Юдина, Н. М. Троц</i>	47

### Удобрения

Влияние кремнийсодержащей агроруды (диатомита) на урожайность сельскохозяйственных культур и качество растениеводческой продукции <i>Е. Н. Кузин, А. Н. Арефьев, Е. Е. Кузина</i>	57
Влияние длительного применения минеральных удобрений на засоренность зернотравянопропашного севооборота <i>А. М. Шпанев, В. В. Смук, М. А. Фесенко</i>	67

### Агроэкология

Эффективность некорневой подкормки льна-долгунца препаратом Контролфит-Si на разных фонах минерального питания в условиях Центрального Нечерноземья <i>А. М. Конова, А. Ю. Гаврилова, Н. Е. Самсонова</i>	75
Урожайность культур и баланс элементов питания в зернопаровом севообороте в условиях сухой степи Бурятии <i>А. С. Билтуев, Л.-З. В. Будажапов, А. К. Уланов</i>	85

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методы исследования активных форм кремния в природных водах, почвах, растениях и агрохимикатах <i>Е. А. Бочарникова, В. В. Матыченков</i>	92
--	----

### ОБЗОРЫ

Биостимуляторы на основе кремния <i>А. О. Гранкина</i>	98
Кремниевые препараты в сельском хозяйстве <i>Е. А. Бочарникова, В. В. Матыченков, И. В. Матыченков</i>	106
Предметный указатель к журналу "Агрохимия" за 2023 г.	114

# Contents

---

No. 12, 2023

---

## EXPERIMENTAL ARTICLES

### Soil Fertility

Effect of Active Si on Phosphate State in Sod-Podzolic Soils <i>E. A. Bocharnikova, V. V. Matichenkov, G. V. Pirogovskaya</i>	3
Siliceous Rocks in the Fertilizer System of Agricultural Crops <i>A. Kh. Kulikova</i>	11
Influence of Diatomite, Zeolite and Bentonite Clay on Agrochemical Indicators Sod-Podzolic Soil and Yield Agricultural Crops <i>A. V. Kozlov, A. Kh. Kulikova, I. P. Uromova</i>	22
Acid-Base Buffering Assessment and Directions of Silicon Compound Transformation in Sod-Podzolic Soil when Used Various Siliceous Rocks <i>A. V. Kozlov, A. Kh. Kulikova</i>	31
Soil Organic Carbon Stocks under No-Tillage in the Middle Volga Region <i>K. V. Ivashchenko, S. V. Sushko, Yu. A. Dvornikov, L. A. Mirny, L. V. Orlova, N. D. Ananyeva, S. V. Neprimerova, A. V. Yudina, N. M. Trots</i>	47

---

### Fertilizers

Influence of Silicon-Containing agro-ore (diatomite) on the Yield of Agricultural Crops and the Quality of Crop Production <i>E. N. Kuzin, A. N. Arefyev, E. E. Kuzina</i>	57
Influence of Long-Term Use of Mineral Fertilizers on Weed Infestation of Grain-Grass-Rowed Crop Rotation <i>A. M. Shpanev, V. V. Smuk, M. A. Fesenko</i>	67

---

### Agroecology

Effectiveness of Foliar Top Dressing of Flax with the Drugcontrolit-Si on Different Backgrounds of Mineral Nutrition in the Conditions of the Central Non-Chernozem <i>A. M. Konova, A. Y. Gavrilova N. E. Samsonova</i>	75
Crop Yield and Balance of Nutrition Elements in the Grain-Steam Crop Rotation in the Conditions of the Dry Steppe of Buryatia <i>A. S. Biltuev, L.-Z. V. Budazhapov, A. K. Ulanov</i>	85

---

## RESEARCH METHODS

Methods for Investigations the Biologically Active Forms of Si in Soil, Plants and Agrochemicals <i>E. A. Bocharnikova, V. V. Matichenkov</i>	92
--	----

---

## REVIEWS

Si-Based Biostimulators <i>A. O. Grankina</i>	98
Silicon-Based Materials in Agriculture <i>E. A. Bocharnikova, V. V. Matichenkov, I. V. Matichenkov</i>	106

---

Subject Index to the Journal "Agrochemistry" for 2023	114
---	-----

---

---

УДК: 546.28:631.416:631.445.24

## ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КРЕМНИЯ НА ФОСФАТНОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ<sup>1</sup>

© 2023 г. Е. А. Бочарникова<sup>1,2,\*</sup>, В. В. Матыченков<sup>1,2</sup>, Г. В. Пироговская<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт фундаментальных проблем биологии РАН  
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии  
ул. Институт, влад. 5, р.п. Большие Вяземы, Одинцовский р-н, Московская обл. 143050, Россия

<sup>3</sup>Институт почвоведения и агрохимии НАН республики Беларусь  
220108 Минск, ул. Казинца, 90, Республика Беларусь

\*E-mail: msvk@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Образцы верхнего горизонта дерново-подзолистой целинной и пахотной почвы инкубировали с известью или суперфосфатом, затем вносили аморфный диоксид кремния в дозах от 50 до 5000 кг/га и снова инкубировали в течение 2-х нед. В почвах определяли содержание водорастворимых и кислоторастворимых форм кремния и анализировали фракционный состав соединений фосфора. Показано, что повышение концентрации монокремниевой кислоты в почвенном растворе дерново-подзолистой почвы инициировало процессы трансформации соединений фосфора, приводящие к уменьшению доли труднорастворимых форм фосфора и увеличению содержания фосфора, доступного растениям. Внесение извести или фосфорного удобрения способствовало усилению этих трансформационных процессов, что важно для разработки рекомендаций для практического применения кремниевых удобрений и снижения доз фосфорных удобрений.

*Ключевые слова:* активные формы кремния, фосфатное состояние, дерново-подзолистая почва.

**DOI:** 10.31857/S0002188123120050, **EDN:** ZSRRHJ

### ВВЕДЕНИЕ

Применение фосфорных удобрений является важным условием, обеспечивающим высокие урожаи. Однако сельскохозяйственные культуры усваивают не более 20–30% внесенного фосфора, поскольку в почве данный элемент легко переходит в недоступные для растений формы или вымывается в подземные и поверхностные воды [1, 2]. Благодаря высокой реакционной способности внесенный с удобрениями фосфор быстро связывается катионами кальция и магния в нейтральных или щелочных почвах и катионами алюминия и железа — в кислых почвах [3]. Уровень фиксации Р зависит от многих факторов, включая химический состав и физические свойства почвы, дозы внесения фосфорных и других удобрений, влажность, уровень орошения и другие [4, 5].

В настоящее время фосфорные удобрения все чаще становятся источником загрязнения почв тяжелыми металлами [6, 7]. По оценкам, в европейских странах на долю фосфорных удобрений приходится 54–58% кадмия, ежегодно поступающего в окружающую среду [8]. Многие исследования направлены на разработку методов высвобождения фосфора, фиксированного почвенными компонентами. Предложено использование различных почвенных мелиорантов, органических кислот и микробиологических препаратов [9–11]. Однако уровень извлечения Р остается относительно низким, а многие предлагаемые вещества и препараты являются дорогостоящими.

В 1856 г. на Ротамстедской станции (Англия) были начаты первые полевые опыты по изучению взаимодействия кремниевых и фосфорных соединений в почве. В 1906 г. Hall и Morison предложили возможность реакции обмена фосфат-анионов на силикат-анионы при внесении в почву Si-удобрений или почвенных мелиорантов [12]. В дальнейших исследованиях было выявлено

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103-6.

**Таблица 1.** Основные физико-химические свойства верхнего горизонта дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы

Дерново- подзолистая почва	С, %	рН	Глина, %	Емкость катионного обмена, мг-экв/100 г	Общий К	Общий Р	Общее Fe	Общий Са
					%			
Целинная	2.53	6.3	18.7	15.3	1.10	0.09	1.34	0.96
Пахотная	2.21	6.7	19.3	16.7	0.93	0.11	1.25	1.13
<i>НСР</i> <sub>05</sub>	0.03	0.1	1.5	1.3	0.02	0.01	0.12	0.05

но, что кремнийсодержащие соединения способны увеличивать содержание доступных для растений подвижных форм фосфора в почвах [13, 14] и повышать его доступность растениям [15].

К.Л. Аскинази и Н.М. Санникова в 1937 г. предположили [16], что монокремниевая кислота или ее анион может вытеснить фосфат-анион из фосфатов. Другая гипотеза предполагает, что внесенный в почву кремнезем способствует физической сорбции подвижного фосфора, что препятствует более прочной необменной или химической адсорбции Р, а также предотвращает вынос Р с почвенными водами [17, 18]. Кроме того, предполагают, что Si-анион может конкурировать с Р-анионом [19]. Рост содержания монокремниевой кислоты в почве ведет к смещению равновесия между фосфат- и Si-анионами, что приводит к увеличению концентрации фосфат-анионов в почвенном растворе и улучшению фосфорного питания растений [20]. Однако до сих пор процессы воздействия соединений кремния на фосфатное состояние почв изучены крайне недостаточно, что препятствует эффективному применению кремниевых препаратов в растениеводстве.

Цель работы – исследование влияния аморфного диоксида кремния на фракционный состав фосфора на примере дерново-подзолистой почвы.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В инкубационных исследованиях были использованы образцы верхнего горизонта А1 дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы (целинной и пахотной), отобранные на севере Московской обл. (с. Чашниково). Основные свойства почвы представлены в табл. 1.

Усредненные почвенные образцы были разделены на 3 части. В одну часть образцов была добавлена химически чистая известь ( $\text{CaCO}_3$ ) из расчета 1 т/га или 1 г/кг почвы. В другую часть образцов был добавлен химически чистый моногидрат дигидроортофосфата кальция  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (двойной суперфосфат) в дозе 300 кг/га или

0.3 г/кг почвы. Затем образцы с добавлением извести или суперфосфата инкубировали при температуре 20–24°C и влажности 15–18% при ежедневном перемешивании в течение 2-х нед. После чего в образцы без добавления и с добавлением извести или суперфосфата вносили аморфный кремнезем в дозах 0, 50, 100, 200, 500, 700, 1000 и 5000 кг/га, что соответствовало 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0 и 5.0 г/кг почвы. Кремнезем (производство Салаватского катализаторного завода, Башкортостан) имел следующие свойства: содержание  $\text{SiO}_2$  – 98.6–99.2%, Na – 0.30–0.41%, удельная поверхность – 160–180 м<sup>2</sup>/г, рН<sub>Н<sub>2</sub>О</sub> 7.7. После этого образцы инкубировали при указанных выше условиях в течение еще 2-х нед.

После окончания инкубации во влажных образцах определяли содержание монокремниевой кислоты. В пластиковую пробирку на 50 мл помещали навеску 6 г и заливали 30 мл дистиллированной воды. Суспензию встряхивали 1 ч, центрифугировали при 6000 об./мин в течение 10 мин. Полученный раствор немедленно анализировали на содержание монокремниевой кислоты с использованием метода Маллин–Райли, который позволяет избежать мешающее влияние фосфора [21].

Оставшиеся образцы почв высушивали при температуре 65°C в течение 4-х ч. Затем почву размалывали и просеивали через сито с ячейками 1 мм. В образцах определяли фракционный состав минерального фосфора по методу Чанга–Джексона в модификации Гинзбург–Лебедевой [22] и кислоторастворимый кремний по методике [23]. В пластиковую колбу на 50 мл помещали 2 г почвы и заливали 20 мл 0.1 н. HCl. Суспензию встряхивали в течение 1 ч и затем центрифугировали при 6000 об./мин в течение 10 мин. В полученном растворе определяли содержание кремния и кислоторастворимого фосфора.

Образцы инкубировали в трехкратной повторности. Анализы также проводили в трехкратной повторности, что позволило рассчитать наименьшую существенную разницу полученных результатов (*НСР*) с уровнем вероятности 95%.

Таблица 2. Содержание активных форм кремния в инкубированных почвах

Доза SiO <sub>2</sub> , кг/га	Инкубированная почва								
	без известкования и P-удобрений			с внесением извести			с внесением суперфосфата		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	мг/кг								
	Целинная дерново-подзолистая почва								
Контроль	8.5	285	370	8.7	285	372	8.8	284	372
50	12.4	295	419	12.7	302	429	13.5	300	435
100	15.6	302	458	15.7	303	460	15.7	315	472
200	17.8	325	503	17.5	327	502	17.6	337	513
500	13.5	334	469	14.3	334	477	14.5	337	482
700	13.1	349	480	13.4	356	490	14.8	376	524
1000	15.4	358	512	16.5	365	530	16.7	374	541
5000	20.5	387	592	21.3	394	607	21.1	392	603
	Пахотная дерново-подзолистая почва								
Контроль	4.8	243	291	5.1	255	306	5	254	304
50	5.7	249	306	5.8	256	314	6.2	257	319
100	6.8	254	322	6.8	265	333	7.1	265	336
200	12.4	268	392	14.5	276	421	15.3	277	430
500	10.5	278	383	10.1	283	384	11.2	284	396
700	11.3	286	399	12.3	289	412	13.5	294	429
1000	14.5	294	439	15.4	297	451	14.9	299	448
5000	15.6	324	480	16.8	315	483	17.2	320	492
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	1.6	25	37	1.4	25	36	1.2	25	38

Примечание. В графе 1 – актуальный, 2 – потенциальный, 3 – активный Si.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кремниевое состояние почв, проинкубированных с добавлением диоксида кремния, извести и суперфосфата, было оценено с использованием разработанного нами метода [23]. Учитывали содержание моно-Si кислоты в водной вытяжке из свежей почвы (актуальный Si) и содержание Si в кислой (0.1 н. HCl) вытяжке из сухой почвы (потенциальный Si). На основании обоих параметров рассчитывали содержание активного кремния согласно формуле:

$$\text{Активный Si} = 10 \times \text{Актуальный Si} + \text{Потенциальный Si}.$$

Было показано, что данный параметр наиболее точно характеризует способность почвы обеспечивать кремниевое питание растений [24, 25]. Содержание в почве актуального кремния, потенциального кремния и активного кремния представлено в табл. 2.

Полученные данные свидетельствовали о наличии линейной зависимости между концентрацией кремния в кислой вытяжке и дозой внесенного аморфного кремнезема. Концентрация монокремниевой кислоты в водной вытяжке увеличивалась при росте дозы SiO<sub>2</sub> от 50 до 200 кг/га, а затем уменьшалась при дозах от 200 до 700 кг/га. Дальнейшее увеличение дозы аморфного кремнезема снова привело к увеличению концентрации актуального Si. Полученные данные координируются с литературными и нашими предыдущими данными [26, 27]. Определение содержания полимеров кремниевой кислоты в водной вытяжке позволило сделать вывод, что на первом этапе внесения твердых кремниевых препаратов происходило образование только мономерной формы кремниевой кислоты, затем при достижении определенной концентрации начинали появляться полимерные формы, на образование которых расходуется монокремниевая кислота, что и приводит к уменьшению ее концентрации в почве. При внесении очень высоких доз

**Таблица 3.** Фракционный состав фосфора в почве при внесении извести, суперфосфата и кремнистого удобрения

Доза SiO <sub>2</sub> , кг/га	Фракции фосфора					Сумма
	1	2	3	4	5	
	мг/кг					
Дерново-подзолистая целинная почва						
Контроль	31	42	37	24	26	160
50	44	45	32	20	19	160
100	46	46	31	21	18	162
200	47	43	30	19	22	161
500	41	39	32	23	24	159
700	33	44	35	23	24	159
1000	39	42	35	21	24	161
5000	49	48	28	22	15	162
Дерново-подзолистая пахотная почва						
Контроль	54	68	245	945	355	1670
50	64	81	234	930	354	1660
100	74	86	222	920	365	1670
200	78	85	213	915	356	1650
500	62	65	256	934	345	1660
700	65	64	238	944	355	1670
1000	72	73	243	921	358	1670
5000	82	82	237	915	351	1670
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	1	3	5	5	7	
Дерново-подзолистая целинная почва + известь						
Контроль	15	32	25	56	32	160
50	32	38	30	25	34	159
100	41	44	32	23	20	160
200	45	42	34	17	21	159
500	39	34	33	26	28	160
700	30	37	37	25	30	159
1000	32	38	37	25	27	159
5000	47	45	32	21	16	161
Дерново-подзолистая пахотная почва + известь						
Контроль	32	54	226	976	374	1660
50	48	70	245	945	352	1660
100	68	82	231	932	348	1660
200	72	84	213	933	358	1660
500	43	60	223	974	357	1660
700	54	60	245	934	364	1660
1000	67	66	256	917	362	1670
5000	76	78	248	904	353	1660
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	2	4	4	5	7	
Дерново-подзолистая целинная почва + суперфосфат						
Контроль	84	113	123	75	64	459
50	117	124	138	43	38	460

Таблица 3. Окончание

Доза SiO <sub>2</sub> , кг/га	Фракции фосфора					Сумма
	1	2	3	4	5	
	мг/кг					
100	122	134	128	38	34	456
200	134	145	121	35	24	459
500	118	140	120	43	39	460
700	112	144	127	45	32	460
1000	128	136	122	32	43	461
5000	132	143	125	34	25	459
Дерново-подзолистая пахотная почва + суперфосфат						
Контроль	79	85	302	1054	443	1960
50	137	122	335	976	394	1960
100	133	138	338	965	355	1980
200	145	147	349	948	378	1970
500	122	132	387	945	382	1970
700	133	142	399	954	342	1970
1000	140	148	387	933	366	1970
5000	149	150	388	932	348	1970
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	9	10	25	45	25	

кремниевых удобрений их хватает на образование как мономеров, так и полимеров кремниевой кислоты. Эти процессы были изучены нами в предыдущих исследованиях [28, 29]. Поскольку в предыдущих исследованиях было показано, что поликремниевые кислоты не влияют на подвижность фосфатов, то их определение в почве не входило в задачи данной работы.

Содержание фосфора в различных фракциях после инкубации почв представлено в табл. 3. Целинная дерново-подзолистая почва характеризовалась значительно более низкими величинами содержания фосфора в каждой фракции по сравнению с пахотной. По-видимому, это связано с тем, что в пахотную почву вносили фосфорные удобрения. При внесении аморфного кремнезема суммарное содержание фосфора в 5-ти фракциях не изменилось, однако наблюдали существенное перераспределение фосфора по фракциям. Наиболее значимое увеличение было установлено для 1-й фракции, в которую переходят наиболее растворимые и доступные для растений формы фосфора в почве. Содержание 2-й фракции фосфора также увеличилось при увеличении дозы аморфного кремнезема. Содержание 3-й фракции Р уменьшилось. При этом изменение фосфорного состояния не было линейным и имело сложный характер.

Внесение извести привело к значительному уменьшению 1-й и 2-й фракций фосфатов и значительному увеличению фосфора 3-, 4- и 5-й фракций. Суммарное содержание фосфора в целинной и пахотной дерново-подзолистой почве осталось таким же, как в почвах без внесения извести. Изменение фракционного состава фосфора при совместном внесении извести и аморфного кремнезема было аналогичным тому, что наблюдали при внесении только аморфного кремнезема, за исключением содержания 3-й фракции, которая при совместном внесении увеличилась.

Внесение суперфосфата резко повысило общее содержание Р в исследованных почвах, при этом наблюдали увеличение содержания всех 5-ти фракций Р. Внесение аморфного диоксида кремния совместно с суперфосфатом привело к существенному увеличению содержания 1-, 2- и 3-й фракций, но снизило долю фракций 4 и 5.

Для понимания процессов взаимодействия соединений фосфора и кремния были вычислены коэффициенты корреляции между формами Si и содержанием Р (табл. 4). Показали, что наиболее высокие положительные коэффициенты установлены для актуального кремния (содержание водорастворимой монокремниевой кислоты) и фосфора в 1- и 2-й фракциях.

**Таблица 4.** Коэффициенты корреляции между содержанием различных форм кремния и содержанием фосфора во фракциях в почве

Формы Si	Фракции P				
	1	2	3	4	5
Дерново-подзолистая целинная почва					
Актуальный Si	0.817	0.515	-0.841	-0.509	-0.695
Потенциальный Si	0.266	0.228	-0.375	0.039	-0.285
Активный Si	0.590	0.404	-0.662	-0.260	-0.534
Дерново-подзолистая пахотная почва					
Актуальный Si	0.698	0.037	0.003	-0.531	-0.242
Потенциальный Si	0.614	-0.045	0.191	-0.398	-0.336
Активный Si	0.677	0.004	0.079	-0.487	-0.285
Дерново-подзолистая целинная почва + известь					
Актуальный Si	0.892	0.835	0.518	-0.779	-0.861
Потенциальный Si	0.506	0.405	0.660	-0.527	-0.496
Активный Si	0.745	0.661	0.626	-0.696	-0.723
Дерново-подзолистая пахотная почва + известь					
Актуальный Si	0.725	0.327	0.282	-0.715	-0.089
Потенциальный Si	0.606	0.155	0.465	-0.673	-0.134
Активный Si	0.702	0.279	0.346	-0.716	-0.105
Дерново-подзолистая целинная почва + суперфосфат					
Актуальный Si	0.916	0.812	-0.138	-0.875	-0.861
Потенциальный Si	0.616	0.798	-0.308	-0.647	-0.596
Активный Si	0.803	0.852	-0.240	-0.800	-0.764
Дерново-подзолистая пахотная почва + суперфосфат					
Актуальный Si	0.678	0.809	0.787	-0.789	-0.658
Потенциальный Si	0.581	0.723	0.862	-0.743	-0.702
Активный Si	0.661	0.798	0.830	-0.791	-0.687

Зависимость между величиной параметра активного кремния и 1-й фракцией фосфора была значительно слабее, кроме дерново-подзолистой пахотной почвы при внесении суперфосфата. Коэффициенты корреляции между фосфором 1-й фракции и потенциальным кремнием были еще меньше. Характерно, что в обеих почвах при внесении суперфосфата получены высокие коэффициенты корреляции между 2-й фракцией фосфора и всеми 3-мя параметрами содержания форм кремния.

Коэффициенты корреляции между 3-й фракцией фосфора и параметрами кремния были отрицательными для целинной почвы, но в целинной почве при совместном внесении диоксида кремния и извести и в пахотной почве при совместном внесении диоксида кремния и суперфосфата были отмечены высокие положительные коэффициенты. Корреляция между фосфором 4-й и 5-й фракций и параметрами кремния была

почти всегда отрицательной. Полученные данные позволили высказать предположения о процессах трансформации соединений фосфора в почве под влиянием аморфного диоксида кремния, извести и фосфорного удобрения, что также было показано в других исследованиях [30]. Поскольку в дерново-подзолистой почве присутствуют соединения фосфора с железом, алюминием и кальцием (особенно при внесении извести), можно предположить, что увеличение содержания подвижного фосфора (фракции 1 и 2) при внесении аморфного диоксида кремния приводит к образованию соответствующих силикатов.

## ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты свидетельствовали о потенциальной эффективности кремниевых удобрений в регулировании фосфорного питания растений в дерново-подзолистых почвах. Рост

концентрации монокремниевой кислоты в почве инициировал процессы трансформации соединений фосфора, приводящие к снижению доли труднорастворимых форм фосфора и увеличению доступного фосфора для растений.

2. Внесение извести или фосфорных удобрений способствовало усилению активности данных процессов, что чрезвычайно важно для практического применения кремниевых удобрений, в частности, с целью снижения доз таких ценных минеральных удобрений, как фосфорные.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Herrera-Estrella L., López-Arredondo D.* Phosphorus: the underrated element for feeding the world // *Trends Plant Sci.* 2016. V. 21. № 6. P. 461–463.
2. *Hegedűs M., Tóth-Bodrogi E., Németh S., Somlai J., Kovács T.* (2017). Radiological investigation of phosphate fertilizers: Leaching studies // *Journal of environmental radioactivity.* 2017. V. 173. P. 34–43.
3. *Mamathashree C.M., Girijesh G.K., Vinutha B.S.* Phosphorus dynamics in different soils // *J. Pharmacogn. Phytochem.* 2018. V. 7. № 1. P. 981–985.
4. *Syers J.K., Johnston A.E., Curtin D.* Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use // *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin.* 2008. V. 18. № 108.
5. *Baninajarian S., Shirvani M.* Use of biochar as a possible means of minimizing phosphate fixation and external P requirement of acidic soil // *Journal of Plant Nutrition.* 2020. V. 44. № 1. P. 59–73.
6. *de Boer M.A., Wolzak L., Slootweg J.C.* Phosphorus: Reserves, production, and applications // *Phosphorus recovery and recycling.* Singapore: Springer, 2019. P. 75–100.
7. *Li H.* Input of Cd from agriculture phosphate fertilizer application in China during 2006–2016 // *Science of the Total Environment.* 2020. V. 698. P. 134149.
8. *Tirado R., Allsop M.* Phosphorus in agriculture: problems and solutions // *Greenpeace Research Laboratories Technical Report (Review).* 2012 (greenpeace.org).
9. *Billah M. et al.* Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: Keys for sustainable agriculture // *Geomicrobiology Journal.* 2019. V. 36. № 10. P. 904–916.
10. *Mosa A., El-Ghamry A., Tolba M.* Functionalized biochar derived from heavy metal rich feedstock: phosphate recovery and reusing the exhausted biochar as an enriched soil amendment // *Chemosphere.* 2018. V. 198. P. 351–363.
11. *Wilfert P., Meerdink J., Degaga B., Temmink H., Korving L., Witkamp G.J., ... van Loosdrecht M.C.M.* Sulfide induced phosphate release from iron phosphates and its potential for phosphate recovery // *Water Res.* 2020. V. 171. 115389.
12. *Hall A.D., Morrison C.G.T.* On the function of silica in the nutrition of cereals // *Proc. R. Soc. Lon.* 1906. Ser. B. V. LXXVII. P. 455–477.
13. *Матыченков В.В., Бочарникова Е.А.* Использование некоторых отходов металлургической промышленности для улучшения фосфорного питания и повышения засухоустойчивости растений // *Агрохимия.* 2003. № 5. С. 50–56.
14. *Швейкина Р.В.* Влияние кремнегель содержащих удобрений на обменную адсорбцию катионов // *Свойства почв и рациональное использование удобрений.* Пермь: Изд-во Перм. с.-х. инст., 1986. С. 54–56.
15. *Куликова А.Х.* Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: Изд-во Ульяновской ГСХА, 2012. 178 с.
16. *Аскинази Д.Л., Санникова Н.М.* Пути повышения на красной земле доступности растениям  $P_2O_5$ . В кн. *Новое в удобрении*, М., Сельхозгиз, 1937. С. 88–103.
17. *Matichenkov V., Bocharnikova E., Campbell J.* Reduction in nutrient leaching from sandy soils by Si-rich materials: Laboratory, greenhouse and filed studies // *Soil Tillage Res.* 2020. V. 196. 104450.
18. *Owino-Gerroh C., Gascho G.J.* Effect of silicon on low pH soil phosphorus sorption and on uptake and growth of maize // *Communications in soil science and plant analysis.* 2005. T. 35. № 15–16. С. 2369–2378.
19. *Feng X., Wang X., Zhu M., Koopal L. K., Xu H., Wang Y., Liu F.* Effects of phosphate and silicate on the transformation of hydroxycarbonate green rust to ferric oxyhydroxides // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2015. V. 171. P. 1–14.
20. *Olivera M.G.* Silica and phosphorus reciprocal adsorption and discation in two latosols from the Frian-gilo Mineiro area Brazil // *Revista Ceres.* 1986. V. 33. № 189. P. 441–448.
21. *Mullin J.B., Riley J.P.* The colorimetric determination of silicate with special reference to sea and natural waters // *Anal Chim Acta.* 1955. V. 12. P. 162–176. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)87825-3](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)87825-3)
22. *Агрохимические методы исследования почв /* Под ред. Соколова А.В. М.: Наука, 1975. 106 с.
23. *Матыченков В.В., Аммосова Я.М., Бочарникова Е.А.* Метод определения доступного для растений кремния в почвах // *Агрохимия.* 1997. № 1. С. 76–84.
24. *Матыченков В.В.* Градация почв по дефициту доступного растениям кремния // *Агрохимия.* 2007. № 7. С. 22–30.
25. *Матыченков В.В., Шнайдер Г.С.* Подвижные соединения кремния в некоторых почвах Южной Флориды // *Почвоведение.* 1996. № 12. С. 1448–1453.
26. *Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Аммосова Я.М.* Влияние кремниевых удобрений на растения и почву // *Агрохимия.* 2002. Т. 2. С. 86–93.
27. *Козлов А.В., Куликова А.Х., Уромова И.П.* Подвижность силикатов, показатели плодородия дерново-подзолистой почвы, биоаккумуляция кремния и продуктивность сельскохозяйственных культур под действием цеолита // *Сельскохозяйственная биология.* 2021. Т. 56. № 1. С. 183–198.
28. *Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Аммосова Я.М.* Влияние кремниевых удобрений на растения и почву // *Агрохимия.* 2002. Т. 2. С. 86–93.

29. Бочарникова Е.А., Пахненко Е.П., Матыченков В.В., Матыченков, И.В. Влияние оптимизации кремниевое питания на устойчивость ДНК ячменя // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2014. № 2. С. 40–43.
30. Матыченков И.В., Пахненко Е.П. Изменение содержания подвижных фосфатов почвы при внесении активных форм кремния // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 3 (23). С. 24–28.

## Effect of Active Si on Phosphate State in Sod-Podzolic Soils

E. A. Bocharnikova<sup>a,b,#</sup>, V. V. Matichenkov<sup>a,b</sup>, and G. V. Pirogovskaya<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Institute Basic Biological Problems RAS  
Institutskaya ul. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

<sup>b</sup>*All-Russian Scientific-Research Institute of Phytopathology  
ul. Institute, pos. 5, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Bolshye 143050, Russia*

<sup>c</sup>*Institute of Soil Science and Agrochemistry of the NAS of the Republic of Belarus  
ul. Kazinets 90, Minsk 220108, Republic of Belarus*

<sup>#</sup>*E-mail: msvk@rambler.ru*

Samples of the upper horizon of sod-podzolic virgin and arable soil were incubated with lime or superphosphate, then amorphous silicon dioxide was introduced in doses from 50 to 5000 kg/ha and incubated again for 2 weeks. The content of water-soluble and acid-soluble forms of silicon in soils was determined and the fractional composition of phosphorus compounds was analyzed. It is shown that an increase in the concentration of monosilicon acid in the soil solution of sod-podzolic soil initiated the processes of transformation of phosphorus compounds, leading to a decrease in the proportion of insoluble forms of phosphorus and an increase in the phosphorus content available to plants. The introduction of lime or phosphorus fertilizer contributed to the strengthening of these transformational processes, which is important for the development of recommendations for the practical application of silicon fertilizers and the reduction of doses of phosphorus fertilizers.

*Keywords:* active forms of silicon, phosphate state, sod-podzolic soil.

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”.

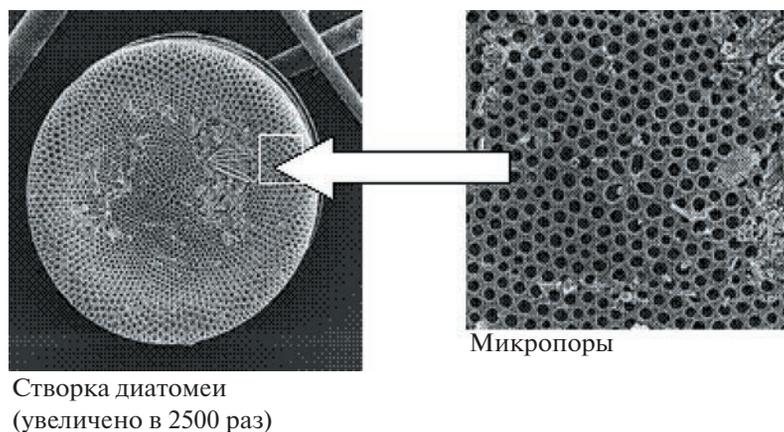


Рис. 1. Скелеты диатомей и их строение.

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*-кристобалитом 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 <sup>3</sup>	0.5–0.9	2.0–2.3	2.6–2.8	0.7–1.0
Удельная поверхность	м <sup>2</sup> × 10 <sup>3</sup> /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 <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	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 <sub>2</sub> )	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 <sub>2</sub> O)	Общий	%	0.42	0.20	0.78	0.18
	Обменный	мг/кг	–	–	5.46	Не определяли
Алюминий (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Общий	%	5.82	19.60	14.70	6.1
Железо (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Общий	%	2.47	2.34	3.0	1.8
Фосфор (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Общий	%	0.05	0.23	0.004	0.2
	Растворимый	мг/кг	37	260	65	41
Калий (K <sub>2</sub> 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 м<sup>2</sup>, картофеля и овощных – 10 м<sup>2</sup>, 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 + Мо + Мп*		2.74	+1.16	73	3.19	+0.40	78
N56P70K63		2.31	+0.73	46	2.69	+0.9	50
N56P70K63 + Мо + Мп		2.39	+0.81	51	2.70	+0.91	51
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	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> <sub>05</sub>	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> <sub>05</sub>	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>HCP</i> <sub>05</sub>	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.

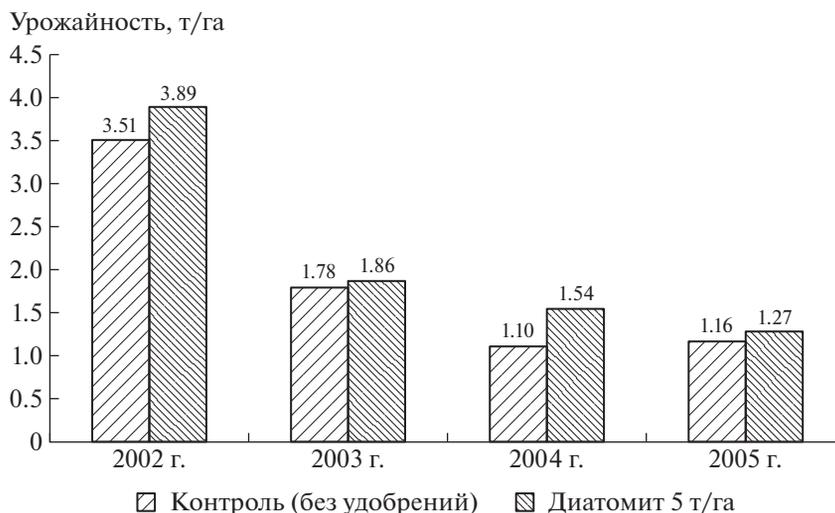
Результаты исследования свидетельствовали об очень высокой отзывчивости кукурузы на применение кремниевых удобрений, в данном случае цеолита: прибавка урожайности зерна в среднем за 3 года составила от 0.93 до 1.36 т/га, мало уступая варианту с полной дозой минеральных удобрений (N60P60K60). Важно отметить, что при внесении в почву цеолита совместно с мочевиной (N<sub>м</sub>60) 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-фосфорно-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 обязательно, 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 показатели, 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> <sub>05</sub>	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> <sub>05</sub>	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 <sup>3</sup>
	>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
HCP <sub>05</sub>	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 экотипы 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* nuder 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., Конохова 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.

## ВЛИЯНИЕ ДИАТОМИТА, ЦЕОЛИТА И БЕНТОНитОВОЙ ГЛИНЫ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ И УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

© 2023 г. А. В. Козлов<sup>1,\*</sup>, А. Х. Куликова<sup>2</sup>, И. П. Уромова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева  
127434 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

<sup>2</sup>Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина  
432017 Ульяновск, бул. Новый Венец, 1, Россия

<sup>3</sup>Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина  
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 1, Россия

\*E-mail: a.kozlov@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

В трехлетних микрополевых опытах на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве изучено влияние мелиоративных доз (3, 6 и 12 т/га) кремнистых пород (диатомита, цеолита и бентонитовой глины) на основные агрохимические свойства почвы и продуктивность культур в зерновом звене севооборота пшеница озимая—ячмень яровой—горох посевной. Среди прочих положительных эффектов установлено существенное действие диатомита в снижении концентрации обменных форм алюминия в почве (на 0.11 мг-экв/100 г), повышении содержания обменных форм магния (на 0.33 мг-экв/100 г) и фосфатов почвенного раствора (на 225%). На фоне влияния диатомитовой породы ячмень давал наибольшую прибавку урожайности зерна (на 38%) и соломы (на 29%). Наиболее существенное влияние цеолита выявлено в снижении актуальной, обменной и гидролитической кислотности почвы (снижение на 1.11, 0.48 ед. рН и на 0.33 мг-экв/100 г), а также концентрации обменных соединений кальция (увеличение на 17.7 мг-экв/100 г), магния (на 12.0 мг-экв/100 г) и калия (на 46%). Внесение цеолитовой породы способствовало наибольшей прибавке урожайности зерна (на 32%) и соломы (на 23%) ячменя. Максимально значимое влияние бентонитовой глины установлено на показатели актуальной кислотности почвы (их снижение на 0.65 ед. рН), содержания обменного алюминия (уменьшение на 0.19 мг-экв/100 г) и фосфатов почвенного раствора (увеличение на 175%). Внесение глины способствовало формированию наибольшей прибавки урожайности зерна (на 33%) и соломы (на 19%) гороха посевного.

*Ключевые слова:* диатомит, цеолит, бентонитовая глина, дерново-подзолистая почва, показатели кислотно-основного состояния почвы, агрохимические свойства, озимая пшеница, ячмень яровой, горох посевной, урожайность.

**DOI:** 10.31857/S0002188123120086, **EDN:** AYKEUK

### ВВЕДЕНИЕ

Содержание в почвах подвижных соединений азота, фосфора, калия и микроэлементов, а также состояние кислотности и кислотно-основной буферности относятся к характеристикам, являющимся одними из приоритетных в определении не только уровня эффективного плодородия и окультуренности почв, но и в целом агроэкологической устойчивости почвенного покрова сельскохозяйственных территорий [1–6]. Понимание значимости химической роли другого элемента — кремния для естественных и агрофитоценозов только сравнительно недавно привело к его опре-

делению в качестве макроэлемента питания растительного организма, а его комплексов с внутриклеточными органическими соединениями — в качестве компонентов, обеспечивающих защитную функцию растений от неблагоприятных факторов агроэкотопа [7–13].

Считается признанным, что уже длительное время дерново-подзолистые почвы Нечерноземной полосы России, как одни из наиболее вовлеченных в сельскохозяйственное производство растениеводческой продукции, характеризуются активной химической деградацией [14–17]. Избыточный вынос элементов питания и явный не-

достаток в обеспеченности полей органическими, минеральными удобрениями и средствами химической мелиорации отражаются на общем состоянии плодородия почв, их водном режиме, уровне гумусированности и оструктуренности [18–23]. При этом известно [24–27], что при таких условиях в первую очередь повышается кислотность почвы пахотного горизонта, что еще активнее усугубляет состояние почвообитающих микробиоценозов и произрастающих агрофитоценозов [28–32].

Различного генезиса породы, отличающиеся повышенным содержанием неокристаллизованного (аморфного) кремнезема, уверенно вошли в практику региональной химической мелиорации пахотных почв [33–37]. Исследования в разных почвенно-климатических зонах России и сопредельных стран показывают [38–50], что их применение как в сыромолотом виде, так и в форме различных модификаций (в том числе с минеральными удобрениями, стимуляторами роста и органическими веществами) активно способствуют улучшению не только пищевого режима почв, но и оптимизации кислотно-основного баланса. Причиной тому является химический состав пород, который характеризуется повышенным содержанием доступных для растений и внутрипочвенного превращения подвижных соединений кремния, а также высокими концентрациями обменных форм кальция, магния, а в некоторых случаях еще и натрия. Кроме того, высокая ионообменная сила и сорбционная активность минералов, входящих в состав данных пород, может обеспечивать относительное приращение обменной емкости и буферной способности мелиорируемых почв [38, 51–54].

В целом на настоящий момент определено, что высококремнистые материалы, в том числе опки, трепелы, диатомиты, глины, цеолиты и другие, могут оказывать многостороннее воздействие на почвы и урожайность сельскохозяйственных культур. Однако за счет отсутствия систематических и длительных исследований их агрохимической эффективности в различных агроэкосистемах единых рекомендаций по применению кремнистых пород в качестве мелиорантов комплексного действия до сих пор не разработано. Для этого необходимы научные изыскания, проводимые в почвенно-климатических зонах с различным типом агропедогенеза почвенного покрова на сельскохозяйственных территориях. В частности, изучения агрономической эффективности применения высоких доз кремнистых пород в условиях подзолистых и дерново-подзолистых почв явно недостаточно. В связи с этим цель

работы – оценка изменения агрохимических показателей дерново-подзолистых почв под влиянием мелиоративных доз таких кремнистых пород, как диатомит, цеолит и бентонитовая глина, с последующей оценкой урожайности культурных растений, повышающейся при действии кремниевых мелиорантов.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Серию полевых экспериментов выполняли на базе ООО “Элитхоз” (Борский р-н, Нижегородская обл.) в звене зернового севооборота озимая пшеница–ячмень яровой–горох посевной в период 2014–2017 гг. Сорты культур районированы в Волго-Вятском регионе [55] и обладают устойчивостью к ряду вредителей и возбудителей болезней, типичных для этого региона: пшеница (*Triticum aestivum* L.) – Московская 39, ячмень (*Hordeum vulgare* L.) – Велес, горох (*Pisum sativum* L.) – Чишминский 95.

Были заложены микрополевые опыты, учетная площадь делянки – 1 м<sup>2</sup>, расположение – рендомизированное, повторность четырехкратная. Все агротехнические работы проводили вручную в соответствии с общепринятыми в подобном роде практике требованиями [56].

С каждой породой закладывали 1 опыт по единой 4-вариантной схеме: 1 – контроль (без породы и иных удобрений), 2 – порода в дозе 3 т/га, 3 – порода в дозе 6 т/га, 4 – порода в дозе 12 т/га. Материалы в каждом опыте вносили в почву осенью 2014 г. перед посевом озимой пшеницы и перекапывали, почву выравнивали.

Почвенный покров экспериментального участка однородный, почва – дерново-подзолистая среднедерновая неглубокоподзолистая, гранулометрический состав – легкий суглинок, материнская порода – покровный суглинок, по Классификации и диагностике почв России – подтип дерново-подзолистой типичной почвы (Пд) из отдела текстурно-дифференцированных почв [57, 58].

На время закладки полевых экспериментов почва характеризовалась среднекислой реакцией (рН<sub>H<sub>2</sub>O</sub> 5.9 ед., рН<sub>KCl</sub> 4.8 ед.,  $H_T = 2.83$  мг-экв/100 г) и средней насыщенностью основными катионами ( $V_S = 69\%$ ), а также средней степенью обеспеченности подвижными формами фосфора и калия (по Кирсанову): P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 86, K<sub>2</sub>O – 110 мг/кг. Содержание гумуса (по Тюрину) – 1.2%.

Согласно характеристике производителей и ряда авторов [34, 38, 39, 59, 60], вещество диатомита (Инзенское месторождение), цеолита

**Таблица 1.** Изменение показателей кислотно-основного состояния почвы под влиянием кремнистых пород (среднее за 3 года)

Вариант	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	pH <sub>KCl</sub>	H <sub>г</sub>	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca : Mg
	ед. pH		мг-экв/100 г почвы				
Контроль	5.92	4.86	2.80	0.39	5.18	1.22	4.2
Д <sub>1</sub> 3 т/га	6.19	5.02	2.75	0.36	5.47	1.36	4.0
Д <sub>2</sub> 6 т/га	6.33	5.19	2.68	0.32	5.51	1.43	3.9
Д <sub>3</sub> 12 т/га	6.34	5.14	2.65	0.28	5.57	1.55	3.6
HCP <sub>05</sub>	0.30	0.21	0.11	0.02	0.19	0.10	–
Ц <sub>1</sub> 3 т/га	6.64	5.16	2.68	0.38	8.03	3.62	2.3
Ц <sub>2</sub> 6 т/га	7.03	5.34	2.55	0.35	13.3	6.91	1.9
Ц <sub>3</sub> 12 т/га	6.99	5.27	2.47	0.34	22.8	13.2	1.7
HCP <sub>05</sub>	0.27	0.24	0.08	0.03	0.32	0.18	–
Б <sub>1</sub> 3 т/га	6.37	5.03	2.72	0.31	5.61	1.35	4.2
Б <sub>2</sub> 6 т/га	6.57	5.17	2.64	0.24	5.74	1.41	4.1
Б <sub>3</sub> 12 т/га	6.55	5.14	2.60	0.20	5.88	1.46	4.0
HCP <sub>05</sub>	0.36	0.19	0.12	0.02	0.31	0.07	–

Примечание. Д – диатомит, Ц – цеолит, Б – бентонитовая глина. То же в табл. 2, 3.

(Хотынецкое месторождение) и бентонитовой глины (Зырянское месторождение) в своем составе содержит соответственно: обменного кальция – 10, 4800 и 28, обменного магния – 39, 1600 и 30 мг-экв/100 г, а также подвижного фосфора – 37, 260 и 65, обменного калия – 350, 250 и 0.87 мг/кг.

Образцы почвы отбирали в дни уборки урожая с глубины 0.15 м, точечные образцы (конверт) – 5 ед./делянку, объединенный образец – 1 ед./делянку. Урожайность культур оценивали сплошным весовым методом с учетной площади каждой делянки. Полученные почвенные образцы доставляли в лабораторные комплексы НПКУ им. К. Минина, подготавливали к анализам (высушивание, измельчение, просеивание (Ø 1 мм), квартование) и анализировали ряд показателей, в том числе: pH из водной и солевой вытяжек – потенциометрическим методом, гидrolитическую кислотность – по Каппену в модификации ЦИНАО, содержание обменных соединений Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> – по Гедройцу, содержание обменных форм Al<sup>3+</sup> – по Соколову, содержание подвижных соединений фосфора и калия (0.1 н. HCl) – по Кирсанову, содержание фосфатов почвенного раствора (0.03 н. K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) – по Карпинскому–Замятиной [61, 62]. Статистическую обработку полученных данных проводили в пакете MS MICROSOFT OFFICE EXCEL методом дисперсионного анализа при уровне  $p < 0.05$  [63].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Было выявлено положительное влияние изученных кремнистых пород на параметры агрохимического состояния дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы (табл. 1). Прежде всего нужно отметить, что достоверный эффект большинства рассмотренных показателей проявлялся либо при внесении в почву 2-й дозы каждого из материалов (6 т/га), либо уже при внесении минимальной дозы (3 т/га).

Показатель pH почвы, определяемый из ее водной и солевой вытяжек и соответственно характеризующий относительное состояние кислотности почвенного раствора и частичную способность к ионному обмену кислотными катионами, повышался на фоне применения пород. При этом величина снижения уровня кислотности почвы оказалась неодинаковой. В частности, в вариантах с цеолитом pH почвы из обеих вытяжек увеличивался наиболее значительно по сравнению с опытами с другими породами – соответственно на 18–19 и на 8–10%.

В вариантах с применением бентонитовой глины снижение актуальной кислотности почвы составляло 11, обменной – 6% по отношению к контролю. В вариантах с диатомовой породой эффект ее влияния на рассматриваемые показатели был примерно одинаков – 6–7%.

Вполне вероятно, что за 3-летний период процессы снижения активности кислотных катионов

в почвенном растворе и внешних слоях коллоидных мицелл ППК почвы были обусловлены сорбционными и ионообменными свойствами самих пород, использованных в высоких (мелиоративных) дозах [64–66]. Косвенным подтверждением этого явилось уменьшение концентрации обменных соединений алюминия в почве и, как следствие, снижение показателя ее гидролитической кислотности, в различной мере произошедшие во всех рассматриваемых опытах. В частности, если в вариантах с применением цеолита в дозах 6–12 т/га содержание обменного алюминия в почве снижалось на 10–13%, а показатель  $H_r$  уменьшался на 9–12%, то в условиях внесения диатомита и бентонита гидролитическая кислотность почвы соответственно снижалась только на 5 и 7%, концентрация ионов  $Al^{3+}$  – более чем на 20 и 40%. По-видимому, ионообменные и сорбционные эффекты при действии вещества глины и диатомита, с одной стороны, в большей мере распространялись на обменные формы алюминия в почве, чем на весь комплекс кислотообразующих катионов, формировавший ее гидролитическую кислотность.

С другой стороны, показатель  $H_r$  почвы мог снижаться и за счет изменения содержания обменных соединений кальция и магния, концентрации которых в почве весьма существенно увеличивались и в особенности в вариантах с применением цеолитовой породы. В частности, в варианте с минимальной дозой материала (3 т/га) содержание обменных форм  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  в почве повышалось соответственно в 1.6 и 2.9 раза, а в вариантах со средней (6 т/га) и наибольшей (12 т/га) дозами – соответственно в 2.6–4.4 и в 5.7–10.8 раза. Очевидно, что подобные изменения показателей были обусловлены очень высоким содержанием подвижных форм данных щелочноземельных металлов в исходной породе [67–69].

В отношении влияния диатомита и бентонита на концентрацию подвижных соединений кальция и магния в почве нужно отметить в целом положительный эффект, который был много меньше в сравнении с ранее рассмотренными вариантами воздействия Хотынецкого цеолита. Например, за 3-летний период наибольшее увеличение показателей было установлено при внесении дозы обоих материалов 12 т/га, которое составило соответственно 8 и 14% концентрации ионов  $Ca^{2+}$  и 27 и 20% – ионов  $Mg^{2+}$  относительно контроля. При этом соотношение элементов в почве в наибольшей степени (до 55–60%) сужалось в вариантах с цеолитом, в средней (до 7–14%) – в вариантах с диатомовой породой, в минимальной (до 2–5%) – с бентонитовой глиной.

Таким образом, применение диатомита, цеолита и бентонита способно оказывать положи-

тельное влияние на рассмотренные показатели кислотно-основного состояния дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. В сравнении с данными других авторов [13, 34, 38, 44, 48, 52] описанные в работе эффекты были сопоставимы и проявляли себя схожим образом.

Помимо ацидонейтрализующего эффекта высокие дозы данных пород способны оказывать положительное воздействие на содержание подвижных соединений фосфора и калия в почве (табл. 2). В частности, содержание соединений фосфора, переходящих в 0.1 н. HCl (подвижный фосфор), на фоне применения диатомита увеличивалось на 37–55, на фоне цеолита – на 22–43, а на фоне глины – на 17–30%. Содержание почвенных фосфатов, переходящих в 0.03 н.  $K_2SO_4$  (интенсивный фосфор), в условиях внесения диатомовой породы повышалось в 2.9–3.3 раза, цеолита – на 25–92%, бентонита – в 2.0–2.8 раза. В среднем за 3 года исследования массовая доля интенсивных фосфатов в почве увеличивалась в соответствии с действием пород по следующему ранжированию влияния: диатомит  $\approx$  бентонит – цеолит, что составило соответственно 80–93, 73–93 и 13–27% увеличения показателя относительно контрольного уровня.

Известно [13, 70–73], что при определенных условиях соединения кремния способны замещать в почве фосфаты из ППК и переводить их в подвижное состояние, т.е. в состав почвенного раствора. В связи с чем данный механизм предполагается как основной, определяющий столь существенное повышение концентрации интенсивных фосфатов в почве.

Трехлетнее взаимодействие дерново-подзолистой почвы с высокими дозами изученных материалов способствовало повышению содержания в ней обменных соединений калия – на фоне влияния диатомита и цеолита в максимальной мере при внесении в почву 6 т/га каждого из материалов (соответственно на 32 и 46%), на фоне воздействия глины – на 35% при ее внесении в почву в дозе 12 т/га.

Оптимизация кислотно-основного состояния почвы и ее питательного режима вследствие применения мелиоративных доз кремнистых пород закономерно способствовала увеличению продуктивности культур севооборота (табл. 3). Показано изменение урожайности основной (зерно) и побочной (солома) продукции культурных растений на фоне применения диатомовой, цеолитовой пород и бентонитовой глины.

Было установлено, что агрономическая эффективность, полученная при применении испы-

**Таблица 2.** Изменение содержания подвижных соединений фосфора и калия в почве под влиянием кремнистых пород (среднее за 3 года)

Вариант	Содержание соединений фосфора, мг P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /кг			Содержание обменного калия, мг K <sub>2</sub> O/кг
	0.1 н. HCl-растворимая форма (фактор емкости)	0.03 н. K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -растворимая форма (фактор интенсивности)	доля интенсивных фосфатов в почве, %	
Контроль	86	12	15	96
Д <sub>1</sub> 3 т/га	118	17	14	117
Д <sub>2</sub> 6 т/га	130	35	27	127
Д <sub>3</sub> 12 т/га	133	39	29	119
HCP <sub>05</sub>	17	10	—	14
Ц <sub>1</sub> 3 т/га	105	15	14	122
Ц <sub>2</sub> 6 т/га	123	23	19	140
Ц <sub>3</sub> 12 т/га	119	20	17	135
HCP <sub>05</sub>	7	9	—	10
Б <sub>1</sub> 3 т/га	101	24	23	110
Б <sub>2</sub> 6 т/га	112	33	29	126
Б <sub>3</sub> 12 т/га	108	28	26	130
HCP <sub>05</sub>	10	10	—	11

**Таблица 3.** Влияние кремнистых пород на продуктивность сельскохозяйственных культур (2015–2017 гг.), т/га

Вариант	Контроль	Д <sub>1</sub> 3 т/га	Д <sub>2</sub> 6 т/га	Д <sub>3</sub> 12 т/га	HCP <sub>05</sub>	Ц <sub>1</sub> 3 т/га	Ц <sub>2</sub> 6 т/га	Ц <sub>3</sub> 12 т/га	HCP <sub>05</sub>	Б <sub>1</sub> 3 т/га	Б <sub>2</sub> 6 т/га	Б <sub>3</sub> 12 т/га	HCP <sub>05</sub>
Основная часть урожая, т/га													
Озимая пшеница	2.51	2.80	3.10	2.97	0.17	2.60	2.64	2.70	0.26	2.70	2.93	2.85	0.24
Ячмень яровой	3.03	3.72	4.08	4.19	0.19	3.54	3.86	4.01	0.33	3.89	4.16	3.95	0.33
Горох посевной	1.62	1.85	2.02	1.93	0.13	1.72	1.80	1.86	0.09	1.98	2.06	2.15	0.08
Побочная часть урожая, т/га													
Озимая пшеница	3.11	3.40	3.42	3.43	0.28	3.56	3.81	3.78	0.17	3.38	3.47	3.51	0.23
Ячмень яровой	4.39	5.21	5.63	5.66	0.49	5.06	5.40	5.29	0.42	5.45	5.53	5.17	0.32
Горох посевной	2.84	3.03	3.19	3.11	0.16	2.96	2.99	3.07	0.17	3.14	3.39	3.26	0.60
Соотношение основной и побочной частей урожая													
Озимая пшеница	0.81	0.82	0.91	0.87	—	0.73	0.69	0.71	—	0.80	0.84	0.81	—
Ячмень яровой	0.69	0.71	0.72	0.74	—	0.70	0.72	0.76	—	0.71	0.75	0.76	—
Горох посевной	0.57	0.61	0.63	0.62	—	0.58	0.60	0.61	—	0.63	0.61	0.66	—

танных материалов в полевых опытах, зависела не только от возделываемой культуры, но и от самой породы. В частности, применение диатомита в наибольшей степени способствовало повыше-

нию урожайности зерна ячменя на фоне доз 6–12 т/га, где прибавка составила соответственно 35–38%, а также урожая озимой пшеницы и гороха на фоне применения породы 6 т/га, где прибав-

ка составила соответственно 24 и 25% относительно контроля.

Влияние цеолита оказалось максимально выраженным также в отношении зерна ячменя и в меньшей мере – гороха посевного, прибавка урожайности которых составила соответственно 27–32 и 11–15% при внесении в почву цеолита 6 и 12 т/га.

Влияние бентонитовой глины также было достаточно эффективным и достоверным на урожайность культур: при внесении дозы 6 т/га урожайность зерна пшеницы, ячменя и гороха увеличивалась соответственно на 17, 37 и 27%, дозы 12 т/га – на 14, 30 и 33% относительно контроля.

В отношении побочной части урожая (соломы зерновых) в целом нужно отметить, что применение пород также способствовало увеличению ее продуктивности и в особенности – ячменя. Под воздействием диатомовой породы урожайность его соломы повышалась на 28–29, под воздействием цеолита – на 22–23, бентонитовой глины – на 18–26%. Наиболее эффективными дозами пород оказались дозы 6 и 12 т/га. Максимальная продуктивность соломы озимой пшеницы была установлена на фоне применения цеолита (увеличение показателя на 22–23%), гороха посевного – на фоне применения бентонита (на 15–19%).

Соотношение зерно : солома в урожае сельскохозяйственных растений заметно увеличивалось: пшеницы – на 12, гороха – на 11% при применении диатомита, ячменя при применении цеолитовой породы – на 10%, ячменя – на 10 и гороха – на 16% при применении бентонитовой глины. У озимой пшеницы на фоне внесения цеолитовой породы было выявлено сужение этого соотношения на 12–15% в зависимости от дозы ее внесения.

## ВЫВОДЫ

1. В микрополевых опытах, проведенных на дерново-подзолистой почве Нижегородской обл., было установлено положительное действие мелиоративных доз кремнистых пород (диатомита, цеолита и бентонитовой глины) на показатели агрохимического состояния почвы и продуктивность сельскохозяйственных растений зернового звена севооборота пшеница озимая–ячмень яровой–горох посевной. В зависимости от вида высококремнистого материала и его дозы эффекты их влияния на агрохимические показатели почвы и урожайность культур различались, но в целом наиболее эффективными были дозы 6 и 12 т/га.

2. При влиянии диатомита актуальная кислотность почвы снижалась на 0.42 ед., обменная – на 0.33 ед. рН, гидролитическая – на 0.15 мг-экв/100 г.

Содержание обменных форм алюминия в почве снижалось на 0.11 мг-экв/100 г, обменных форм кальция и магния – увеличивалось соответственно на 0.39 и 0.33 мг-экв/100 г. При применении диатомовой породы фактор емкости почвенных фосфатов повышался на 55, фактор интенсивности – на 225%, в результате чего доля интенсивных соединений фосфора в почве увеличивалась почти в 2 раза. Концентрация обменных соединений калия в почве повышалась при применении диатомита на 32%. В условиях микрополевого опыта урожайность зерна и соломы озимой пшеницы увеличивалась соответственно на 0.29–0.59 и 0.29–0.32 т/га, ярового ячменя – соответственно на 0.69–1.16 и 0.82–1.27 т/га, гороха посевного – соответственно на 0.23–0.40 и 0.19–0.35 т/га.

3. При влиянии цеолита актуальная кислотность почвы снижалась на 1.11, обменная – на 0.48 ед. рН, гидролитическая – на 0.33 мг-экв/100 г. Содержание обменных форм алюминия в почве снижалось на 0.05 мг-экв/100 г, обменных форм кальция и магния – увеличивалось соответственно на 17.7 и 12.0 мг-экв/100 г. На фоне применения цеолитовой породы фактор емкости почвенных фосфатов повышался на 43, фактор интенсивности – на 92%, в результате чего доля интенсивных соединений фосфора в почве увеличивалась на 27%. Концентрация обменных соединений калия в почве повышалась при применении цеолита на 46%. В условиях микрополевого опыта с породой урожайность зерна и соломы озимой пшеницы увеличивалась соответственно на 0.09–0.19 и 0.45–0.70 т/га, ярового ячменя – на 0.51–0.98 и 0.67–1.01 т/га, гороха посевного – на 0.10–0.24 и 0.12–0.23 т/га.

4. В условиях влияния бентонитовой глины актуальная кислотность почвы снижалась на 0.65 ед., обменная – на 0.31 ед. рН, гидролитическая – на 0.20 мг-экв/100 г. Содержание обменных форм алюминия в почве снижалось на 0.19 мг-экв/100 г, обменных форм кальция и магния – увеличивалось соответственно на 0.70 и 0.24 мг-экв/100 г. При применении бентонитовой породы фактор емкости почвенных фосфатов повышался на 30, фактор интенсивности – на 175%, в результате чего доля интенсивных соединений фосфора в почве увеличивалась почти в 2 раза. Концентрация обменных соединений калия в почве повышалась при применении глины на 35%. В условиях микрополевого опыта с породой урожайность зерна и соломы озимой пшеницы увеличивалась соответственно на 0.19–0.42 и 0.27–0.40 т/га, ярового ячменя – на 0.86–1.13 и на 0.78–1.14 т/га, гороха посевного – на 0.36–0.53 и 0.30–0.55 т/га.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // *Агрохимия*. 2019. № 12. С. 3–15.
2. Окорков В.В. К теории химической мелиорации кислых почв // *Агрохимия*. 2019. № 9. С. 3–17.
3. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 3–13.
4. Ушаков Р.Н., Левин В.И., Ручкина А.В., Головина Н.А. Некоторые параметры устойчивости агросерой почвы // *Агрохимия*. 2019. № 4. С. 11–22.
5. Яковлев А.С., Макаров О.А., Евдокимова М.В., Огородников С.С. Деградация земель и проблемы устойчивого развития // *Почвоведение*. 2018. № 9. С. 1167–1174.
6. Arshad M.A., Martin S. Identifying critical limits for soil indicators in agroecosystems // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2002. V. 88 (2). P. 153–160.
7. Безручко Е.В., Федотова Л.С. Доступный для растений кремний – фактор устойчивого производство картофеля // *Агрохимия*. 2021. № 8. С. 70–81.
8. Колесников М.П. Формы кремния в растениях // *Усп. биол. химии*. 2001. Т. 41. С. 301–322.
9. Медведев С.С. Физиология растений. СПб.: БХВ–Петербург, 2015. 512 с.
10. Панова Г.Г., Аникина Л.М., Канах Е.В., Удалова О.Р., Шибанов Д.В. Кремнийсодержащие хелатные микроудобрения в повышении устойчивости растений к действию стрессовых факторов // *Агрофизика*. 2012. № 3 (7). С. 31–40.
11. Самсонова Н.Е. Кремний в растительных и животных организмах // *Агрохимия*. 2019. № 1. С. 86–96.
12. Слатья И.В., Ложникова В.Н., Кондратьева В.В., Ниловская Н.Т. Действие водного стресса и соединений кремния на содержание эндогенных фитогормонов и рост ярового ячменя // *Агрохимия*. 2013. № 8. С. 38–48.
13. Ande B., Ande P., Bocharnikova E.A., Calvert D.V., Matichenkov V.V. Effect of Si-rich slag and lime on P leaching in sandy soil // *J. Amer. Soc. Sugar Cane Technol.* 2002. V. 22. P. 9–15.
14. Бойцова Л.В. Изменение физико-химических свойств в профиле дерново-подзолистой почвы различного сельскохозяйственного использования // *Агрофизика*. 2015. № 2. С. 9–15.
15. Иванов А.Л., Воробьев В.А., Иванова Ж.А. Современные деградиционные процессы в хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах // *Пробл. агрохим. и экол.* 2015. № 3. С. 15–19.
16. Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф., Зенова Г.М., Скворцова И.Н. Влияние длительного применения средств химизации на агрохимические и микробиологические свойства дерново-подзолистой почвы // *Агрохимия*. 1998. № 5. С. 5–12.
17. Яшин М.А., Авдеева Т.Н., Козут Б.М., Маркина Л.Г., Семенов В.М., Тарасов С.И., Фрид А.С. Агрогенная трансформация лабильных гумусовых веществ и структуры дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Агрохимия*. 2015. № 9. С. 3–13.
18. Артемьева З.С., Кириллова Н.П. Роль продуктов органо-минерального взаимодействия в структурообразовании и гумусообразовании основных типов почв центра Русской равнины // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2017. Вып. 90. С. 73–95.
19. Гомонова Н.Ф. Эколого-агрохимические функции удобрений при их длительном применении (50 лет) в агроценозе на дерново-подзолистой почве: Дис. ...д-ра биол. наук. М., 2010. 278 с.
20. Матаруева И.А. Микробиологические закономерности формирования гумусных запасов дерново-подзолистых почв. Кострома: КГСХА, 2005. 190 с.
21. Русакова И.В. Микробиологические и экофизиологические параметры дерново-подзолистой почвы при длительном применении соломы и минеральных удобрений, их связь с урожайностью // *Сел.-хоз. биол.* 2020. Т. 55. № 1. С. 153–162.
22. Черников В.А., Кончиц В.А., Пупонин А.И. Влияние различных способов и приемов обработки суглинистой дерново-подзолистой почвы на структуру гуминовых кислот и эмиссию парниковых газов // *Изв. ТСХА*. 2016. № 1. С. 24–39.
23. Baldock J.A., Skjemstad J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack // *Org. Geochem.* 2000. V. 31 (7–8). P. 697–710.
24. Иванов А.И. Некоторые закономерности изменения кислотно-основного состояния дерново-подзолистых легкосуглинистых почв при сельскохозяйственном использовании // *Агрохимия*. 2000. № 10. С. 28–33.
25. Кирпичников Н.А., Бижан С.П. Влияние извести на физико-химические свойства дерново-подзолистой почвы и продуктивность полевого севооборота при систематическом применении азотных и калийных удобрений в длительном опыте // *Агрохимия*. 2019. № 8. С. 14–17.
26. Кузьменко Н.Н. Влияние известкования на показатели плодородия дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // *Агрохимия*. 2019. № 10. С. 35–38.
27. Brahy V., Delvaux B. Cation exchange resin and test vermiculite to study soil processes in situ in a toposequence of luvisol and cambisol on loess // *Europ. J. Soil Sci.* 2001. V. 52 (3). P. 397–408.
28. Ковалевская Н.П., Завьялова Н.Е., Шаравин Д.Ю., Васбиева М.Т. Особенности микробоценоза дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при длительном применении минеральных и органических удобрений // *Пробл. агрохим. и экол.* 2018. № 2. С. 24–28.
29. Кутузова Р.С., Сирота Л.Б., Орлова О.В., Воробьев Н.И. Микробное сообщество и анализ почвенно-микробиологических процессов в дерново-подзолистой почве // *Почвоведение*. 2001. № 3. С. 320–332.
30. Налиухин А.Н., Хамитова С.М., Глинушкин А.П., Авдеев Ю.М., Снетилова В.С., Лактионов Ю.В., Суров В.В., Силуянова О.В., Белозеров Д.А. Изменение метагенома прокариотного сообщества как показатель плодородия пахотных дерново-подзо-

- листных почв при применении удобрений // Почвоведение. 2018. № 3. С. 331–337.
31. Якушев В.П., Осипов А.И., Миннулин Р.М., Воскресенский С.В. К вопросу об известковании кислых почв в России // Агрофизика. 2013. № 2 (10). С. 18–22.
  32. Bowles T.M., Acosta-Martinez V., Calderon F., Jackson L.E. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape // Soil Biol. Biochem. 2014. V. 68 (1). P. 252–262.
  33. 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.
  34. Куликова А.Х. Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: Ульянов. ГСХА им. П. А. Столыпина, 2013. 176 с.
  35. Самсонова Н.Е. Кремний в почвах и растениях // Агрохимия. 2005. № 6. С. 76–86.
  36. Biel K.Y., Matichenkov V.V., Fomina I.R. Protective role of silicon in living systems // Function. Foods Chronic Diseases. Richardson, 2008. V. 3. P. 208–231.
  37. Cornelis J.T., Delvaux B., Georg R.B., Lucas Y., Ranger J., Opfergelt S. Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: a review // Biogeosciences. 2011. V. 8 (1). P. 89–112.
  38. Агафонов Е.В., Хованский М.В. Влияние бентонита на повышение плодородия чернозема обыкновенного // Почвоведение. 2014. № 5. С. 597–601.
  39. Белоусов В.С., Тараненко В.В., Дядюченко Л.В. Пролонгирующее влияние цеолитсодержащих пород Краснодарского края на азотные удобрения // Агрохимия. 2019. № 2. С. 37–42.
  40. Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Погорелов А.Г. Сравнительная характеристика некоторых кремниевых удобрений // Агрохимия. 2011. № 11. С. 25–30.
  41. Дан-Дан З., Пенг-Бо З., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П. Оценка объемов связывания углерода корнями риса под влиянием кремниевых удобрений // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2019. № 3. С. 17–22.
  42. Матыченков В.В., Кособрюхов А.А., Бочарникова Е.А. Урожайность кукурузы и содержание хлорофилла в растениях при внесении в почву кремниевых удобрений // Агрохимия. 2013. № 5. С. 25–30.
  43. Матыченков И.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В. Подвижные кремниевые соединения в системе почва-растение и методы их определения // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2016. № 3. С. 37–46.
  44. Капранов В.Н. Эффективность кремнийсодержащего вещества диатомита на дерново-подзолистой почве // Пробл. агрохим. и экол. 2010. № 2. С. 10–14.
  45. Куликова А.Х. Влияние высококремнистых пород как удобрений сельскохозяйственных культур на урожайность и качество продукции // Агрохимия. 2010. № 7. С. 18–25.
  46. Лобода Б.П., Багдасаров В.Р., Фицура Д.Д. Влияние удобрения на основе цеолитсодержащих трепелов Хотынецкого месторождения на урожайность и качество картофеля // Агрохимия. 2014. № 3. С. 28–35.
  47. 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.
  48. Chimney M.J., Yongshan W., Matichenkov V.V., Calvert D.V. Minimizing phosphorus release from newly flooded organic soils amended with calcium silicate slag: a pilot study // Wetland. Ecol. Manag. 2007. V. 15 (5). P. 385–390.
  49. Epstein E. Silicon: its manifold roles in plants // Ann. Appl. Biol. 2009. V. 155. P. 155–160.
  50. Matichenkov V.V., Wei X., Liu D., Bocharnikova E.A. Theory, practice and prospection of Si fertilizer // Agriculture. Sci. Technol. 2013. V. 14 (3). P. 498–502.
  51. Чао Л., Кси Б., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П. Влияние недостатка увлажнения и повышенного содержания соли на кремниевое состояние почв европейской части России и центрального Китая // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2018. № 3. С. 16–22.
  52. Васильева Н.Г. Оценка эффективности трепела как почвенного мелиоранта // Пробл. агрохим. и экол. 2017. № 3. С. 24–30.
  53. Sama J., Metz V., Ganor J. The effect of pH and temperature on kaolinite dissolution rate under acidic conditions // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. V. 66 (22). P. 3913–3926.
  54. Metz V., Amram K., Ganor J. Stoichiometry of smectite dissolution reaction // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. V. 69 (7). P. 1755–1772.
  55. Шабина И.С., Вилков В.С., Кузнецова Л.П. Характеристики основных сортов сельскохозяйственных культур, рекомендованных для возделывания в Волго-Вятском регионе. Н. Новгород: НГСХА, ООО «Юнион Принт», 2010. 150 с.
  56. Пискунов А.С. Методы агрохимических исследований. М.: КолосС, 2004. 312 с.
  57. Полякова Н.В., Володина Е.Н., Платонычева Ю.Н. Рабочая классификация почв Нижегородской области. Н. Новгород: НГСХА, 2017. 64 с.
  58. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
  59. Кусова Н.В., Степанова Л.П. Кипящие камни (цеолиты). Орел: ОрелГАУ, 2005. 18 с.
  60. Мосталыгина Л.В., Елизарова С.Н., Костин А.В. Бентонитовые глины Зауралья: экология и здоровье человека. Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. 148 с.
  61. Мамонтов В.Г., Гладков А.А. Практикум по химии почв. М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2015. 272 с.
  62. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
  63. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2011. 352 с.

64. *Мартиросян Г.Г., Манукян А.Г., Овсепян Э.Б., Костанян К.А.* Исследование адсорбционно-структурных свойств природных и обработанных диатомитов // Журн. приклад. хим. 2003. Т. 76. Вып. 4. С. 551–555.
65. *Махкамова Д.Н., Содикова Ш.А., Усмонова З.Т.* Bentonитовая глина, ее физико-химическая характеристика и применение в народном хозяйстве // Universum: Техн. науки. 2019. № 6 (63). С. 95–98.
66. *Пономарева О.А., Тимошин С.Е., Князева Е.Е., Ордомский В.В., Ющенко В.В., Куликов Н.С., Зайковский В.И., Иванова И.И.* Физико-химические и каталитические свойства цеолитных материалов с комбинированной микро-мезопористой структурой // Журн. физ. химии. 2011. Т. 85. № 12. С. 2253–2259.
67. *Брек Д.* Цеолитные молекулярные сита. М.: Мир, 1976. 781 с.
68. *Кольцова Т.Н.* Анализ структур цеолитов с общей формулой  $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \times n\text{H}_2\text{O}$  // Неорг. мат-лы. 2007. Т. 43. № 2. С. 218–226.
69. *Рабо Дж.* Химия цеолитов и катализ на цеолитах. М.: Мир, 1980. Т. 1. 502 с.
70. *Гладкова К.Ф.* Роль кремния в фосфатном питании растений // Агрохимия. 1982. № 3. С. 133–140.
71. *Елешев Р.Е., Иванов А.Л., Садвакасов С.К.* Изучение влияния совместного внесения фосфорных и кремнийсодержащих удобрений на фосфатный режим основных типов почв Казахстана. Сообщ. 1. Исследование влияния различных форм кремнийсодержащих удобрений // Агрохимия. 1990. № 10. С. 35–42.
72. *Иванов А.Л.* Изучение влияния совместного внесения фосфорных и кремнийсодержащих удобрений на фосфатный режим основных типов почв Казахстана. Сообщ. 3. Влияние кремния на сорбционную способность коллоидных фракций почв в отношении фосфатов // Агрохимия. 1992. № 5. С. 25–30.
73. *Лякина О.А.* Использование фосфатов пониженной растворимости и соединений кремния при выращивании сельскохозяйственных культур в условиях дерново-подзолистых почв: Дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2012. 161 с.

## Influence of Diatomite, Zeolite and Bentonite Clay on Agrochemical Indicators Sod-Podzolic Soil and Yield Agricultural Crops

A. V. Kozlov<sup>a, #</sup>, A. H. Kulikova<sup>b</sup>, and I. P. Uromova<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Russian State Agrarian University—Moscow Timiryazev Agricultural Academy  
Timiryazevskaya ul. 49, Moscow 127434, Russia,*

<sup>b</sup>*Stolypin Ulyanovsk State Agrarian University  
Novyi Venets bul. 1, Ulyanovsk 432017, Russia*

<sup>c</sup>*K. Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University  
ul. Ulyanova 1, Nizhny Novgorod 603950, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: a.kozlov@rgau-msha.ru*

In three-year microfield experiments on sod-podzolic light loam soil, the effect of reclamation doses (3, 6 and 12 t/ha) of siliceous rocks (diatomite, zeolite and bentonite clay) on the main agrochemical properties of the soil and crop productivity in the grain link of the crop rotation of winter wheat-spring barley-seed peas was studied. Among other positive effects, a significant effect of diatomite was found in reducing the concentration of exchangeable forms of aluminum in the soil (by 0.11 mg-eq/100 g), increasing the content of exchangeable forms of magnesium (by 0.33 mg-eq/100 g) and phosphates of soil solution (by 225%). Against the background of the influence of diatoms, barley gave the greatest increase in grain yield (by 38%) and straw (by 29%). The most significant effect of zeolite was revealed in a decrease in the actual, metabolic and hydrolytic acidity of the soil (a decrease of 1.11, 0.48 pH units and 0.33 mg-eq/100 g), as well as the concentration of exchange compounds of calcium (an increase of 17.7 mg-eq/100 g), magnesium (by 12.0 mg-eq/100 g) and potassium (by 46%). The introduction of zeolite rock contributed to the greatest increase in the yield of grain (by 32%) and straw (by 23%) of barley. The most significant influence of bentonite clay was established on the indicators of actual soil acidity (their decrease by 0.65 pH units), the content of exchangeable aluminum (decrease by 0.19 mg-eq/100 g) and phosphates of soil solution (increase by 175%). The introduction of clay contributed to the formation of the greatest increase in grain yield (by 33%) and straw (by 19%) of seed peas.

**Keywords:** diatomite, zeolite, bentonite clay, sod-podzolic soil, indicators of acid-base state of the soil, agrochemical properties, winter wheat, spring barley, seed peas, yield.

УДК 631.415:631.811.93:631.445.24

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КИСЛОТНО-ОСНОВНОЙ БУФЕРНОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ СОЕДИНЕНИЙ КРЕМНИЯ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ КРЕМНИСТЫХ ПОРОД

© 2023 г. А. В. Козлов<sup>1,\*</sup>, А. Х. Куликова<sup>2</sup><sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева  
127434 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия<sup>2</sup>Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина  
432017 Ульяновск, бул. Новый Венец, 1, Россия

\*E-mail: a.kozlov@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Исследована вариабельность основных показателей кислотно-основной буферности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, а также описана динамика содержания мономеров и полимеров кремнекислоты и кислоторастворимых соединений кремнезема в почве в условиях применения мелиоративных доз различных кремнистых пород (диатомита, цеолита и бентонитовой глины 3, 6, 12 т/га). Положительное влияние на противокислотную буферную способность почвы оказали цеолитовая порода и бентонит, сдвигая  $H^+/OH^-$ -равновесие системы более, чем на 160 и 20% соответственно в зависимости от примененной дозы материала. Действие диатомита проявлялось в противощелочной области почвенной буферности, за счет которого индекс  $H^+/OH^-$ -равновесия понижался почти на 40%. На фоне применения диатомовой породы и бентонитовой глины содержание мономеров кремнекислоты в почве увеличивалось более чем в 5 и 4 раз соответственно, на фоне применения цеолита — более чем в 2 раза. Содержание полимеров кремниевых кислот в почве повышалось до 3-х и 4-х раз при применении цеолитовой и бентонитовой пород соответственно. При этом внесение в почву диатомита способствовало увеличению содержания полимеров  $H_4SiO_4$  в 5–10 раз в зависимости от дозы материала. Содержание кислоторастворимой фракции кремниевых соединений в почве повышалось в 1.4–2.8 раза на фоне различных доз изученных пород и в целом имело различную зависимость от состава каждой из них. На основе выявленных закономерностей содержания и динамики подвижных соединений кремния в почве (мономеров и полимеров кремниевых кислот, кислоторастворимых фракций кремнезема) дана характеристика и раскрыто значение впервые предлагаемых показателей, описывающих их динамическое состояние и направления трансформации — потенциал образования мономеров ( $M-A_{Si}$ ) и полимеров ( $P-A_{Si}$ )  $H_4SiO_4$ , степень полимеризации ( $Pm-V_{Si}$ ) и деполимеризации ( $Dm-V_{Si}$ ) кремнекислоты, общее содержание рыхло-аморфной фракции кремнезема ( $Si_{AMF}$ ) и степени аморфности  $Si$ -содержащей минеральной фазы почвы ( $AMF-V_{Si}$ ). Изучение влияния кремниевых материалов в условиях дерново-подзолистой почвы выявило, что в зависимости от качественного состава и дозы кремнистой породы показатель  $M-A_{Si}$  может увеличиваться на 30–80%, а показатель  $P-A_{Si}$  может находиться в диапазоне повышения от 0.3 до 3.0 и более раз. Процессы полимеризации кремнекислоты и распада ее полимеров на мономеры, выражаемые соответственно показателями  $Pm-V_{Si}$  и  $Dm-V_{Si}$ , также могут активно увеличиваться на фоне взаимодействия почвы с породами, мера изменения которых выражается порядком 10–40% отклонения относительно контроля. Общее содержание рыхло-аморфной фракции кремнезема в почве, выраженное показателем  $Si_{AMF}$ , может определяться составом каждой кремнистой породы, используемой в качестве мелиоранта. Если при применении диатомита показатель может уменьшаться почти на 30%, то при использовании цеолита и бентонитовой глины может происходить его увеличение на 30–100% в зависимости от дозы. Аналогичным образом может изменяться и показатель степени аморфности кремнийсодержащей части почвенного вещества ( $AMF-V_{Si}$ ).

**Ключевые слова:** кремнистые породы, дерново-подзолистая почва, кислотно-основная буферность, мономеры и полимеры кремниевой кислоты, кислоторастворимая фракция кремнезема, показатели трансформации соединений кремния в почве.

DOI: 10.31857/S0002188123120098, EDN: SRXBXD

## ВВЕДЕНИЕ

Занимая основную долю в валовом составе почв и почвенном растворе, кремний и его соединения до сих пор остаются теми компонентами органо-минеральной почвенной матрицы, которым в научных изысканиях уделяется пристальное внимание [1–6]. Поскольку подавляющее количество кремнийсодержащих веществ в почвах представлено сложными минералами различного генезиса и свойств, их роль во внутрпочвенных процессах до сих пор остается малоизученной [7–17]. Это относится и к пониманию аспектов участия кремниевых веществ в формировании или же оптимизации таких ценных свойств почвенного вещества как буферная способность и, в частности, буферная активность в кислотно-основном поле ионов системы ПК–почвенный раствор [18–24].

Вопреки недостаточности системных наблюдений за параметрами кислотно-основной буферности почв и, в том числе почвенного покрова агрофитоценозов, множество исследователей подтверждают ее значимость для оценки состояния кислотности пахотных земель и в целом формирования экологической устойчивости почвенного покрова агроландшафтов [25–32].

В отношении почвенного кремнезема нужно отметить, что в современной научной литературе подчеркнута крайне малое освещение вопросов состояния подвижных соединений кремния в почвах, пребывающих как в условиях естественных фитоценозов, так и в агрофитоценозах [33–36]. Более того, в условиях последних систематизированных материалов изучения динамики содержания кремниевых веществ в системе почва–растение и в целом представления об особенностях трансформации кремниевых компонентов в ППК явно недостаточно. С целью полновесного и комплексного описания их физико-химической значимости как при использовании традиционных систем удобрения и мелиорации, так и при применении альтернативных источников минерального питания культурных растений, такие исследования уже давно приобрели актуальный статус в агрохимии и агропочвоведении [37–43].

В связи с этим цель работы – анализ вариативности показателей кислотно-основной буферности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы и оценка трансформации подвижных кремниевых соединений в условиях применения мелиоративных доз диатомовой, цеолитовой и бентонитовой пород как кремнистых мелиорантов комплексного действия.

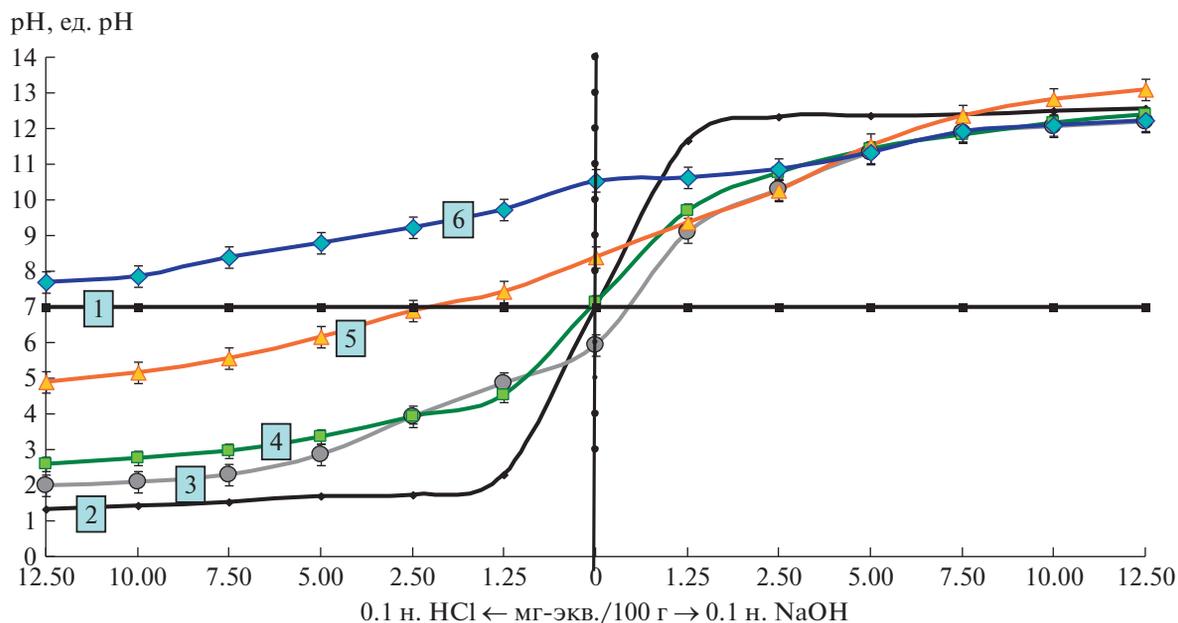
## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценку изменения основных показателей, характеризующих кислотно-основную буферность дерново-подзолистой почвы, а также трансформацию ее подвижных соединений кремния проводили по результатам серии полевых опытов с мелиоративными дозами кремнистых пород, заложенных на одном из полей картофелеводческого предприятия ООО “Элитхоз” (Нижегородская обл.).

Опыты представляли собой 3 микрополевых эксперимента с каждой из испытанных кремнистых пород, площадь делянки – 1 м<sup>2</sup>, повторность – четырехкратная, агротехника – ручной способ на всех этапах проведения экспериментов [44]. Схема опытов – 4 варианта, однотипная для всех опытов: 1 – контроль без применения мелиорантов, 2 – порода 3 т/га, 3 – порода 6 т/га, 4 – порода 12 т/га, рендомизированное расположение делянок. Опыты проводили в период 2014–2017 гг., последовательно выращивая сельскохозяйственные культуры зернового звена севооборота: озимую пшеницу (2015 г.) – ячмень яровой (2016 г.) – горох посевной (2017 г.). Породы вносили в почву осенью 2014 г. перед посевом озимой культуры на глубину обрабатываемого слоя (15 см).

Почва экспериментального участка – подтип дерново-подзолистой типичной почвы П<sub>д</sub>, сформированной на покровном суглинке [45, 46]. Почва характеризовалась (2014 г.) следующими физико-химическими параметрами: рН<sub>Н<sub>2</sub>О</sub> 5,9, рН<sub>КCl</sub> 4,8 ед.,  $H_T$  – 2,83 мг-экв/100 г, содержание Al<sup>3+</sup> – 0,35 мг-экв/100 г., Ca<sup>2+</sup> – 5,10, Mg<sup>2+</sup> – 1,17 мг-экв/100 г,  $V_S$  – 69%. Содержание мономеров H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> – 16, полимеров H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> – 48, кислото-растворимых фракций Si = 213 мг/кг.

В качестве кремнистых пород, содержащих значительные концентрации неокристаллизованного кремнезема и наиболее часто используемых в агрономической практике в качестве мелиорантов комплексного действия, были использованы диатомит из Ульяновской обл., цеолит из Орловской обл. и бентонитовая глина из Курганской обл. Данные породы характеризовались следующими химическими показателями соответственно: рН<sub>Н<sub>2</sub>О</sub> = 7,2, 8,3 и 9,5 ед. рН, ионообменная емкость – 12–80, 34–48 и 80–150 мг-экв/100 г, пористость – 70–80, 53–61 и 48–75%, удельная поверхность – 20–50, 47–95 и 50–120 м<sup>2</sup> × 10<sup>3</sup>/кг, общее содержание кальция – 0,52, 13,3 и 1,81%, общее содержание магния – 0,48, 1,90 и 3,01%, общее содержание натрия – 0,42, 0,20 и 0,78%, общее содержание аморфного кремнезема – 42,1, 26,7 и 18,4%, содержание водорастворимых форм



**Рис. 1.** Кривые параметров кислотно-основной буферности исследованных объектов: 1 – линия буферности условно абсолютного эталона (кварцевый песок), 2 – линия pH растворов HCl/NaOH в зависимости от концентрации ионов  $H^+/OH^-$ , 3 – линия буферности исследованной почвы, 4 – линия буферности образца диатомита, 5 – линия буферности образца цеолита, 6 – линия буферности образца бентонита.

кремния – 996, 1420 и 2260 мг/кг, содержание кислоторастворимых форм кремния – 12 200, 7950 и 10 500 мг/кг [39, 47, 48].

Точечные почвенные образцы (5 ед./делянку) отбирали методом конверта в дни учета урожая культурных растений, объединяя их в 1 образец, после чего доставляли в лаборатории при НГПУ им. К. Минина и определяли следующие показатели: параметры кислотно-основной буферности ( $S_B$ ,  $S_{BE}$ , индекс  $H^+/OH^-$ -равновесия) определяли потенциометрическим методом Аррениуса–Надточего с помощью pH-метра–милливольтметра МАРК-903, содержание мономеров и полимеров кремнекислоты – спектрофотометрическим (молибденово-кислым) методом с экстракцией по Маллену и Райли в модификации Матыченкова с помощью спектрофотометра ПЭ-5400 ВИ. Образцы кремнистых пород также анализировали на определение показателей кислотно-основной буферности по аналогичной методике [33, 49–52].

Полученные результаты подвергали математической обработке при помощи программного пакета MS Office Excel методом анализа вариационных рядов и установления доверительных интервалов в значимости признаков [53] при помощи  $F$ -критерия Фишера ( $p < 0.05$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде чем давать характеристику изменениям показателей кислотно-основной буферности исследованной почвы, произошедшим под влиянием мелиоративных доз кремнистых пород, необходимо было провести оценку буферных свойств самих материалов и исходной почвы (рис. 1).

Установлено, что исследованные породы обладали буферной активностью в отношении смещения  $H^+/OH^-$ -равновесия в системе, которая различалась в зависимости от породы. В частности, в сравнении с другими породами буферная способность диатомита (линия 4) оказалась очень слабой и характеризовалась выраженностью как против подкисления ( $S_B$  и  $S_{BE}$  в  $H^+$ -интервале = 5.86 см<sup>2</sup> и 22%), так и против подщелачивания ( $S_B$  и  $S_{BE}$  в  $OH^-$ -интервале = 7.87 см<sup>2</sup> и 30%). Индекс  $H^+/OH^-$ -равновесия в веществе диатомита составил 0.75 усл. ед., что в целом свидетельствовало о малом потенциале буферной активности породы, зависящей от pH внешней среды [17, 20, 21].

Минералы и подвижные вещества, входящие в состав цеолита и глины, имели более выраженную буферную способность, в большей мере проявляющуюся против подкисления, чем против подщелачивания. Например,  $S_B$  в  $H^+/OH^-$ -ин-

**Таблица 1.** Изменение показателей кислотно-основной буферности почвы под влиянием кремнистых пород (среднее за 3 года)

Вариант	Площадь буферности почвы ( $S_B$ ), см <sup>2</sup>		Степень буферной емкости почвы ( $S_{BE}$ ), %		Индекс $H^+/OH^-$ -равновесия, усл. ед.
	$H^+$ -интервал	$OH^-$ -интервал	$H^+$ -интервал	$OH^-$ -интервал	
Контроль	4.85	8.8	19	34	0.55
Д <sub>1</sub> 3 т/га	5.09	12.2	19	46	0.42
Д <sub>2</sub> 6 т/га	5.44	14.3	21	54	0.38
Д <sub>3</sub> 12 т/га	5.21	13.4	20	51	0.39
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	0.66	1.8	3	5	0.05
Ц <sub>1</sub> 3 т/га	9.4	9.2	36	35	1.01
Ц <sub>2</sub> 6 т/га	13.3	9.4	51	36	1.42
Ц <sub>3</sub> 12 т/га	14.2	9.3	54	35	1.53
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	1.6	1.3	7	5	0.16
Б <sub>1</sub> 3 т/га	6.8	10.2	26	39	0.66
Б <sub>2</sub> 6 т/га	8.1	13.5	31	51	0.61
Б <sub>3</sub> 12 т/га	9.6	15.3	37	58	0.63
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	0.2	0.7	1	2	0.04

Примечание. Д – диатомит, Ц – цеолит, Б – бентонитовая глина.

тервале у цеолита составляла соответственно 13.4 и 7.46 см<sup>2</sup>, а  $S_{BE}$  – 51 и 48%. У бентонита данные показатели соответственно составляли в  $H^+$ -интервале 20.7 см<sup>2</sup> и 79%, в  $OH^-$  интервале – 7.78 см<sup>2</sup> и 30%. Закономерно, что индекс  $H^+/OH^-$ -равновесия данных пород был много больше единицы, сильно смещен в щелочную сторону и составил 1.80 и 2.67 усл. ед.

Вполне очевидно, что строение основных минералов, входящих в состав цеолитовой и бентонитовой пород, характеризующееся каркасным и полимерным строением, формирует их высокий потенциал буферной активности, а существенные концентрации ионообменных форм кальция, магния и натрия в своем составе определяют противокислотную сторону буферности [8, 19, 54, 55].

Исходная дерново-подзолистая легкосуглинистая почва также закономерно характеризовалась определенной буферной способностью в отношении нейтрализации  $H^+$ - и  $OH^-$ -ионов. Нужно отметить, что Апах данной почвы не проявлял высокой противокислотной буферной активности против подкисления (в  $H^+$ -интервале  $S_B = 4.86$  см<sup>2</sup>,  $S_{BE} = 19\%$ ). Причиной этому была сильная выщелоченность верхних горизонтов почвенного профиля от основных катионов вследствие эволюционных мезо процессов кислотного гидролиза твердой фазы и Al–Fe-миграции и десицикации

всей минеральной матрицы почвы [56, 57]. Вследствие чего дерново-подзолистые почвы относятся к группе почв, у которых ППК не насыщен основаниями, а их коллоидная система активно подвергается пептизации вследствие сильного проявления кислотного гидролиза вещества [58, 59].

Щелочной интервал кислотно-основной буферности исследованной почвы, наоборот, характеризовался более сильной выраженностью (в  $OH^-$ -интервале  $S_B = 8.83$  см<sup>2</sup>,  $S_{BE} = 34\%$ ), что закономерно было обусловлено высокой насыщенностью ППК кислотными катионами ( $H^+$  и  $Al^{3+}$ ). При этом  $H^+/OH^-$ -равновесие в почве оказалось занижено и смещено в сторону активности ионов  $H^+$  (0.56 усл. ед.), что свидетельствовало как о генетически низкой буферной активности естественных дерново-подзолистых почв, так и об их низком кислотно-нейтрализующем потенциале. В условиях антропогенеза и, в частности, при функционировании агроэкосистем, данные почвы достаточно легко подвергаются закислению [60, 61].

В результате проведения микрополевых опытов было установлено различное влияние кремнистых пород на показатели кислотно-основной буферности дерново-подзолистой почвы (табл. 1).

На фоне действия диатомита параметры буферной активности почвы существенно сдвигались в сторону  $OH^-$ -интервала: увеличение  $S_B$  до-

стигало 52–62%,  $S_{BE}$  – 12–20% относительно контроля, в результате чего индекс  $H^+/OH^-$ -равновесия снижался на 29–31%. По-видимому, подобная активность вещества породы была обусловлена значительным содержанием в своем составе кремниевых кислот, с одной стороны, и низкими концентрациями основных катионов, с другой стороны. Иными словами, диатомит не способствовал полезному повышению противокислотной буферности почвы в отсутствие в своем составе агентов, его активизирующих.

Применение цеолита активно способствовало увеличению показателей буферной активности почвы в  $H^+$ -интервале, что явно подчеркивало противокислотный эффект вещества породы. На фоне ее действия и в зависимости от дозы  $S_B$  и  $S_{BE}$  увеличивались в 2.7–2.9 раза, а индекс  $H^+/OH^-$ -равновесия повышался в 2.6–2.8 раза. В  $OH^-$ -интервале буферности наблюдали некоторую тенденцию к увеличению показателей, которое не превышало 3–6% относительно контроля. Очевидно, что столь значительный ацидо-нейтрализующий эффект при применении цеолита был обусловлен как высокими концентрациями обменных форм кальция и магния в своем составе, так и выраженной ионообменной силой [54, 62, 63].

В отличие от буферного эффекта при действии диатомита, проявлявшегося в противощелочном плече, и от ярко выраженного противокислотного эффекта от буферной активности цеолита, влияние бентонитовой глины оказалось примерно равновеликим в обоих плечах кислотно-основной буферности почвы. Например, в зависимости от дозы глины показатель  $S_B$  в  $H^+$ -интервале повышался на 40–98, в  $OH^-$ -интервале – на 15–73%,  $S_{BE}$  увеличивалась соответственно на 37–95 и на 15–71% относительно контроля. При этом индекс  $H^+/OH^-$ -равновесия увеличивался на 11–20%, причем в наибольшей мере – в варианте с минимальной дозой породы 3 т/га. По-видимому, равномерное и активное усиление буферной способности почвы за счет влияния бентонита было обусловлено как его сложным минералогическим составом, так и высокой сорбционной и ионообменной силой. В состоянии активного ионного обмена компоненты породы содержат натрий, кальций и магний, а ее высокий сорбционный эффект обусловлен сложным пакетным строением монтмориллонита и иных каркасных минералов, доминирующих в ее минералогическом составе [8, 19, 55, 64].

Изученные породы отличались повышенным содержанием неокристаллизованного (аморфного) кремнезема и кремниевых кислот, что в итоге

обуславливало наличие в их составе значительных концентраций водо- и кислоторастворимых соединений кремния [37, 39]. В связи с этим в работе изучали влияние высоких доз кремнистых пород на содержание мономеров и полимеров кремниевой кислоты в почве, а также на концентрацию кислоторастворимой фракции кремнезема и его активных соединений [33]. В связи с тем, что кремниевые кислоты способны активно подвергаться процессам полимеризации и распада полимеров на мономеры, а также образовывать высокодисперсные коллоидные растворы [65–67], далее в работе рассматривали различные массовые соотношения указанных соединений в динамике по годам исследования, которые описывали общие направления химической трансформации подвижных соединений кремния в почве.

На рис. 2 показана динамика содержания мономеров кремниевой кислоты в дерново-подзолистой почве при действии кремнистых пород. Было установлено многократное повышение концентрации монокремниевой кислоты в почве, в особенности в вариантах с применением диатомита и бентонитовой глины. В среднем за 3 года на фоне влияния диатомита содержание мономеров в почве достигало 2.6–5.1-кратного превышения контроля, бентонита – 2.3–4.7-кратного. При применении цеолитовой породы кратность увеличения показателя также была существенной, но не столь значительной: в зависимости от дозы в 1.6–2.5 раза относительно контроля.

В динамике по годам исследования нужно отметить, что пролонгация положительного эффекта увеличения содержания мономеров кремниевой кислоты наблюдали в вариантах применения каждой из пород, однако ее достоверное увеличение отмечено только в опытах с диатомитом и бентонитом и в особенности в вариантах со средней (6 т/га) и высокой (12 т/га) дозами.

В отличие от мономеров кремниевой кислоты, содержание которых в почве имело выраженную динамику по годам исследования и характеризовалось относительно увеличенным количеством в условиях применения диатомитовой породы и глины, содержание полимеров  $H_4SiO_4$  в почве оказалось наиболее высоким и варибельным по годам исследования только в вариантах с применением диатомита (рис. 3). В вариантах с внесением в почву цеолита и бентонита содержание поликремниевой кислоты в почве также оказалось высоким, но степень его увеличения не превышала 1.5–2.8-кратного при применении цеолита и 2.8–4.0-кратного – бентонитовой глины.

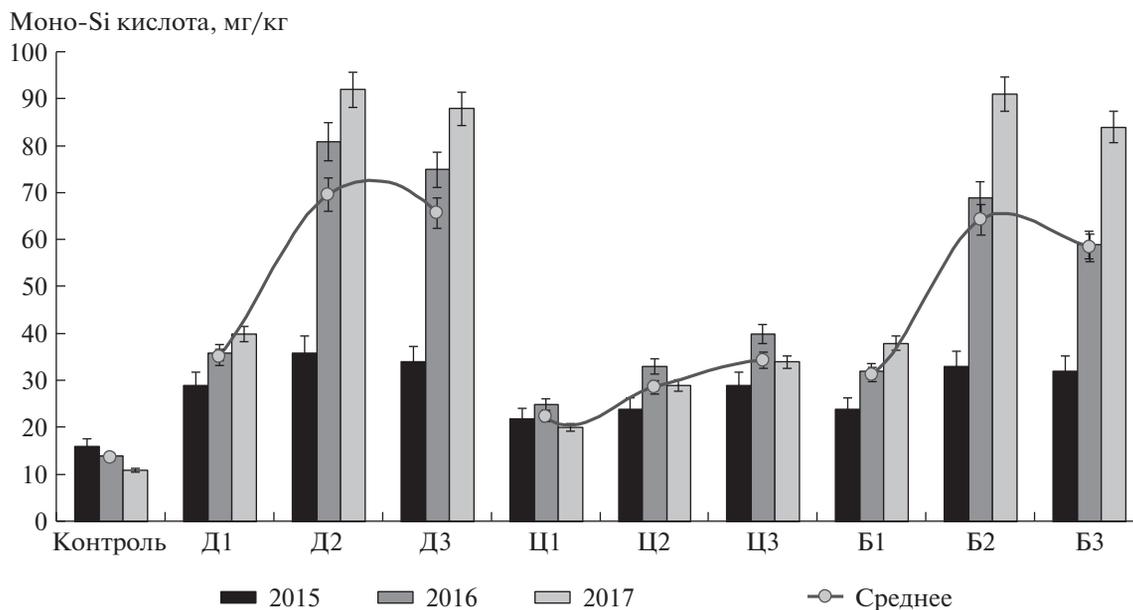


Рис. 2. Динамика содержания мономеров кремниевой кислоты в почве под влиянием кремнистых пород.

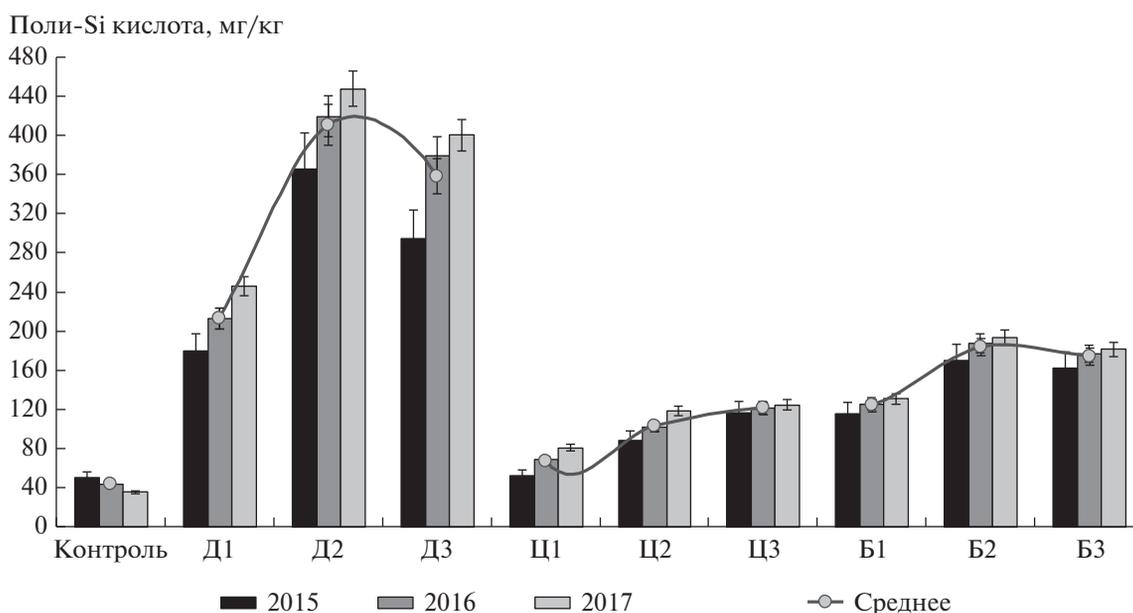


Рис. 3. Динамика содержания полимеров кремниевой кислоты в почве под влиянием кремнистых пород.

В условиях действия диатомовой породы увеличение содержания полимеров кремниевой кислоты достигало 4.9–9.4-кратной степени относительно контроля. Очевидно, что столь высокая мера воздействия диатомовой и бентонитовой пород на содержание мономеров и полимеров кремниевых кислот в почве была обусловлена повышенным содержанием водо- и кислоторастворимых соединений кремнезема в исходных материалах, которые, как известно, в активной степени спо-

собны подвергаться полимеризации в водной системе с образованием высокодисперсных коллоидных растворов и в последствии – распаду полимеров на мономеры при снижении их содержания в жидкой фазе [66, 68].

Динамика содержания кислоторастворимых соединений кремния в почве, переходящих в 0.1 н. HCl, имела положительный вид по годам исследования в вариантах с применением всех изученных пород. В особенности, данная законо-

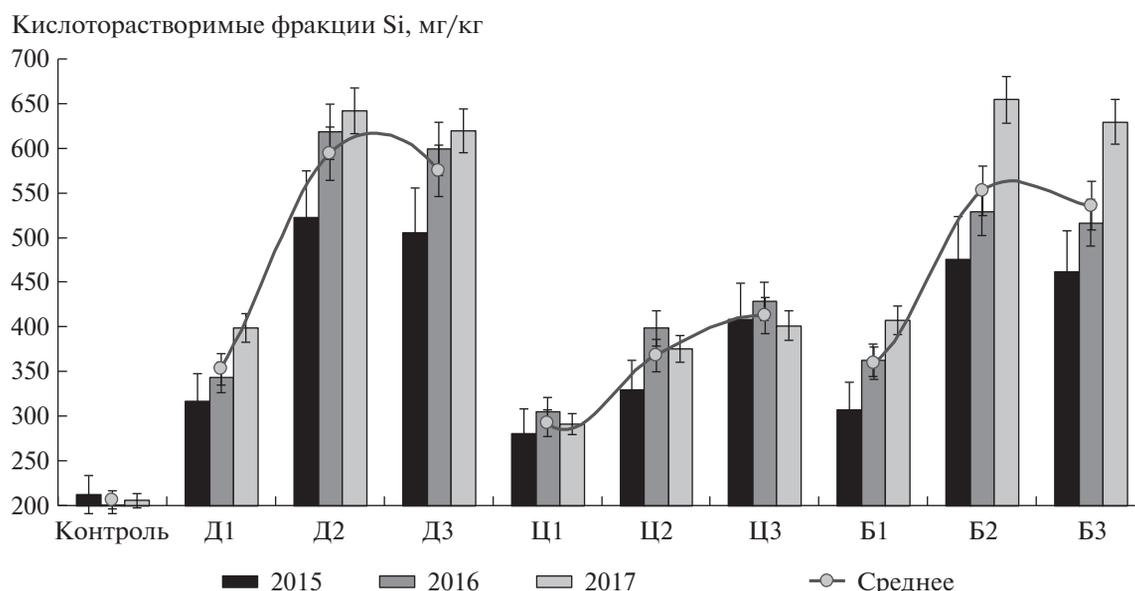


Рис. 4. Динамика концентрации кислоторастворимой фракции кремнезема в почве под влиянием кремнистых пород.

мерность проявлялась в вариантах с бентонитовой глиной (рис. 4). Нужно отметить, что степень увеличения концентрации изученных веществ была примерно одинаковой как в вариантах с бентонитовой глиной, так и в вариантах с диатомовой породой. В частности, при внесении в почву 1-й дозы материалов (3 т/га) содержание кислоторастворимых форм кремнезема повышалось в 1.7 раза, 2-й дозы – соответственно в 2.9 и 2.7 раза, 3-й дозы – в 2.8 и 2.6 раза.

В условиях применения цеолитовой породы концентрация кислоторастворимого кремнезема также увеличивалась, но менее значительно: в зависимости от дозы материала в 1.4–2.0 раза. Вполне вероятно, что положительное влияние изученных материалов на этот показатель почвы было обусловлено высокими концентрациями в их составе аморфного кремнезема [69, 70], который характеризуется неокристаллизованным строением и подвержен активной трансформации во внутрипочвенных условиях, в частности, в условиях почвенного раствора кислых почв.

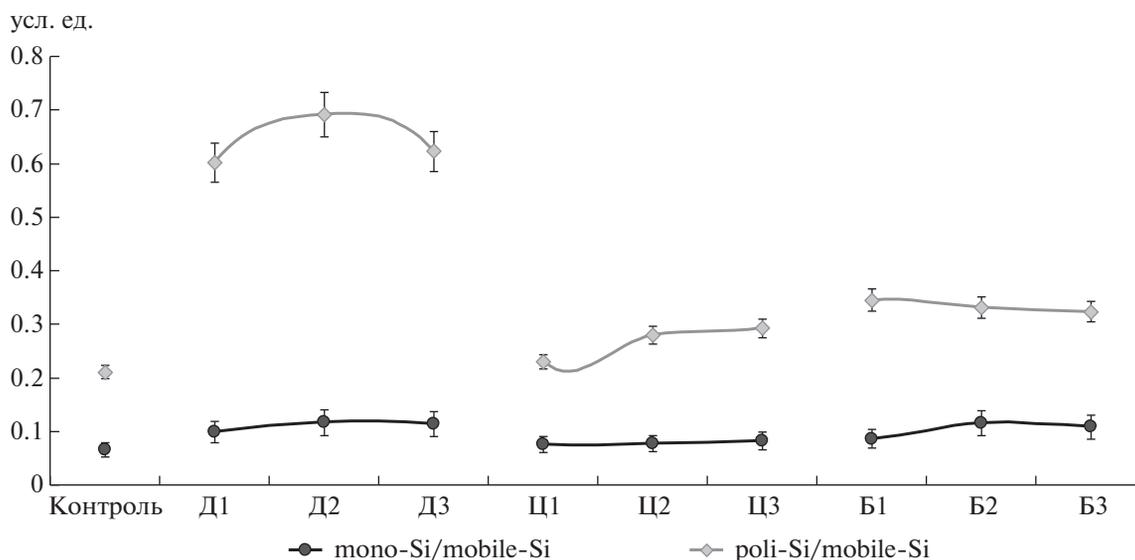
Содержание в почве кислоторастворимых соединений кремния является наиболее информативным показателем, характеризующим состояние подвижности всех кремнийсодержащих веществ в органо-минеральной почвенной матрице [33, 71, 72]. Данная фракция формируется из кремниевых кислот, непрочных аморфных структур и кремнийорганических соединений [73, 74]. В связи с этим массовое соотношение концентрации мономеров и полимеров кремнекислоты к содержанию кислоторастворимых кремниевых

соединений может отражать сопряжение процессов преобразования неокристаллизованного кремнезема в кислотные формы и процессов перехода в почвенный раствор, т.е. показывает массовую долю кислотных веществ в общем запасе подвижного кремния почвы. Таким образом, данные показатели характеризуют уровень потенциальной химической активности и наибольшей подвижности Si в жидкой фазе почв. Рис. 5 демонстрирует данные соотношения, рассчитанные по результатам проведенных полевых экспериментов.

Было установлено, что доля мономеров  $H_4SiO_4$  в кислоторастворимой части почвенного кремнезема увеличивалась в вариантах с применением диатомовой и бентонитовой пород. Причем данное повышение показателя происходило примерно в равной мере в варианте с дозой в 6 т/га – на 76–77%. В вариантах с обработкой почвы цеолитом показатель увеличивался на 18 и 26% при средней и максимальной его дозе соответственно.

Доля полимеров кремнекислоты в кислоторастворимой фракции почвы оказалась значительно увеличена в вариантах с внесением диатомита – более, чем в 2.8–3.3 раза в зависимости от дозы. В условиях действия цеолита и бентонита также наблюдали повышение данного показателя, но не в столь существенной степени – на 33–39% в вариантах с цеолитом и на 57–64% – в вариантах с бентонитовой глиной.

По-видимому, усиленное образование мономеров кремниевой кислоты в почве, обработан-



**Рис. 5.** Изменение соотношения содержания кремниевых кислот (мономеров и полимеров) к общему содержанию кислоторастворимых соединений кремния в почве под действием кремнистых пород (среднее за 3 года).

ной бентонитом и в особенности диатомитом, было обусловлено высокой концентрацией в породах кислоторастворимых соединений, а в случае с диатомовой породой — еще и повышенным содержанием аморфного кремнезема. Этим же, вполне очевидно, была обусловлена и максимальная интенсивность полимеризации мономеров  $H_4SiO_4$  в почве, обработанной диатомитом. В вариантах с бентонитовой глиной процессы оказались аналогичными, но не столь выраженными. В вариантах с цеолитом процессы формирования полимеров кремнекислоты проявлялись самым замедленным образом, что могло быть обусловлено особенностями кристаллической решетки клиноптилолита как основного минерала данной породы [62, 63].

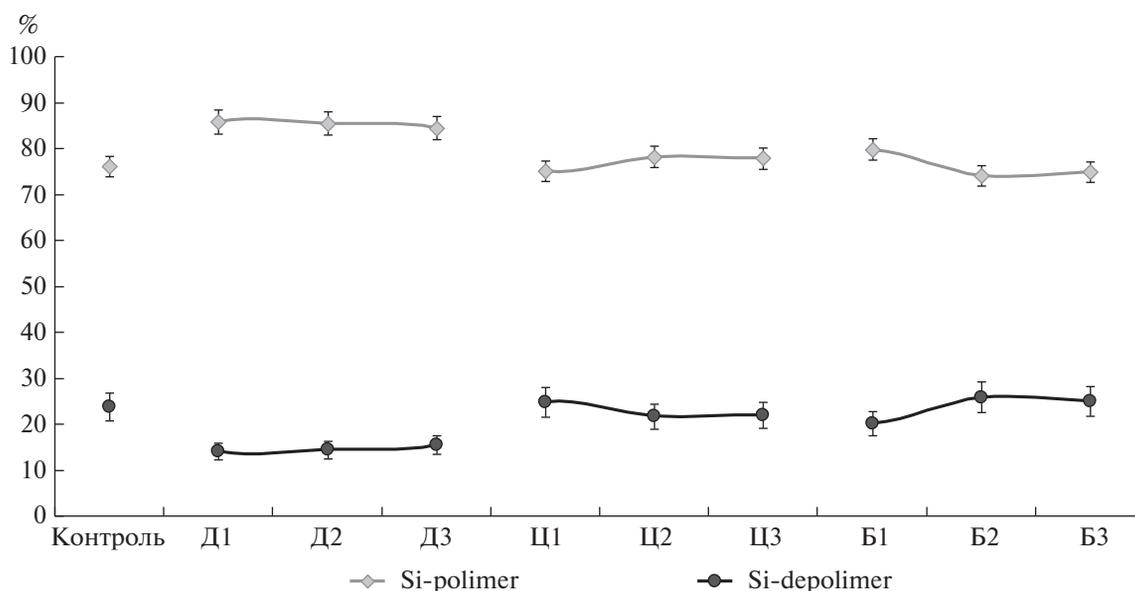
Помимо фиксированного образования коллоидных структур полимеров и мономеров кремниевой кислоты из неокристаллизованного кремнезема, в почвах непрерывно происходит динамическая полимеризация мономеров  $H_4SiO_4$  одновременно с распадом образованных коллоидных полимеров. Динамика данных процессов в системе жидкая фаза—ППК весьма интенсивна во времени, в связи с чем их достаточно сложно отследить количественно. Причиной тому является их существенная зависимость от ряда физико-химических факторов и условий, к которым относят исходное содержание свободной воды в почве, стабильность образованных коллоидных мицелл и наличие физико-химических центров полимеризации, а также кислотно-основная активность почвенного раствора, состав органиче-

ского вещества, специфика образования органо-минеральных комплексов и многие другие особенности почвенной системы [65, 66, 75].

Процессы многочисленного соединения и распада полимерных коллоидов  $H_4SiO_4$  находятся в динамическом равновесии и при непосредственном контакте почвенного раствора и тонкодисперсной фракции органо-минеральной матрицы почвы, при этом концентрацию мономеров и полимеров кремнекислоты аналитически определяют из одной вытяжки [33, 72]. В связи с этим массовое соотношение содержания полимеров (мономеров) кремниевых кислот к суммарному их общему содержанию в почве может отражать сопряжение процессов полимеризации и деполимеризации общей  $H_4SiO_4$ . Таким образом, данные показатели характеризуют уровень химической активности образования и распада полимеров почвенной кремнекислоты. На рис. 6 показаны такие соотношения, вычисленные по данным проведенных полевых экспериментов.

Прежде всего нужно отметить, что в исходной почве, а также в почве в вариантах всех опытов с породами уровень накопления полимеров кремнекислоты был много больше уровня накопления ее мономеров. Иными словами, потенциал полимеризации мономеров  $H_4SiO_4$  в дерново-подзолистой почве был больше, чем активность распада ее полимеров.

Далее было установлено, что полимеризация кремнекислоты в почве существенно усиливалась в вариантах с ее обработкой диатомовой породой



**Рис. 6.** Изменение долевого содержания кремниевых кислот (мономеров и полимеров) в общем содержании кислотных соединений кремния в почве под действием кремнистых пород (среднее за 3 года).

и практически вне зависимости от дозы. В частности, доля полимеров кремниевых кислот в почве увеличивалась на 11–13% относительно контроля. В условиях применения бентонитовой глины потенциал полимеризации кремнекислоты несколько повышался только на фоне с минимальной дозой (на 5%), а в условиях применения цеолита — на фоне со средней и максимальной дозами (на 2–3%).

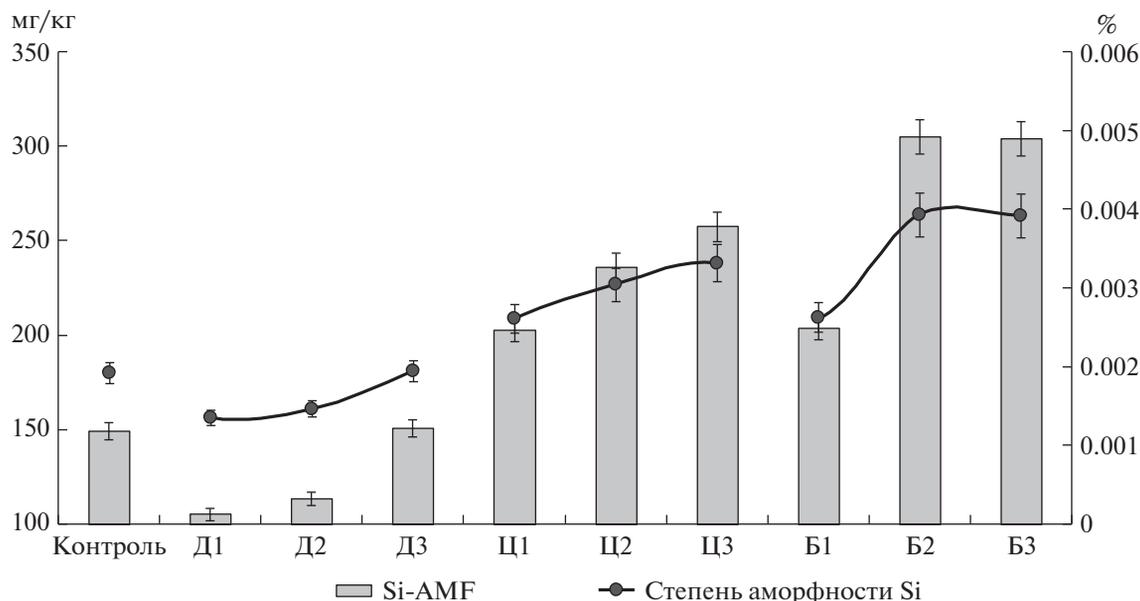
В отличие от активизации образования полимеров кремниевых кислот в почве, обработанной диатомитом, степень их деполимеризации комплексно уменьшалась. В зависимости от дозы материала потенциал распада полимеров на мономеры снижался на 35–41%, причем в вариантах от большей дозы к меньшей. В условиях обработки почвы различными дозами цеолита данный показатель уменьшался (на 7–9%), при применении бентонитовой глины — несколько увеличивался (на 5–9%).

Охарактеризованные взаимосвязи на уровне содержания мономеров и полимеров  $H_4SiO_4$  в дерново-подзолистой почве находятся в тесной зависимости от содержания аморфного кремнезема, являющегося приоритетным источником образующихся коллоидов монокремниевой кислоты, с одной стороны, и физико-химическим центром их полимеризации, с другой стороны [67, 69, 75].

Известно, что кремнийсодержащие вещества почв, находящиеся в неокристаллизованном состоянии, имеют относительно непостоянный со-

став за счет того, что являются промежуточными структурами между истинными кремнистыми минералами и высокомолекулярными полимерами кремниевых кислот [65, 68]. При этом аморфный статус частиц кремнезема в почвах может быть обусловлен природой их “носителя” для внутрипочвенных процессов ионного обмена с почвенным раствором, слабыми амфотерными свойствами, усиленной податливостью к полимеризации и деполимеризации коллоидных частиц кремниевых кислот и других веществ на своей поверхности, взаимодействием с органической составляющей почвенной матрицы, с микробиоценозами и корневыми экссудатами фитоценозов, а также многими другими явлениями [71, 73, 74]. В итоге главным следствием множества процессов, в которых задействованы аморфные и мицеллярные кремниевые структуры, является их участие практически во всех химических и биологических циклах почвенного тела [37, 57, 76].

В связи с этим прямой аналитический учет содержания неокристаллизованных структур кремнезема в почвах будет сопровождаться множеством сложностей и, кроме того, не предоставит исчерпывающего представления об аморфном состоянии всего кремнийсодержащего вещества в почвенной матрице. Но если условно принять на постоянную величину содержание кислоторастворимых фракций кремнезема и вычтуть из него величину содержания мономеров и полимеров кремнекислоты, то полученная разность в определенной мере позволит рассматривать уро-



**Рис. 7.** Изменение содержания рыхло-аморфных соединений кремнезема и степени его аморфности в почве под действием кремнистых пород (среднее за 3 года).

вень содержания аморфных частиц, присутствующих в почвенной органо-минеральной матрице. Исходя из того, что в 0.1 н. HCl переходят в основном неокристаллизованные и слабокристаллизованные структуры высокодисперсного кремнезема, а также собственно мономеры и полимеры кремниевых кислот, указанную форму предлагают именовать “рыхло-аморфной” фракцией кремнезема в почвах.

На рис. 7 показано изменение содержания рассмотренных рыхло-аморфных соединений кремния в почве в зависимости от примененной кремнистой породы и ее дозы. Было определено, что обработка почвы диатомитом не способствовала увеличению содержания в ней рыхло-аморфной фракции кремнезема. Наоборот, в вариантах с минимальной и средней дозами материала показатель снижался соответственно на 29 и 24%, и только в варианте с дозой 12 т/га соответствовал контролю. Необходимо признать, что пониженный уровень концентрации рыхло-аморфного кремнезема в почве, обработанной диатомовой породой, закономерно был обусловлен активизацией процессов образования мономеров кремнекислоты с одновременным усилением полимеризации ее коллоидных мицелл, что подтверждено данными, показанными на рис. 2 и 3. Кроме того, в указанные процессы, очевидно, вовлекались не только аморфные структуры кремния породы, но и неокристаллизованный кремнезем самой почвы, поскольку уровень его содер-

жания в вариантах с применением диатомита оказался меньше, чем в контроле. По причине увеличения дозы породы доля аморфной составляющей в почве повышалась, и вследствие чего ее превращение в кремниевые кислоты замедлялось, и часть неокристаллизованных структур от породы оставалась в неактивном состоянии.

Применение цеолита способствовало повышению концентрации рыхло-аморфных соединений в почве в зависимости от дозы на 36–73%. Применение бентонитовой глины наиболее увеличивало показатель – на 37–104%, также в зависимости от дозы материала.

Степень аморфности почвенного кремнезема, рассчитанная как соотношение содержания рыхло-аморфных соединений кремнезема в почве к валовому содержанию в ней кремния, по сути отражающая долю наиболее химически податливых к превращениям его неокристаллизованных структур, изменялась комплементарно рассмотренному выше показателю. В этом случае важно указать на достаточно низкий уровень степени аморфности Si-содержащего минерального вещества почвы, который исчисляется сотыми долями процента. Данная закономерность подтверждена ранними классическими исследованиями А.А. Роде, который предполагал [76], что если в почвах и содержатся рыхлые структуры кремнезема, то их содержание не должно превышать десятых и сотых долей от содержания валового кремния.

В отношении результатов, полученных в вариантах с обработкой почвы цеолитом, нужно отметить, что сохранение в почве аморфных структур кремнезема должно было быть обусловлено низким потенциалом образования как мономеров, так и полимеров кремнекислоты, а также сдерживанием процессов их полимеризации и распада. При этом данные явления вполне могли быть определены и относительно заниженным содержанием кислоторастворимых соединений кремния в составе самой породы, так и достаточно высокой степенью окристаллизованности составляющих ее минералов. Как следствие, такие особенности существенно замедляют интенсивность физико-химического превращения коллоидов во внутрисочвенных условиях [68, 75].

Наибольшая концентрация рыхло-аморфной фракции кремнезема и высокая степень аморфности минеральных кремниевых частиц в почве, выявленные в вариантах с применением бентонитовой глины, могли быть обусловлены весьма существенным содержанием кислоторастворимых соединений кремния в составе породы, которые и способствовали активному пополнению тонкодисперсной части почвы аморфными микрочастицами кремнезема. При этом повышенная фиксация мономеров  $H_4SiO_4$  в почве (рис. 2), относительно высокий и примерно равновеликий уровень образования мономеров и полимеров кремнекислоты (рис. 5) с одновременно пониженной активностью их полимеризации и распада (рис. 6) очевидно могли быть обусловлены значительным содержанием водорастворимых форм кремния в самой породе. Также данным процессам, очевидно, способствовало тонкодисперсное (глинистое) строение большинства минералов, входящих в состав бентонита.

На основе собственных результатов различных исследований, а также на основе анализа научной литературы по химии кремниевых веществ было определено, что аморфные (неокристаллизованные) формы и ультрамикроскопические частицы кремнистых минералов в совокупности с кремниевыми кислотами формируют в почве сложную систему высокомолекулярных полимеров и кластерных образований, взаимодействие между которыми определяется динамикой концентрации

мономеров  $H_4SiO_4$  при участии коллоидной фазы почвенного раствора и его кислотно-основной активностью, наличием твердой поверхности и степенью ее дисперсности, необходимой для эффекта полимеризации и распада ее многочленов, а также уровнем содержания иных веществ, в том числе ионов  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ , которые активно участвуют в химизме различных соединений кремния в почвах.

Данные процессы очень сложны в абсолютном аналитическом учете и при отслеживании своей динамики, а фиксированное определение в почве содержания мономеров и полимеров кремниевых кислот, а также кислоторастворимых соединений Si не дает полноценного понимания процессов их превращения. В связи с этим, для изучения состояния кремния в почве нами предложено использовать показатели, производные от упомянутых выше характеристик. Данные показатели необходимы в дополнение к критериям В.В. Матыченкова [33, 72], совокупность которых позволит приблизиться к комплексной оценке состояния кремниевых веществ почвы:

1 – потенциал мономерного кремниевого кислотообразования в почве (образования мономеров кремниевых кислот), усл. ед.:

$$M-A_{Si} = \frac{C_{\text{МОНОКРЕМН. КИСЛОТА}}}{C_{\text{КИСЛОТОРАСТВ. КРЕМНИЙ}}} \quad (1)$$

где  $C_{\text{монокремн.кислота}}$  – содержание монокремниевых кислот, мг/кг,  $C_{\text{кислотораств.кремний}}$  – содержание кислоторастворимых соединений кремния, мг/кг;

2 – потенциал полимерного кремниевого кислотообразования в почве (образования полимеров кремниевых кислот), усл. ед.:

$$P-A_{Si} = \frac{C_{\text{ПОЛИКРЕМН. КИСЛОТА}}}{C_{\text{КИСЛОТОРАСТВ. КРЕМНИЙ}}} \quad (2)$$

где  $C_{\text{поликремн.кислота}}$  – концентрация поликремниевых кислот, мг/кг,  $C_{\text{кислотораств.кремний}}$  – концентрация кислоторастворимых соединений кремния, мг/кг;

3 – степень полимеризации кремниевых кислот в почве, %:

$$Pm-V_{Si} = \frac{C_{\text{ПОЛИКРЕМН. КИСЛОТА}}}{C_{\text{МОНОКРЕМН. КИСЛОТА}} + C_{\text{ПОЛИКРЕМН. КИСЛОТА}}} \times 100, \quad (3)$$

где  $C_{\text{поликремн.кислота}}$  – концентрация поликремниевых кислот, мг/кг,  $C_{\text{монокремн.кислота}}$  – концентра-

ция монокремниевых кислот, мг/кг, 100 – коэффициент перевода в %;

4 – степень деполимеризации кремниевых кислот в почве, %:

$$Dm-V_{Si} = \frac{C_{\text{МОНОКРЕМН. КИСЛОТА}}}{C_{\text{МОНОКРЕМН. КИСЛОТА}} + C_{\text{ПОЛИКРЕМН. КИСЛОТА}}} \times 100, \quad (4)$$

где  $C_{\text{поликремн.кислота}}$  – концентрация поликремниевых кислот, мг/кг,  $C_{\text{монокремн.кислота}}$  – концентрация монокремниевых кислот, мг/кг, 100 – коэффициент перевода в %;

5 – содержание рыхло-аморфных соединений кремния в почве, мг/кг:

$$Si_{AMF} = C_{\text{КИСЛОТОРАСТВ. КРЕМНИЙ}} - C_{\text{МОНОКРЕМН. КИСЛОТА}} - C_{\text{ПОЛИКРЕМН. КИСЛОТА}}, \quad (5)$$

где  $C_{\text{кислотораств.кремний}}$  – содержание кислоторастворимых соединений кремния, мг/кг,  $C_{\text{монокремн.кислота}}$  – концентрация монокремниевых кислот, мг/кг,  $C_{\text{поликремн.кислота}}$  – концентрация поликремниевых кислот, мг/кг;

6 – степень аморфности кремниевой части минеральной матрицы в почве, %:

$$AMF-V_{Si} = \frac{Si_{AMF}}{Si_{\text{ВАЛОВ. СОДЕРЖАНИЕ}}} \times 100, \quad (6)$$

где  $Si_{AMF}$  – содержание рыхло-аморфных соединений кремния, мг/кг,  $Si_{\text{валов.содержание}}$  – общее (валовое) содержание кремния в почве, %, 100000 – коэффициент пересчета мг/кг в %, 100 – коэффициент перевода в %.

На примере изучения дерново-подзолистых легкосуглинистых почв в агрофитоценозах почвенного покрова Нижегородской обл. при применении кремнийсодержащих пород как комплексных мелиорантов предлагаемые показатели, рассчитанные в данном исследовании, характеризовали взаимосвязь между процессами образования из аморфного кремнезема полимеров и мономеров кремнекислоты, количественно определили активность распада ее полимеров и полимеризации ее мономеров, а также описали интенсивность аккумуляции рыхло-аморфных структур  $SiO_2$  в почве и выделили степень аморфности (неокристаллизованности) ее кремнийсодержащей части.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в микрополевых опытах было установлено положительное действие цеолита и бентонитовой глины на противокислотную сторону буферности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы с существенным сдвигом ин-

декса  $H^+/OH^-$ -равновесия соответственно на 158–178 и 11–20% в зависимости от дозы материалов. Влияние диатомовой породы распространялось на противощелочное плечо почвенной буферности, снижая индекс  $H^+/OH^-$ -равновесия на 24–39%.

Применение диатомита и глины способствовало увеличению концентрации мономеров кремнекислоты в почве более чем в 5 и 4 раз соответственно, применение цеолита – более чем в 2 раза. Содержание полимеров кремниевых кислот в почве повышалось соответственно до 3-х и 4-х раз при применении цеолитовой и бентонитовой пород. Внесение в почву диатомита увеличивало концентрацию полимеров  $H_4SiO_4$  в 5–10 раз также в зависимости от дозы материала. Содержание кислоторастворимой фракции кремниевых соединений в почве повышалось в 1.4–2.8 раза при применении различных доз изученных пород.

Количественное сопряжение коллоидов кремниевых кислот в виде мономеров и полимеров с подвижной частью кремнезема дерново-подзолистой почвы, активизация процессов полимеризации коллоидов  $H_4SiO_4$  и особенности распада ее полимеров на мономеры, а также неодинаковое содержание рыхло-аморфной части кремнезема и степень аморфности ее кремнийсодержащих минеральных структур в комплексе позволили анализировать состояние и направление трансформации подвижных соединений кремния в почвах на основе показателей потенциала образования мономеров–полимеров кремнекислоты в почве ( $M-A_{Si}$  и  $P-A_{Si}$ ), степени полимеризации ее кремниевых кислот и распада их мицеллярных полимеров ( $Pm-V_{Si}$  и  $Dm-V_{Si}$ ), а также общего состояния аморфности Si-содержащей минеральной фазы почвы и содержания в ней рыхло-аморфных структур кремнезема ( $Si_{AMF}$  и  $AMF-V_{Si}$ ).

На примере изучения влияния кремниевых материалов на трансформацию различных кремниевых соединений в дерново-подзолистой почве отмечено, что в зависимости от качественного состава и дозы кремнистой породы показатель  $M-A_{Si}$  увеличивался на 30–80%, а показатель  $P-A_{Si}$  находился в диапазоне повышения от 0.3 до 3.0 и более раз. Процессы полимеризации кремнекислоты и распада ее полимеров на мономеры, выра-

жаемые соответственно показателями  $Pm-V_{Si}$  и  $Dm-V_{Si}$ , также активно увеличивались на фоне взаимодействия почвы с породами, мера изменения которых выражалась порядком 10–40% отклонения относительно контроля. Изменение общего содержания рыхло-аморфной фракции кремнезема в почве, выраженное показателем  $Si_{AMF}$ , определялось составом каждой кремнистой породы, использованной в качестве мелиоранта. Если при применении диатомита показатель уменьшался почти на 30%, то при использовании цеолита и бентонитовой глины происходило его увеличение на 30–100% в зависимости от дозы. Аналогичным образом изменялся показатель степени аморфности кремнийсодержащей части почвенного вещества ( $AMF-V_{Si}$ ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурашкина М.А., Копцик Г.Н., Саузард Р.Дж., Чижикова Н.П. Соединения железа, алюминия, кремния и марганца в почвах лесных экосистем таежной зоны // Почвоведение. 2004. № 1. С. 40–49.
2. Соколова Т.А., Толпешта И.И., Лысак Л.В., Завгородняя Ю.А., Чалова Т.С., Карпунин М.М., Изосимова Ю.Г. Биологические характеристики и содержание подвижных соединений Fe, Al и Si в ризосфере ели в подзолистой почве // Почвоведение. 2018. № 11. С. 1330–1339.
3. Соколова Т.А., Толпешта И.И., Изосимова Ю.Г. Подвижные соединения Al и Si в палево-подзолистых почвах Центрального лесного заповедника: содержание, распределение по профилю и гранулометрическим фракциям // Почвоведение. 2017. № 6. С. 672–679.
4. Соколова Т.А., Толпешта И.И., Максимова Ю.Г. Соединения Al, Fe и Si в вытяжках Тамма и Мера-Джексона в перегнойно-торфянисто-подзолисто-глеевой почве: содержание, запасы, распределение по профилю и гранулометрическим фракциям // Почвоведение. 2014. № 5. С. 537–545.
5. Harley A.D., Gilkes R.J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview // Nutr. Cycl. Agroecosyst. 2000. V. 56 (1). P. 11–36.
6. Heather A.C., Carole C.P. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies // Ann. Bot. 2007. V. 100 (7). P. 1383–1389.
7. Казаков Н.В., Лящевская М.С., Гребенникова Т.А. Условия формирования почвы на диатомитовых отложениях (Южная Камчатка) // Вестн. КраУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2 (22). С. 168–177.
8. Соколова Т.А., Толпешта И.И., Топунова И.В. Изменение бентонита в торфянисто-подзолисто-глеевой почве в условиях модельного полевого опыта // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2013. № 3. С. 8–18.
9. Соколова Т.А. Процессы разрушения кварца, аморфных минералов кремнезема и полевых шпатов в модельных опытах и в почвах: возможные механизмы, скорость, диагностика (анализ литературы) // Почвоведение. 2013. № 1. С. 98–112.
10. Соколова Т.А. Роль почвенной биоты в процессах выветривания минералов (обзор литературы) // Почвоведение. 2011. № 1. С. 64–81.
11. Толпешта И.И., Соколова Т.А., Изосимова Ю.Г. Краткосрочные изменения биотита различных гранулометрических фракций в подзолистой почве в полевом модельном эксперименте // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1211–1224.
12. Чижикова Н.П., Омарова Е.О., Зенова Г.М., Манучаров А.С. Взаимодействие циано-актиномицетных сообществ с глинистыми минералами // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2008. Т. 61. С. 50–59.
13. Чижикова Н.П., Харитоновна Г.В., Матюшкина Л.А., Коновалова Н.С., Стенина А.С. Дифференциация слоистых силикатов и биогенного кремнезема в луговых подбелах Среднеамурской низменности // Почвоведение. 2013. № 8. С. 980–992.
14. Чижикова Н.П., Прокашев А.М. Минералогический состав тонкодисперсных фракций (<1, 1–5, 5–10 мкм) агродерново-подзолистых почв со сложным органопротилем в Вятском Прикамье // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2016. Вып. 84. С. 10–28.
15. Чижикова Н.П., Гамзиков Г.П., Четченко Е.С. Особенности профильного распределения и кристаллохимии слоистых силикатов в почвах лесостепи Предбайкалья // Почвоведение. 2018. № 1. С. 93–110.
16. Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A. Influence of plant association on the silicon cycle in the soil–plant system // Appl. Ecol. Environ. Resh. 2012. V. 10 (4). P. 547–560.
17. Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties // Silicon in Agriculture. Studies in Plant Science. Amsterdam, 2001. P. 209–220.
18. Соколова Т.А., Толпешта И.И., Русакова Е.С. Вклад отдельных реакций в формирование кислотнo-основной буферности почв пойм ручьев (Центр.-лесной гос. заповедник) // Почвоведение. 2016. № 4. С. 434–447.
19. Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах. Тула: Гриф и К, 2005. 336 с.
20. Соколова Т.А., Толпешта И.И., Трофимов С.Я. Почвенная кислотность. Кислотнo-основная буферность почв. Соединения алюминия в твердой фазе почвы и в почвенном растворе. Тула: Гриф и К, 2012. 124 с.
21. Соколова Т.А., Мотузова Г.В., Малинина М.С., Обуховская Т.Д. Химические основы буферности почв. М.: Ид-во МГУ, 1991. 106 с.
22. Трофимов С.Я., Горшкова Е.И., Салгагарова И.А. Ионный обмен и адсорбция в почвах. М.: Изд-во КДУ, 2008. 98 с.
23. Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A. Silicon fertilizers: agricultural and environmental impacts // Fertilizers: components, uses in agriculture and environmental impacts. N.Y., 2014. P. 182–198.

24. *Tubana B.S., Babu T., Datnoff L.E.* A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives // *Soil Sci.* 2016. V. 181 (9/10). P. 393–411.
25. *Ересько М.* Кислотно-основная буферность почв как индикатор устойчивости экосистемы // *Земля Беларуси.* 2014. № 4. С. 36–44.
26. *Максимова Ю.Г., Маряхина Н.Н., Толпешта И.И., Соколова Т.А.* Кислотно-основная буферность подзолистых почв и ее изменение под влиянием обработок реактивами Мера–Джексона и Тамма // *Почвоведение.* 2010. № 10. С. 1208–1220.
27. *Мотузова Г.В.* Природа буферности почв к внешним химическим воздействиям // *Почвоведение.* 1994. № 4. С. 46–52.
28. *Надточий П.П., Мыслыва Т.Н.* Эталонные величины кислотно-основной буферности дерново-подзолистых почв для фонового мониторинга // *Агрохимия.* 2014. № 3. С. 83–89.
29. *Назырова Ф.И.* Влияние удобрений на буферные свойства чернозема типичного карбонатного // *Агрохимия.* 2002. № 2. С. 5–12.
30. *Ронжина Т.В., Кречетов П.П.* Изменение кислотно-основного состояния почв в результате реализации механизмов геохимической буферности при импактном воздействии минерализованных вод на дерново-подзолистые почвы // *Фундамент. исслед-я.* 2013. № 10 (6). С. 1293–1296.
31. *Русакова Е.С., Ишкова И.В., Толпешта И.И., Соколова Т.А.* Кислотно-основная буферность почв транзитных и транзитно-аккумулятивных позиций ненарушенных ландшафтов Южной тайги // *Почвоведение.* 2012. № 5. С. 562–573.
32. *Lehmann J., Kleber M.* The contentious nature of soil organic matter // *Nature.* 2015. V. 528 (7580). P. 60–68.
33. *Матыченков И.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В.* Подвижные кремниевые соединения в системе почва–растение и методы их определения // *Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение.* 2016. № 3. С. 37–46.
34. *Самсонова Н.Е.* Кремний в растительных и животных организмах // *Агрохимия.* 2019. № 1. С. 86–96.
35. *Чао Л., Кси Б., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П.* Влияние недостатка увлажнения и повышенного содержания соли на кремниевое состояние почв европейской части России и центрального Китая // *Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение.* 2018. № 3. С. 16–22.
36. *Ma J.F., Yataji N.* Silicon uptake and accumulation in higher plants // *Trend. Plant Sci.* 2006. V. 11 (8). P. 392–397.
37. *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.
38. *Дистанов У.Г.* Кремнистые породы СССР. Казань: Татар. кн. изд-во, 1976. 412 с.
39. *Куликова А.Х.* Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: Ульяновск. ГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. 176 с.
40. *Самсонова Н.Е.* Кремний в почвах и растениях // *Агрохимия.* 2005. № 6. С. 76–86.
41. *Belanger R.R.* The role silicon in plant–pathogen interaction: toward universal model // III Silicon in Agriculture Conference. Uberlandia: Universodate Federal de Uberlandia, 2005. P. 34–40.
42. *Hodson M.J., White P.J., Mead A., Broadley M.R.* Phylogenetic variation in the silicon (Si) composition of plants // *Ann. Bot.* 2005. V. 96. P. 1027–1046.
43. *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.
44. *Пискунов А.С.* Методы агрохимических исследований. М.: КолосС, 2004. 312 с.
45. *Полякова Н.В., Володина Е.Н., Платонычева Ю.Н.* Рабочая классификация почв Нижегородской области. Н. Новгород: НГСХА, 2017. 64 с.
46. *Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
47. *Кусова Н.В., Степанова Л.П.* Кипящие камни (цеолиты). Орел: ОрелГАУ, 2005. 18 с.
48. *Мостальгина Л.В., Елизарова С.Н., Костин А.В.* Бентонитовые глины Зауралья: экология и здоровье человека. Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. 148 с.
49. *Мамонтов В.Г., Гладков А.А.* Практикум по химии почв. М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2015. 272 с.
50. *Надточий П.П.* Определение кислотно-основной буферности почв // *Почвоведение.* 1993. № 4. С. 34–39.
51. *Надточий П.П.* Опыт составления картограммы кислотно-основной буферности почв // *Агрохимия.* 1996. № 6. С. 20–26.
52. *Практикум по агрохимии /* Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
53. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2011. 352 с.
54. *Рабо Дж.* Химия цеолитов и катализ на цеолитах. М.: Мир, 1980. Т. 1. 502 с.
55. *Евтюхов С.А., Березюк В.Г.* Изучение сорбционных свойств природных алюмосиликатов (глина, суглинок, супесь, цеолит) // *Журнал прикл. химии.* 2003. Т. 76. Вып. 9. С. 1454–1457.
56. *Почвообразовательные процессы /* Под ред. М.С. Симаковой, В.Д. Тонконового. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. 510 с.
57. *Элементарные почвообразовательные процессы: опыт концептуального анализа, характеристика, систематика /* Под ред. Н.А. Караваевой, С.В. Зонна. М.: Наука, 1992. 184 с.
58. *Бойцова Л.В.* Изменение физико-химических свойств в профиле дерново-подзолистой почвы различного сельскохозяйственного использования // *Агрофизика.* 2015. № 2. С. 9–15.
59. *Иванов А.Л., Воробьев В.А., Иванова Ж.А.* Современные деградационные процессы в хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах // *Пробл. агрохим. и экол.* 2015. № 3. С. 15–19.

60. *Иванов А.И.* Некоторые закономерности изменения кислотно-основного состояния дерново-подзолистых легкосуглинистых почв при сельскохозяйственном использовании // *Агрохимия*. 2000. № 10. С. 28–33.
61. *Кузьменко Н.Н.* Влияние известкования на показатели плодородия дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // *Агрохимия*. 2019. № 10. С. 35–38.
62. *Брек Д.* Цеолитные молекулярные сита. М.: Мир, 1976. 781 с.
63. *Кольцова Т.Н.* Анализ структур цеолитов с общей формулой  $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot n\text{H}_2\text{O}$  // *Неорг. мат.-лы*. 2007. Т. 43. № 2. С. 218–226.
64. *Акимбаева А.М., Ергожин Е.Е.* Оценка структурных и сорбционных характеристик активированного бентонита // *Коллоид. журн.* 2007. Т. 69. № 4. С. 437–443.
65. *Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П.* Термодинамика силикатов. М.: Стройиздат, 1986. 408 с.
66. *Мышляева Л.В., Краснощекоев В.В.* Аналитическая химия кремния. М.: Изд-во Наука, 1972. 212 с.
67. *Шабанова Н.А.* Коллоидная химия нанодисперсного кремнезема. М.: Лаборатория знаний, 2020. 331 с.
68. *Шабанова Н.А., Белова И.А., Маркелова М.Н.* Реакционная способность и эволюция агрегативной устойчивости коллоидного кремнезема // *Физика и химия стекла*. 2020. Т. 46. № 1. С. 90–98.
69. *Зулумян Н.О., Исаакян А.Р., Пирумян П.А., Бегларян А.А.* Структурные особенности аморфных диоксидов кремния // *Журн. физ. химии*. 2010. Т. 84. № 4. С. 791–793.
70. *Мартиросян Г.Г., Манукян А.Г., Овсепян Э.Б., Костанян К.А.* Исследование адсорбционно-структурных свойств природных и обработанных диатомитов // *Журн. прикл. химии*. 2003. Т. 76. Вып. 4. С. 551–555.
71. *Константинов А.О., Смирнов П.В., Гаврилов Д.А., Лойко С.В., Новоселов А.А.* Некоторые аспекты почвообразования на биогенных кремниевых породах Зауралья // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2019. Вып. 96. С. 64–85.
72. *Матыченков В.В.* Градация почв по дефициту доступного растениям кремния // *Агрохимия*. 2007. № 7. С. 22–27.
73. *Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Аммосова Я.М.* Аморфный кремнезем опал-кристобалитовых пород как возобновляемое сырье для синтеза кремнийорганических соединений и силикатов. Ч. 4. Влияние кремниевых удобрений на растения и почву // *Бутлеров. чтения*. 2015. Т. 43. № 9. С. 17–25.
74. *Офицеров Е.Н., Рябов Г.К., Убаськина Ю.А., Климовский А.Б., Фетюхина Е.Г.* Кремний и гуминовые кислоты: моделирование взаимодействий в почве // *Изв. Самар. НЦ РАН*. 2011. Т. 13. № 4 (2). С. 550–557.
75. *Айлер Р.* Химия кремнезема. М.: Мир, 1982. В 2-х ч. Ч. 1, Ч. 2. 1128 с.
76. *Роде А.А.* Избр. тр. Т. 2. Подзолообразовательный процесс. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2008. 480 с.

## Acid-Base Buffering Assessment and Directions of Silicon Compound Transformation in Sod-Podzolic Soil when Used Various Siliceous Rocks

A. V. Kozlov<sup>a,#</sup> and A. H. Kulikova<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Russian State Agrarian University—Moscow Timiryazev Agricultural Academy  
Timiryazevskaya ul. 49, Moscow 127434, Russia

<sup>b</sup>Stolypin Ulyanovsk State Agrarian University  
bul. Novyi Venets 1, Ulyanovsk 432017, Russia

<sup>#</sup>E-mail: a.kozlov@rgau-msha.ru

The variability of the main indicators of acid-base buffering of sod-podzolic light-loamy soil was investigated, and the dynamics of the content of monomers and polymers of silicic acid and acid-soluble silica compounds in the soil under conditions of reclamation doses of various siliceous rocks (diatomite, zeolite and bentonite clay 3, 6, 12 t/ha) was described. Zeolite rock and bentonite had a positive effect on the anti-acid buffering ability of the soil, shifting the  $\text{H}^+/\text{OH}^-$ -equilibrium of the system by more than 160 and 20, respectively, depending on the applied dose of the material. The effect of diatomite was manifested in the anti-alkaline region of soil buffering, due to which the  $\text{H}^+/\text{OH}^-$ -equilibrium index decreased by almost 40%. Against the background of the use of diatomite and bentonite clay, the content of silicic acid monomers in the soil increased by more than 5 and 4 times, respectively, against the background of the use of zeolite — by more than 2 times. The content of silicic acid polymers in the soil increased up to 3 and 4 times with the use of zeolite and bentonite rocks, respectively. At the same time, the introduction of diatomite into the soil contributed to an increase in the content of  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  polymers by 5–10 times, depending on the dose of the material. The content of the acid-soluble fraction of silicon compounds in the soil increased by 1.4–2.8 times against the background of different doses of the studied rocks and, in general, had a different dependence depending on the composition of each of them. Based on the revealed irregularities in the content and dynamics of mobile silicon compounds in the soil (monomers and polymers of silicic acids, acid-soluble silica fractions), the characteristic is given and the value of the first proposed indicators describing their dynamic state and directions

of transformation – the potential for the formation of monomers ( $M-A_{Si}$ ) and polymers ( $P-A_{Si}$ ) is disclosed.  $H_4SiO_4$ , the degree of polymerization ( $Pm-V_{Si}$ ) and depolymerization ( $Dm-V_{Si}$ ) of silicic acid, the total content of the loose-amorphous silica fraction ( $Si-AMF$ ) and the degree of amorphousness of the Si-containing mineral phase of the soil ( $AMF-V_{Si}$ ). The study of the influence of silicon materials in conditions of sod-podzolic soil revealed that, depending on the qualitative composition and dose of silicon rock, the  $M-A_{Si}$  index can increase by 30–80%, and the  $P-A_{Si}$  index can be in the range of increase from 0.3 to 3.0 or more times. The processes of polymerization of silicic acid and the decomposition of its polymers into monomers, expressed respectively by  $Pm-V_{Si}$  and  $Dm-V_{Si}$ , can also actively increase against the background of the interaction of soil with rocks, the measure of change of which is expressed in the order of 10–40% deviation relative to the control. The total content of loose-amorphous silica fraction in the soil, expressed by the  $Si_{AMF}$  index, can be determined by the composition of each siliceous rock used as a meliorant. If, when using diatomite, the indicator can decrease by almost 30%, then when using zeolite and bentonite clay, it can increase by 30–100%, depending on the dose. Similarly, the indicator of the degree of amorphousness of the silicon-containing part of the soil substance ( $AMF-V_{Si}$ ) can also change.

*Keywords:* siliceous rocks, sod-podzolic soil, acid-base buffering, monomers and polymers of silicic acid, acid-soluble silica fraction, indicators of transformation of silicon compounds in the soil.

УДК 631.417.1:631.51.01(470.40/.43)

## ЗАПАСЫ ПОЧВЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПРИ НУЛЕВОЙ ОБРАБОТКЕ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ<sup>1</sup>

© 2023 г. К. В. Ивашенко<sup>1,\*</sup>, С. В. Сушко<sup>1,2</sup>, Ю. А. Дворников<sup>1,3</sup>, Л. А. Мирный<sup>1</sup>, Л. В. Орлова<sup>4,5</sup>, Н. Д. Ананьева<sup>1</sup>, С. В. Непримерова<sup>2</sup>, А. В. Юдина<sup>6</sup>, Н. М. Троц<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН  
ул. Институтская, 2, стр. 2, Пушкино Московской обл. 142290, Россия

<sup>2</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт  
Гражданский просп., 14, Санкт-Петербург 195220, Россия

<sup>3</sup>Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва 117198, Россия

<sup>4</sup>ООО “Орловка–АИЦ”  
ул. Центральная, 42е, Самарская обл., с. Старый Аманак 446472 Россия

<sup>5</sup>Национальное движение берегающего земледелия  
ул. Куйбышева, 88, Самара 443099, Россия

<sup>6</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева  
Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва 119017, Россия

<sup>7</sup>Самарский государственный аграрный университет  
ул. Учебная, 2, Самарская обл., г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский 446442, Россия

\*E-mail: ivashchenko.kv@gmail.com

Поступила в редакцию 24.07.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

Внедрение ресурсосберегающих технологий в практику земледелия является одним из подходов к сохранению плодородия почв и увеличению запасов органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ). Одной из таких технологий является нулевая обработка почвы, которую активно применяют во всем мире с середины XX века. Однако сведений об эффективности применения данной технологии для накопления и сохранения  $C_{\text{орг}}$  в агропочвах нашей страны все еще недостаточно. В работе проведена оценка скорости накопления  $C_{\text{орг}}$  агрочерноземами при нулевой обработке почвы в условиях Среднего Поволжья. На территории агрохозяйств (Похвистневский р-н Самарской обл.) были выбраны 2 сельскохозяйственных поля с 5- и 8-летней нулевой обработкой почвы (88 и 161 га соответственно) и поле с безотвальной вспашкой (42 га). В каждом поле выбрано по 30 точек исследования, из которых отобраны почвенные образцы верхнего (0–10 см) и нижнего (10–30 см) слоев. В работе приведены основные физико-химические показатели почвы и рассчитаны запасы  $C_{\text{орг}}$ . Показано значимое увеличение запасов  $C_{\text{орг}}$  в верхнем слое почвы при 5- и 8-летней нулевой обработке (в среднем на 0.57 и 0.45 кг/м<sup>2</sup>) по сравнению с таковыми при вспашке, однако для нижнего слоя значимых различий не выявлено. Суммарные запасы  $C_{\text{орг}}$  для слоя 0–30-см почвы при нулевой обработке возросли на 0.61 и 0.34 кг/м<sup>2</sup> относительно таковых при вспашке. Следовательно, в результате применения нулевой обработки скорость накопления запасов  $C_{\text{орг}}$  в агрочерноземах Среднего Поволжья может достигать 1.22 и 0.43 т С/га в год, что в 1.3–41 раз больше рекомендуемой программой “4 промилле” для сельскохозяйственных земель нашей страны (от 0.03 до 0.33 т С/га в год).

**Ключевые слова:** прямой посев, программа “4 промилле”, секвестрация углерода, пространственное распределение запасов углерода, почва пашни.

**DOI:** 10.31857/S0002188123110066, **EDN:** VGFOLD

### ВВЕДЕНИЕ

Почва влияет на газовый состав атмосферы через продукцию климатически активных газов [1]. В то же время способность почвы сохранять и на-

капливать органический углерод ( $C_{\text{орг}}$ ) может быть полезным инструментом в сокращении выбросов углеродсодержащих парниковых газов в результате антропогенной деятельности [2]. Отмечают, что высокий потенциал в накоплении  $C_{\text{орг}}$  характерен для агропочв. Подсчитано, что сельскохозяйственные почвы мира могут секве-

<sup>1</sup> Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122111000095-8).

**Таблица 1.** Общая характеристика исследованных сельскохозяйственных полей

Обработка	Площадь, га	В год отбора образцов (2022 г.)			Предшествующая культура	
		Удобрения, кг/га	Урожайность, ц/га	Культура	2021	2020
Вспашка	42	Без удобрений	13.0	Пшеница	Подсолнечник	Пшеница
Нулевая (5 лет)	88	N34.4	19.2	Пшеница	Подсолнечник	Пшеница
Нулевая (8 лет)	161	N20.6	10.8	Соя	Пшеница	Подсолнечник

стрировать в 1-метровом слое 2–3 Гт С/год, что позволит компенсировать 20–35% выбросов парниковых газов от антропогенных источников [2]. Добиться таких эффективных результатов предлагает международная программа “почвенные 4 промилле для продовольственной безопасности и климата”, предложенная в 2015 г. на конференции “COP21 – UN Climate Change Conference” и нацеленная на увеличение глобальных запасов  $C_{орг}$  почвы на 4 промилле в год, что в определенной степени будет компенсировать глобальные выбросы парниковых газов из антропогенных источников. Ресурсосберегающее земледелие, в частности нулевая обработка почвы (“прямой посев”, no-till), считается эффективной технологией для повышения плодородия и запаса  $C_{орг}$ . Скорость накопления  $C_{орг}$  при нулевой обработке почвы во Франции, Великобритании, Китае и США может составлять от 0.16 до 0.40 т С/га в год в зависимости от почвенно-климатических условий и периода наблюдений [3–6]. В России площадь сельскохозяйственных земель с нулевой обработкой почвы занимает лишь 1–2% от их общей площади, составляющей 121.6 млн га [7, 8]. В настоящее время в России недостаточно информации о влиянии технологий нулевой обработки почвы на урожайность культур, биологические и химические свойства почв, в том числе на запасы  $C_{орг}$ , что в аспекте климатических изменений весьма актуально [8]. Кроме того, следует отметить отсутствие системного подхода для такой оценки агроэкосистем и достаточно отлаженного взаимодействия между учеными, практиками и управляющими агрохозяйств. Более того, отсутствуют данные количественных показателей эффективности применения различных агротехнологий для накопления запасов почвенного  $C_{орг}$ . В этой связи инициатива “4 промилле”, к положениям которой некоторые исследователи относятся с определенной долей скепсиса [9], может быть рекомендательным ориентиром для оценки углерод-секвестрирующего потенциала технологий ресурсосберегающего земледелия. Следует отметить также, что подходы к расчетам скорости

накопления  $C_{орг}$  на единицу площади для реализации программы “4 промилле” различаются [2, 10, 11]. Например, если запасы  $C_{орг}$  в слое 0–30 см пахотных почв России составляют в среднем 82 т С/га [11], то скорость его накопления с учетом выполнения программы “4 промилле” должна достигать 0.33 т С/га в год. Другие исследователи учитывают потери  $C_{орг}$  почвами пашен за всю историю землепользования в нашей стране (2.6 и 3.6 Гт С для слоев 0–30 и 0–100 см соответственно), откуда скорость его накопления оценивают в 0.03–0.16 т С/га в год для достижения целей “4 промилле” [2, 10]. В рамках сотрудничества с представителями агрохозяйства “Орловка–АИЦ” (Самарская обл.), практикующими современные ресурсосберегающие технологии с 2012 г., оценили скорость накопления почвенных запасов  $C_{орг}$  и их пространственную вариацию при нулевой обработке разной продолжительности применения. Полагаем, что для условий лесостепной зоны Среднего Поволжья применение технологии “прямого посева” значительно увеличит почвенные запасы  $C_{орг}$ , скорость накопления которых будет сопоставима с рекомендуемой международной программой “4 промилле”.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были агрочерноземы типичные и выщелоченные (Naplic Hortic Chernozems и Luvic Hortic Chernozems) с нулевой обработкой и безотвальной вспашкой (глубина 25 см), расположенные в автоморфном ландшафте в Похвистневском р-не Самарской обл. (54.181° с.ш., 50.322° в.д., Среднее Поволжье, лесостепная зона). Сельскохозяйственные поля с 5- и 8-летней нулевой обработкой почвы располагались на территории агрохозяйства ООО “Орловка–АИЦ”, рядом с ними было выбрано поле с безотвальной вспашкой (табл. 1, рис. 1). В год исследования, (2022) на полях возделывали пшеницу (вспашка, нулевая обработка – 5 лет) и сою (нулевая обработка – 8 лет).



Рис. 1. Исследованные сельскохозяйственные поля (Самарская обл., Похвистневский р-н).

Выбранные сельскохозяйственные поля характеризовались общей историей землепользования с 1929 г. Подстилающие породы представлены преимущественно бурими глинами, редко встречаются глинистый и известняковый мергели. Регион исследования характеризуется умеренно континентальным климатом со среднегодовой температурой воздуха  $4.7^{\circ}\text{C}$  и количеством осадков 459 мм (по данным за 1991–2020 гг. с ближайшей метеостанции “Бугуруслан”,  $53.62^{\circ}$  с.ш.,  $52.43^{\circ}$  в.д.).

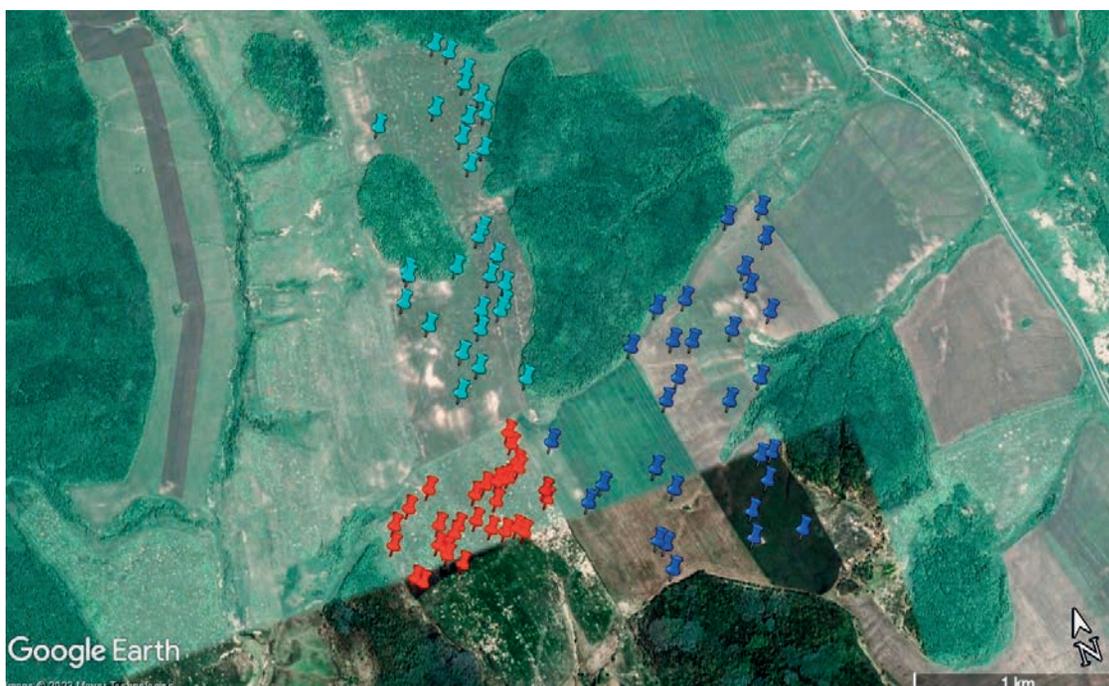
*Дизайн исследования.* Рекогносцировка территории исследования выявила неоднородность морфометрических характеристик рельефа местности. В связи с этим проанализировали пространственное распределение основных морфометрических показателей (абсолютной высоты, крутизны и экспозиции склонов) для выбора точек исследования в каждом поле. В пределах каждого поля было распределено по 30 точек опробования (рис. 2). Расположение точек исследования было выбрано случайно, учитывая весь спектр величин основных морфометрических параметров, т.е. статистическое равенство общей гистограммы и гистограммы выборки – стратифицированная случайная выборка [12]. В качестве исходной информации о рельефе изученной территории использовали цифровую модель рельефа (ЦМР) Shuttle radar topographic mission (SRTM) с пространственным разрешением 30 м.

В каждой точке опробования в октябре 2022 г. были выполнены почвенные прикопки шириной 30 см и глубиной 40 см, из которых были отобраны образцы почвы (слои 0–10 и 10–30 см). Дополнительно металлическим цилиндром (объемом  $88\text{ см}^3$ ) было отобрано по 2 образца из каждого слоя (для верхнего – из 0–5 и 5–10 см, для нижележащего – из 10–15 и 25–30 см) с сохранением естественного сложения почвы для последующего определения ее плотности.

*Физико-химический анализ почвы.* Образцы почвы доставляли в лабораторию и высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре. Затем в них определяли содержание общего углерода ( $C_{\text{общ}}$ ) и азота (N) методом ИК-спектроскопии после их сжигания в токе кислорода ( $1100^{\circ}\text{C}$ , анализатор Vario EL III, Elementar, Германия). Содержание углерода карбонатов ( $C_{\text{карб}}$ ) в почве определяли манометрическим методом [13]. Воздушно-сухую почву (навеска 2 г) помещали во флакон (объем 480 мл), вносили 20 мл 10% HCl, закрывали герметично резиновой пробкой и измеряли давление ртутным манометром. Результаты определения  $C_{\text{карб}}$  выражали в %. Содержание  $C_{\text{орг}}$  (%) в почве определяли по разнице величин  $C_{\text{общ}}$  и  $C_{\text{карб}}$ . Рассчитывали отношение  $C_{\text{орг}}:N$ . Величину  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  определяли в суспензии (почва : вода = 1 : 2.5) потенциометрическим методом (pH-метр “Эксперт-001”, Россия). Гранулометрический состав почвенных образцов анализировали в водных суспензиях почвы после их ультразвуковой обработки методом лазерной дифракции с помощью лазерного дифрактометра MicrotracS3500 Bluewave (США) [14].

*Оценка запасов углерода.* Запасы  $C_{\text{орг}}$  ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) рассчитывали по формуле  $P \times h \times C/10$ , где  $P$  – объемный вес почвы ( $\text{г}/\text{см}^3$ ),  $h$  – мощность почвенного слоя (см),  $C$  – содержание органического углерода в почве (%). Для оценки объемного веса почвы образцы фиксированного объема высушивали ( $105^{\circ}\text{C}$ , 8 ч) с последующим определением их массы. Величины массы каждой пары образцов (0–5/5–10 и 10–15/25–30 см) были усреднены с целью оценки плотности почвы для слоев 0–10 и 10–30 см почвы.

*Картографирование запасов углерода.* Анализ пространственного распределения запасов  $C_{\text{орг}}$  в почве (0–10 см) был проведен с помощью подходов цифровой почвенной картографии и машинного обучения. Подход заключался в создании



**Рис. 2.** Расположение точек исследования (всего 90) на сельскохозяйственных полях Самарской обл. (красным отмечены точки исследования на поле со вспашкой, бирюзовым и синим – с нулевой обработкой в течение 5- и 8-ми лет соответственно).

нелинейной статистически значимой модели зависимости между запасом  $C_{орг}$  и набором предикторов (независимых переменных), пространственное распределение которых известно для всей территории исследования. В качестве модели применен подход “расширяемые регрессионные деревья” (РРД) [15]. Кроме основных морфометрических параметров использовали еще 40 [16], рассчитанных также на основе ЦМР в программном комплексе SAGA (версия 7.8.2). Дополнительно, в качестве предикторов применяли спектральный индекс для характеристики фотосинтетически активной биомассы растений (*NDVI*). Величины индекса были получены на основе космической съемки со спутника Sentinel-2 (июль–август, 2022 г.). Оценку пространственного распределения запасов  $C_{орг}$  в нижележащем слое почвы (10–30 см) проводили на основе уравнения линейной регрессии для верхнего слоя 0–10 см.

*Статистический анализ данных.* Значимость различий морфометрических свойств рельефа, *NDVI*-индекса, физических и химических свойств почвы между изученными полями оценивали однофакторным дисперсионным анализом с последующим попарным множественным сравнением критерием Тьюки, предварительно выполнив статистический тест на однородность

дисперсий и нормальность распределения данных. Распределение показателя (абсолютная высота), которое не удалось преобразовать для выполнения условий параметрической статистики, было проанализировано критерием Краскела–Уоллиса с последующим попарным множественным сравнением критерием Данна. Статистическую обработку и визуализацию экспериментальных данных выполняли в среде программирования R 4.0.4.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средние величины абсолютных высот для каждого поля значимо различались (табл. 2), различие между ними составило 8–19 м н.у.м. Перепад высот в пределах поля со вспашкой и нулевой обработкой в течение 5 лет был одинаковым и составил 18 м, а для поля с 8-летней нулевой обработкой он достигал 50 м. Уклон местности в среднем не превышал  $3^\circ$  и значимо не различался для изученных сельскохозяйственных полей. Показано, что урожайность и количество фотосинтетически активной биомассы пшеницы (*NDVI*-индекс) для поля с нулевой обработкой почвы были больше на 31 и 23% по сравнению с таковыми для поля со вспашкой (табл. 1, 2). Стационарный опыт в зоне “рискованного земледелия” (Крымский полуостров, чернозем южный мицелярно-карбонатный) выявил, что технология нулевой

**Таблица 2.** Морфометрическая характеристика рельефа и вегетационный индекс (*NDVI*, июль–август 2022 г.) для сельскохозяйственных полей с различной обработкой почвы (среднее  $\pm$  стандартное отклонение)

Обработка	Высота, м н.у.м.*	Разница высот, м	Уклон, °	<i>NDVI</i>
Вспашка	186 $\pm$ 4 b	18	2.1 $\pm$ 1.2 a	0.51 $\pm$ 0.22 b
Нулевая (5 лет)	194 $\pm$ 5 a	18	2.5 $\pm$ 1.3 a	0.66 $\pm$ 0.05 a
Нулевая (8 лет)	175 $\pm$ 12 c	50	2.7 $\pm$ 1.1 a	0.45 $\pm$ 0.06 c

Примечание. Величины с разными буквами различаются значимо для каждого показателя отдельно ( $p \leq 0.05$ , параметрический критерий Тьюки и \*непараметрический критерий Данна).

**Таблица 3.** Физико-химические свойства почвы сельскохозяйственных полей при различной обработке (среднее  $\pm$  стандартное отклонение)

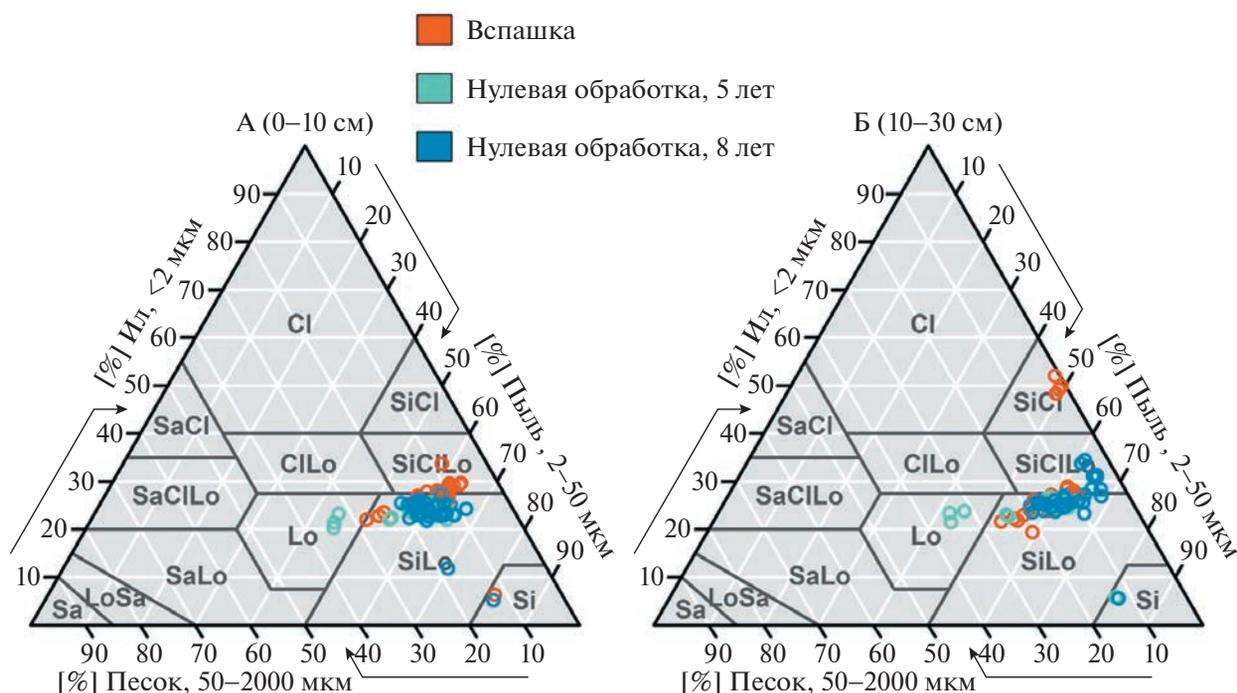
Обработка (количество лет)	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Ил (частицы <0.002 мм), %	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	C <sub>орг</sub>	C <sub>карб</sub>	C <sub>орг</sub> : N
				%		
Верхний слой (0–10 см)						
Вспашка	1.00 $\pm$ 0.09 b	26.2 $\pm$ 4.5 a	7.18 $\pm$ 0.60 a	4.17 $\pm$ 0.67 a	0.47 $\pm$ 0.93 a	12.0 $\pm$ 0.7 a
Нулевая (5)	1.06 $\pm$ 0.09 a	23.6 $\pm$ 1.2 b	6.89 $\pm$ 0.63 a	4.49 $\pm$ 0.87 a	0.32 $\pm$ 0.67 a	12.3 $\pm$ 0.5 a
Нулевая (8)	1.06 $\pm$ 0.09 a	23.3 $\pm$ 4.3 b	6.78 $\pm$ 0.71 a	4.38 $\pm$ 0.69 a	0.33 $\pm$ 0.61 a	12.1 $\pm$ 0.8 a
Нижний слой (10–30 см)						
Вспашка	1.10 $\pm$ 0.07 a	28.7 $\pm$ 8.7 a	7.06 $\pm$ 0.64 a	4.05 $\pm$ 0.69 a	0.47 $\pm$ 0.94 a	12.2 $\pm$ 0.8 a
Нулевая (5)	1.12 $\pm$ 0.09 a	24.4 $\pm$ 3.7 b	6.75 $\pm$ 0.65 a	4.00 $\pm$ 0.84 a	0.36 $\pm$ 0.80 a	12.6 $\pm$ 0.6 a
Нулевая (8)	1.09 $\pm$ 0.07 a	26.2 $\pm$ 4.9 ab	6.86 $\pm$ 0.71 a	4.05 $\pm$ 0.70 a	0.36 $\pm$ 0.63 a	12.2 $\pm$ 0.8 a

обработки почвы позволила увеличить урожайность в среднем на 0.08 т/га (3 года исследований) по сравнению с традиционной обработкой почвы [17]. В нашем исследовании увеличение урожайности при нулевой обработке могло быть связано с внесением азотного удобрения (табл. 1).

Анализ гранулометрического состава выявил, что поля с разными обработками почвы отличались значимо только содержанием илистой фракции в верхнем слое: вспашка способствовала ее увеличению на 2.6–2.9% (табл. 3). Ежегодная механическая обработка почвы приводит к перемешиванию пахотного и подпахотного горизонтов, для которого характерно большее содержание ила.

В целом, верхний слой 0–10 см почвы изученных сельскохозяйственных полей по международной классификации гранулометрического состава (**USDA**) относился в основном к пылевой и тяжелой глине (рис. 3а). Нижний слой почвы (10–30 см) также характеризовался тяжелым гранулометрическим составом, большинство точек исследования были распределены в пределах одного диапазона фракций ила, песка и пыли (рис.

3б). Плотность верхнего слоя почвы при нулевой обработке (5 и 8 лет) значимо увеличивалась на 0.06 г/см<sup>3</sup> по сравнению со вспашкой, а для нижнего 10–30 см слоя значимых различий не обнаружено. Следует отметить, что в научной литературе представлены весьма неоднозначные данные о влиянии технологии прямого посева на плотность почвы. Например, в обзоре [18] показано увеличение плотности почвы только в 39% случаев применения данной агротехнологии, в то время как в остальных случаях она значимо не менялась или даже снижалась (42% и 19% соответственно). При этом авторы отмечали основные изменения плотности только для верхнего слоя 0–10 см почвы. Очевидно, что уплотнение почвы при прямом посеве происходило в результате отсутствия вспашки, однако увеличению плотности может способствовать более продолжительный период применения этой технологии [19, 20] при неблагоприятных погодных условиях (например, обильных осадках) в период обработки, внесении удобрений, посева или сбора урожая. Вместе с тем важно, чтобы уплотнение почвы при нулевой обработке не ограничивало прорастание семян, развитие корней и рост



**Рис. 3.** Треугольник Ферре, характеризующий гранулометрический состав верхнего (а) и нижнего (б) слоев почвы при ее различной обработке. Название по российской номенклатуре: Cl, глина; SiCl, глина; SiClLo, пылеватая глина; SiLo, тяжелый суглинок-глина; Si, пылеватая глина; Lo, суглинок; SaLo, легкий суглинок; LoSa, супесь средняя – легкий суглинок; Sa, песок; SaClLo, легкий–тяжелый суглинок, SaCl, тяжелый суглинок–глина, ClLo, глина.

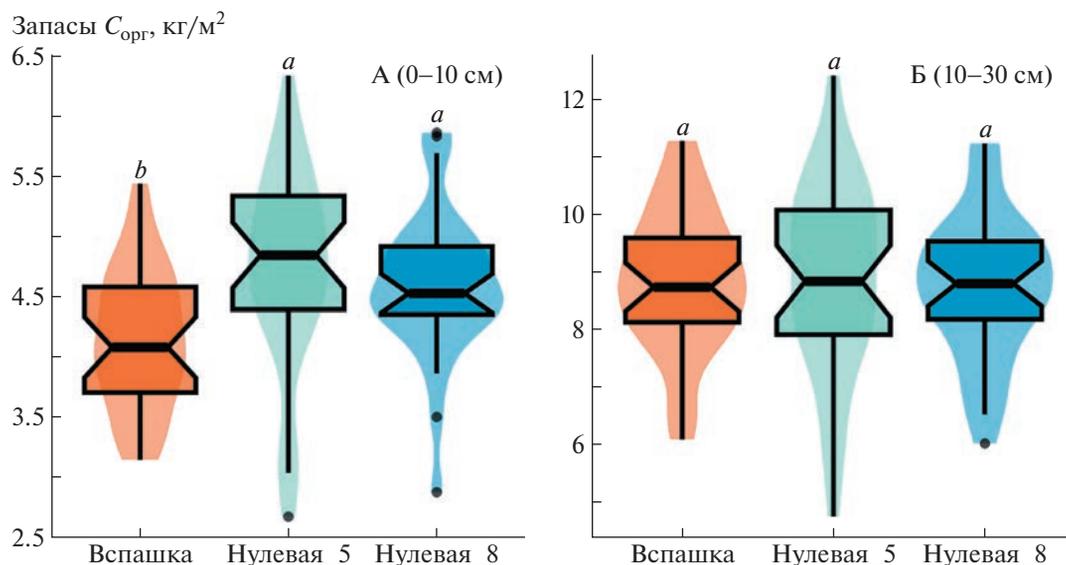
растений. В нашем исследовании прямой посев не приводил к увеличению предельной величины плотности для глинистых почв ( $1.40 \text{ г/см}^3$ ) согласно рекомендациям USDA–NRCS [21], все показатели соответствовали оптимальному диапазону плотности для черноземов тяжелого гранулометрического состава, равному  $1.05\text{--}1.30 \text{ г/см}^3$  [22].

Изученные почвы характеризовались нейтральной реакцией среды, величина  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  значительно не изменялась при различных обработках почвы. Вклад  $C_{\text{карб}}$  в содержание  $C_{\text{общ}}$  почвы был незначительным (7–10%) и не различался между изученными сельскохозяйственными полями. Отмечена тенденция к увеличению содержания  $C_{\text{орг}}$  и отношения  $C_{\text{орг}} : \text{N}$  в верхнем слое почвы от вспашки к нулевой обработке в среднем на 0.2–0.3% и 0.1–0.3 ед. соответственно, при этом для нижнего слоя такой закономерности не обнаружено.

Нулевая обработка почвы в течение 5 и 8 лет приводила к значимому увеличению запасов  $C_{\text{орг}}$  в верхнем слое на  $0.57$  и  $0.45 \text{ кг/м}^2$  (рис. 4а). Например, скорость накопления запасов  $C_{\text{орг}}$  в этом слое составила в среднем  $1.14$  и  $0.56 \text{ т С/га}$  в год при нулевой обработке (5 и 8 лет), при этом для

нижнего слоя почвы такого эффекта не обнаружено (рис. 4б). Суммарный запас  $C_{\text{орг}}$  в слое 0–30 см почвы составил в среднем  $13.0$ ,  $13.6$  и  $13.3 \text{ кг/м}^2$  для полей со вспашкой, 5- и 8-летней нулевой обработкой соответственно. Следовательно, в результате применения нулевой обработки скорость накопления запасов  $C_{\text{орг}}$  в агрочерноземах Среднего Поволжья может достигать  $1.22$  и  $0.43 \text{ т С/га}$  в год, что в  $1.3\text{--}41$  раз больше рекомендуемой программой “4 промилле” для сельскохозяйственных земель нашей страны (от  $0.03$  до  $0.33 \text{ т С/га}$  в год) [2, 10, 11]. К тому же, рассчитанная скорость накопления  $C_{\text{орг}}$  в почве при нулевой обработке в изученном регионе была сопоставима или даже больше в  $1.4\text{--}7.6$  раза по сравнению с такой же практикой землепользования во Франции, Великобритании, Китае и США (табл. 4) [3–6].

С практической точки зрения оценка эффективности внедряемой агротехнологии будет полезна аграриям с целью участия, например, в биржевых сделках с углеродными единицами [23]. В настоящее время в России активно развивается рынок углеродных единиц, принято постановление Правительства РФ от 30 апреля 2022 г. № 790 (ред. от 30.11.2022) “Об утверждении Правил создания и ведения реестра углеродных единиц, а также проведения операций с углеродны-



**Рис. 4.** Распределение запасов органического углерода ( $C_{орг}$ ) в верхнем (а) и нижнем слое (б) почвы сельскохозяйственных полей со вспашкой, нулевой обработкой (5 и 8 лет,  $n = 30$  для каждого поля и слоя). Визуализация данных выполнена в виде боксплотов с вырезами (notches), которые представляют 95%-ный доверительный интервал для медианы (медиана  $\pm 1.58 \times$  межквартильный размах /  $n^{0.5}$ ). Разные буквы указывают на значимые различия ( $p < 0.05$ , критерий Тьюки).

ми единицами в реестре углеродных единиц” (<http://government.ru/docs/all/140827/>) [24]. Согласно данным АО “Национальная товарная биржа”, в сентябре 2022 г. в России впервые была осуществлена биржевая сделка, для которой стоимость одной углеродной единицы (т  $CO_2$ -эквивалента) составила 1000 руб. [23]. Учитывая значительные изменения запасов углерода в верхнем слое 0–10 см изученных почв, можно предположить, что внедрение технологии прямого посева позволит дополнительно увеличить ежегодный доход с 1-го га на ~2000–4000 руб. при продаже углеродных единиц на бирже.

На основе полученных данных была создана модель РРД (“расширяемые регрессионные деревья”), которая объясняла ~80% дисперсии запаса

сов  $C_{орг}$  в верхнем слое 0–10 см ( $p < 0.01$ ) (рис. 5). Недостатки созданной модели связаны с завышением низких (3–4 кг  $C_{орг}/m^2$ ) и занижением высоких (5–6 кг  $C_{орг}/m^2$ ) показателей запасов  $C_{орг}$  в почве, однако она хорошо воспроизводит их средние показатели. Данные о пространственном распределении изученных предикторов (много-слойное растровое изображение) позволили предсказать величины содержания  $C_{орг}$  для всей территории исследования (рис. 6). Общие запасы в верхнем слое 0–10 см почвы составили 1770, 4080 и 7130 т  $C_{орг}$ , а для слоя 10–30 см – 3750, 7700 и 13600 т  $C_{орг}$  для полей со вспашкой, 5- и 8-летней нулевой обработкой на площади 42, 88 и 161 га соответственно. Показано, что наряду с типом

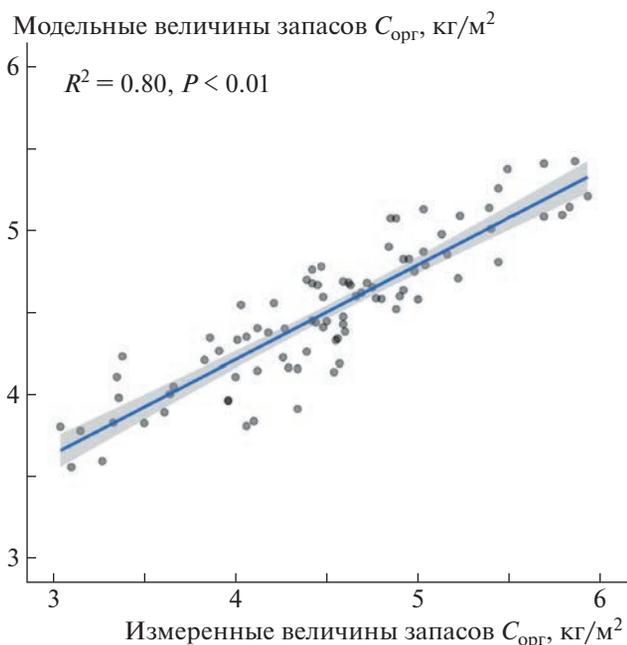
**Таблица 4.** Оценка средней скорости накопления запасов органического углерода ( $\Delta C_{орг}$ ) в агропочвах при применении технологии нулевой обработки в различных странах мира

Страна	Слой почвы, см	Период наблюдений, лет	$\Delta C_{орг}$ , т/га в год	Источник
Франция	0–30	20	0.16	[3]
США	0–7.5, 0–15, 0–20, 0–25, 0–30	5–100	0.40	[4]
Китай	0–20	3–13	0.25	[5]
Англия, Уэльс	0–30	2–23	0.31	[6]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

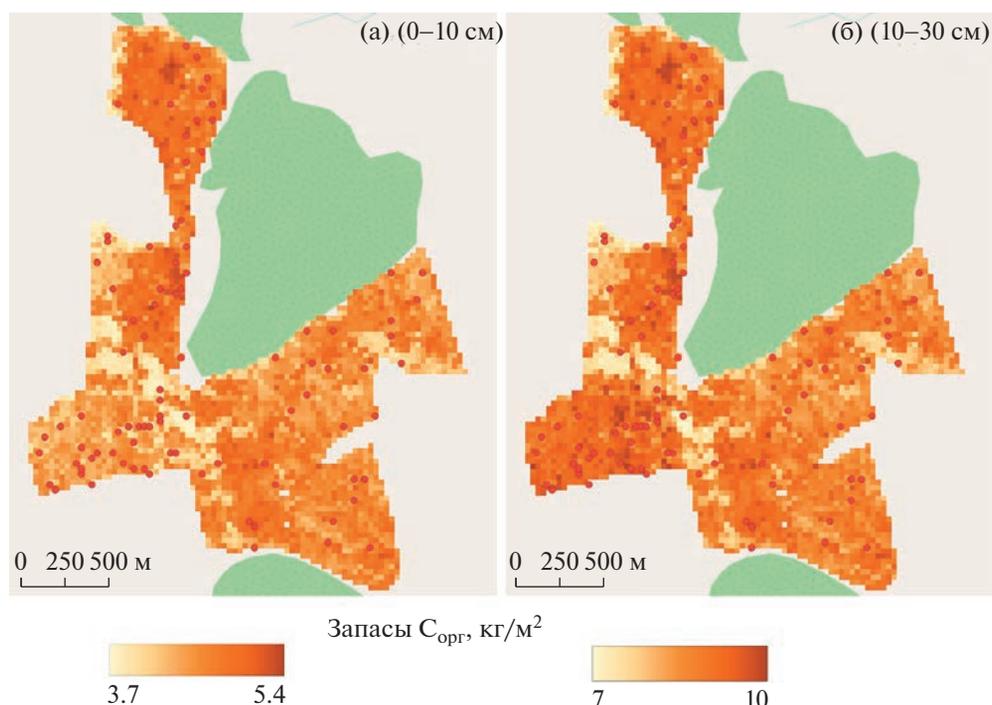
Таким образом, показано, что применение нулевой обработки в течение 5 и 8 лет приводило к увеличению почвенных запасов  $C_{\text{орг}}$  на 0.57 и 0.45 кг/м<sup>2</sup> и уплотнению почвы на 0.06 г/см<sup>3</sup> для верхнего слоя 0–10 см почвы по сравнению со вспашкой, при этом значимых изменений этих почвенных показателей в нижнем слое 10–30 см не обнаружено. Полученные данные указали на определенную эффективность применения технологии нулевой обработки почвы для секвестрации углерода в условиях Среднего Поволжья, что может способствовать компенсации антропогенных выбросов CO<sub>2</sub> (программа “4 промилле”). Такая оценка, с одной стороны, необходима для понимания динамики почвенного плодородия и последующей адаптации данной практики к определенным почвенно-климатическим условиям, а с другой – будет полезна аграриям с целью участия в биржевых сделках с углеродными единицами.

В рамках реализации эколого-климатических программ необходимо расширять сведения о потенциале агропочв в секвестрации углерода при применении ресурсосберегающих технологий, учитывая пространственное распределение почвенных запасов  $C_{\text{орг}}$  и эмиссии CO<sub>2</sub>, длительный мониторинг их динамики, анализ качественного состава органического вещества и углеродсеквестрирующего потенциала [9].



**Рис. 5.** Зависимость между смоделированными и измеренными показателями запасов  $C_{\text{орг}}$  в слое 0–10 см почвы изученных сельскохозяйственных полей.

обработки почвы значимое влияние на запасы  $C_{\text{орг}}$  оказывала и крутизна склонов (вклад 9%). Например, для участков с уклоном 3–6° было характерно уменьшение почвенных запасов  $C_{\text{орг}}$ .



**Рис. 6.** Распределение предсказанных моделью запасов  $C_{\text{орг}}$  в верхнем 0–10 см (а) и нижнем 10–30 см (б) слоях почвы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудеяров В.Н., Демкин В.Ф., Гиличинский Д.А., Горячкин С.В., Рожков В.А. Глобальные изменения климата и почвенный покров // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1027–1042.
2. Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke S., Richer-de-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui C.-C., Vågen T.-G., van Wesemael B., Winowiecki L. Soil carbon 4 per mille // Geoderma. 2017. V. 292. P. 59–86.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
3. Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. Increasing carbon stocks in French agricultural soils? Synthesis of an Assessment Report by the French Institute for Agricultural Research on Request of the French Ministry for Ecology and Sustainable Development // Sci. Assess. Paris: Unit for Expertise, INRA, 2002. 36 p.
4. Johnson J.M.F., Reicosky D.C., Allmaras R.R., Saue, T.J., Venterea R.T., Dell C.J. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agriculture in the central USA // Soil Till. Res. 2005. V. 83. P. 73–94.
5. Lu F., Wang X., Han B., Ouyang Z., Duan X., Zheng H.U.A., Miao H. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland // Glob. Chang. Biol. 2009. V. 15. P. 281–305.
6. Powlson D.S., Bhogal A., Chambers B.J., Coleman K., Macdonald A.J., Goulding K.W.T., Whitmore A.P. The potential to increase soil carbon stocks through reduced tillage or organic material additions in England and Wales: a case study // Agric. Ecosyst. Environ. 2012. V. 146. P. 23–33.
7. Национальный атлас почв Российской Федерации: М.: Астель, 2011. 632 с.
8. Турин Е.Н. Преимущества и недостатки системы земледелия прямого посева в мире (обзор) // Таврич. вестн. аграрн. науки. 2020. № 2(22). С. 150–168.
9. Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13.
10. Столбовой В.С., Савин И.Ю. Могут ли почвы России влиять на изменение климата? // Природн.-ресурс. ведомости. 2018. № 9 (456). С. 5.
11. Stolbovoi V. Carbon in Russian soils // Climate Change. 2002. V. 55. P. 131–156.
12. Minasny B., McBratney A.B. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information // Comput. Geosci. 2006. V. 32. № 9. P. 1378–1388.
13. Воробьева Л.А. Химический анализ почвы. М.: Изд-во МГУ, 1998. 272 с.
14. Юдина А.В., Фомин Д.С., Валдес-Коровкин И.А., Чурилин Н.А., Александрова М.С., Головлева Ю.А., Филиппов Н.В., Ковда И.В., Дымов А.А., Милановский Е.Ю. Пути создания классификации почв по гранулометрическому составу на основе метода лазерной дифракции // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1353–1371.
15. Elith J., Leathwick J. R., Hastie T. A working guide to boosted regression trees // J. Anim. Ecol. 2008. № 77. С. 802–813.
16. Флоринский И.В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию [Электр. ресурс] // Электронное научное издание Альманах “Пространство и время”. 2016. Т. 11. Вып. 1: Система планета Земля. Стационар. Сетев. адрес: 2227-9490e-aprovrv\_ast11-1.2016.71
17. Турин Е.Н., Женченко К.Г., Гонгало А.А. Выращивание сорго зернового без обработки почвы в сравнении с традиционной технологией в центральной степи Крыма // Агрономия. 2019. № 17 (180). С. 75–85.
18. Blanco-Canqui H., Ruis S.J. No-tillage and soil physical environment // Geoderma. 2018. V. 326. P. 164–200.
19. Guan D., Al-Kaisi M.M., Zhang Y., Duan L., Tan W., Zhang M., Li Z. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, rootbleeding sap and nutrients uptake in summer maize // Field Crop Res. 2014. V. 157. P. 89–97.
20. Fan R.Q., Yang X.M., Drury C.F., Reynolds W.D., Zhang X.P. Spatial distributions of soil chemical and physical properties prior to planting soybean in soil under ridge-, no-, and conventional-tillage in a maize-soybean rotation // Soil Use Manag. 2014. V. 30. P. 414–422.
21. USDA-NRCS, 1996. Soil quality resource concerns: compaction. [https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb5294092.pdf](https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5294092.pdf)
22. Бондарев А.Г., Медведев В.В. Некоторые пути определения оптимальных параметров агрофизических свойств почв // Теоретические основы и методы определения оптимальных параметров свойств почв. Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М.: Наука, 1980. С. 85–98.
23. Захаров Н. Карбоновые рынки в России, в том числе аграрный. Углеродные кредиты // Ресурсосбер. земледелие. Спец. сел.-хоз. журн. 2022. № 56(04). С. 31.
24. Постановление Правительства Российской Федерации от 30.04.2022 г. № 790. <http://government.ru/docs/all/140827/> Дата обращ. 13.07.2023.

## Soil Organic Carbon Stocks under No-Tillage in the Middle Volga Region

K. V. Ivashchenko<sup>a,#</sup>, S. V. Sushko<sup>a,b</sup>, Yu. A. Dvornikov<sup>a,c</sup>, L. A. Mirny<sup>a</sup>,  
L. V. Orlova<sup>d,e</sup>, N. D. Ananyeva<sup>a</sup>, S. V. Neprimerova<sup>c</sup>, A. V. Yudina<sup>f</sup>, and N. M. Trots<sup>g</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences  
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

<sup>b</sup>*Agrophysical Research Institute  
Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg 195220, Russia*

<sup>c</sup>*Peoples' Friendship University of Russia  
ul. Miklukho-Maklaya 6, Moscow 117198, Russia*

<sup>d</sup>*LLC "Orlovka–AIC"  
ul. Central'naya 42e, Samara region, Stary Amanak 446472, @city Russia*

<sup>e</sup>*National movement of conservation agriculture  
ul. Kuibysheva 88, Samara 443099, Russia*

<sup>f</sup>*V.V. Dokuchaev Soil Institute  
Pyzhevsky per. 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia*

<sup>g</sup>*Samara State Agrarian University  
ul. Uchebnaya 2, Samara region, Kinel, Ust-Kinelsky 446442, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: ivashchenko.kv@gmail.com*

The introduction of resource-saving technologies into the practice of agriculture is one of the approaches to preserving soil fertility and increasing the reserves of organic carbon ( $C_{org}$ ). One of such technologies is zero tillage, which has been actively used all over the world since the middle of the twentieth century. However, there is still insufficient information about the effectiveness of this technology for the accumulation and preservation of  $C_{org}$  in the agro-soils of our country. The paper estimates the rate of accumulation of  $C_{org}$  by ag-rochernozeams with zero tillage in the conditions of the Middle Volga region. On the territory of agricultural farms (Pokhivistnevsky district of the Samara region), 2 agricultural fields with 5- and 8-year zero tillage (88 and 161 ha, respectively) and a field with non-fallow plowing (42 ha) were selected. 30 study points were selected in each field, from which soil samples of the upper (0–10 cm) and lower (10–30 cm) layers of humus-accumulative and partially illuvial horizons were selected. The paper presents the main physic-chemical parameters of the soil and calculated the reserves of  $C_{org}$ . A significant increase in sorghum reserves in the upper soil layer was shown at 5- and 8-year zero tillage (on average by 0.57 and 0.45 kg/m<sup>2</sup>) compared with those during plowing, but no significant differences were found for the lower layer. The total sorghum reserves for the 0–30 cm soil layer at zero tillage increased by 0.61 and 0.34 kg/m<sup>2</sup> relative to those during plowing. Consequently, as a result of the application of zero processing, the rate of accumulation of  $C_{org}$  reserves in the ag-rochernozeams of the Middle Volga region can reach 1.22 and 0.43 t/ha per year, which is 1.3–41 times more than the recommended program “4 ppm” for agricultural lands of our country (from 0.03 to 0.33 t/ha per year).

**Keywords:** direct seeding, “4 ppm” program, carbon sequestration, spatial distribution of reserves, soil organic carbon.

УДК 631.811.93:631.559

## ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ АГРОРУДЫ (ДИАТОМИТА) НА УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И КАЧЕСТВО РАСТЕНИЕВОДЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

© 2023 г. Е. Н. Кузин<sup>1</sup>, А. Н. Арефьев<sup>1,\*</sup>, Е. Е. Кузина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пензенский государственный аграрный университет  
440014 Пенза, ул. Ботаническая, 30, Россия

\*E-mail: arefiev.a.n@pgau.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

В почвенно-климатических условиях лесостепи Среднего Поволжья научно обосновано и экспериментально доказано действие и последствие различных доз кремнийсодержащей агроруды (диатомита) и ее сочетаний с птичьим пометом на продуктивность сельскохозяйственных культур. Наивысший эффект влияния на продуктивность кукурузы, яровой пшеницы, однолетних трав обеспечивало комплексное действие и последствие кремнийсодержащей агроруды совместно с птичьим пометом. Урожайность зерна кукурузы в этих вариантах изменялась в пределах от 5.48 до 5.92, яровой пшеницы – от 3.12 до 3.33, сена однолетних трав – от 9.15 до 10.2 т/га. Суммарная продуктивность культур звена зернопаропропашного севооборота при использовании кремнийсодержащей агроруды (диатомита) в смеси с птичьим пометом варьировала в интервале от 13.0 до 14.1 т з.е./га, превышая контроль на 3.36–4.44 т з.е./га, или на 34.8–45.9%.

**Ключевые слова:** кремнийсодержащая агроруда (диатомит), птичий помет, кукуруза, яровая пшеница, вико яровая, овес, урожайность, элементы структуры урожая.

**DOI:** 10.31857/S0002188123120116, **EDN:** IFXTPZ

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема устойчивого ведения сельскохозяйственного производства была и остается решающей в обеспечении продовольственной безопасности страны, особенно в условиях экономических санкций. В решении ее всегда придавалось и имеет большое значение применение удобрений, являющихся неотъемлемым фактором повышения урожайности [1, 2].

В агрохимии кремний рассматривается как условно нужный растениям элемент, не входящий в двадцатку наиболее необходимых. Однако, несмотря на высокое содержание кремния в почвах, его доступность для растений очень низкая. Вместе с тем имеются данные, свидетельствующие о важной роли этого элемента в повышении продуктивности сельскохозяйственных культур, в процессах формирования устойчивости растений к различным неблагоприятным факторам окружающей среды, положительном его влиянии на качество продукции и, в конечном итоге, на участие кремния в процессах жизнеобеспече-

ния сельскохозяйственных животных и человека [3–8].

Использование кремниевых удобрений и кремнийсодержащих мелиорантов важно с точки зрения восстановления природного баланса питательных элементов в системе почва–растения, снижения скорости деградационных почвенных процессов и получения стабильных урожаев высокого качества [9]. Цель работы – изучение эффективности применения кремнийсодержащей агроруды (диатомита) и птичьего помета на урожайность сельскохозяйственных культур и качество растениеводческой продукции.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование влияния кремнийсодержащей агроруды и ее сочетаний с птичьим пометом на урожайность культур звена зернопаропропашного севооборота проводили в стационарном опыте Пензенского ГАУ в условиях лесостепи Среднего Поволжья. Схема опытов включала вариант без применения диатомита и птичьего помета (контроль), а также внесение птичьего помета 10 т/га

(вариант – ПП), диатомита 4, 6, 8, 10 т/га (соответственно варианты Д1, Д2, Д3, Д4) и совместное их применение (соответственно варианты Д1 + ПП, Д2 + ПП, Д3 + ПП, Д4 + ПП).

Повторность опыта трехкратная, варианты в опыте размещались методом рендомизированных повторений. Учетная площадь одной делянки составляла 7.8 м<sup>2</sup>. В опыте в качестве кремнийсодержащего удобрения использовали диатомит Коржевского месторождения, расположенного в Никольском р-не Пензенской обл., со следующим содержанием элементов (в окисной форме, % на абсолютно сухое вещество): Н<sub>2</sub>О – 3.14, SiO<sub>2</sub> – 80.42, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 8.01, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2.46, СаО – 0.26, MgO – 0.78, К<sub>2</sub>O – 1.00, Р<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.04. В качестве органического удобрения использовали подстилочный птичий помет в дозе 10 т/га в пересчете на сухое вещество. Влажность птичьего помета равнялась 50%. Доза птичьего помета в физическом весе составляла 20 т/га. Содержание азота в птичьем помете было равно 2.73, фосфора – 6.24, калия – 3.40%. Диатомит и птичий помет были внесены под основную обработку почвы. В опыте возделывали кукурузу (*Zea mays* L.) гибрид Ладожский 175 МВ на зерно, яровую пшеницу (*Triticum aestivum* L.) сорта Гранни, вику яровую (*Vicia sativa* L.) сорта Льговская 22, овес (*Avena sativa* L.) сорта Конкур.

Погодные условия характеризовались следующими гидротермическими коэффициентами увлажнения Селянинова (ГТК): в 2019 г. ГТК составлял 0.77 (засушливый), в 2020 г. – 1.24 (обеспеченное увлажнение), в 2021 г. – 0.85 (засушливый).

Почва опытного участка была представлена серой лесной типичной среднemosной глубоко-вскипающей легкосуглинистой почвой. Агротехника возделывания кукурузы, яровой пшеницы и однолетних трав в опыте была общепринятой для Пензенской обл.

Методы исследований включали закладку полевых опытов, проведение лабораторных анализов, учетов и наблюдений, урожайность сельскохозяйственных культур учитывали весовым методом поделаночно, содержание клейковины в зерне пшеницы определяли по ГОСТ Р 54478-2011, качество зерна пшеницы определяли на приборе ИДК-3М, содержание протеина в зерне кукурузы – методом Кьельдаля (ГОСТ 32044.1-2012). Дисперсионный и корреляционно-регрессионный анализ результатов исследований проведен с использованием пакетов прикладных программ для статистической обработки Statistica 7.0 и Microsoft Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Главная задача растениеводства – увеличение продуктивности сельскохозяйственных культур и повышение качества растениеводческой продукции. В связи с этим эффективность технологического приема повышения плодородия почвы в первую очередь определяется его влиянием на урожайность полевых культур и качество продукции [10–12].

Птичий помет, различные дозы диатомита и их сочетания оказывают не только влияние на свойства почвы, определяющие ее эффективное плодородие, но и существенно повышают продуктивность сельскохозяйственных культур [13].

Кремнийсодержащая агроруда (диатомит) и ее внесение в комплексе с птичьим пометом оказали положительное влияние на основные элементы структуры урожая кукурузы. Аналогичные закономерности отмечены в ряде работ отечественных авторов [14–16]. При выращивании кукурузы на зерно длина початка в контрольном варианте равнялась 12.0 см, число зерен с одного початка составляло 183 шт., их масса – 53.0 г, масса 1000 зерен – 290 г (табл. 1).

Внесение птичьего помета в дозе 10 т/га в пересчете на сухое вещество увеличивало длину початка на 27.9, количество зерен в початке – на 28.5, их массу – на 40.9 и массу 1000 зерен – на 9.7%.

Длина початка в варианте с внесением кремнийсодержащей агроруды изменялась от 13.2 до 14.3 см, превышая контроль на 10.0–19.7%. Число зерен на их фоне варьировало от 217 до 231 шт., масса зерна с одного початка – от 65.9 до 71.7 г, достоверно превышая контроль в первом случае на 18.7–26.2%, во втором – на 24.4–35.4%. Масса 1000 зерен в этих вариантах опыта изменялась в пределах от 304 до 311 г, превышая контроль на 4.3–7.3%. Достоверное увеличение обеспечивали дозы кремнийсодержащей агроруды (диатомита) 8 и 10 т/га.

Использование кремнийсодержащей агроруды (диатомита) в комплексе с птичьим пометом увеличивало длину початка на 30.0–32.4%. Длина початка в этих вариантах опыта изменялась в пределах от 15.5 до 15.8 см. Выход зерна с одного початка в этих вариантах достоверно превышал контроль на 28.1–36.9, масса зерна с початка – на 41.7–51.7%. Масса 1000 зерен изменялась в интервале от 320 до 323 г, превышая контроль на 10.3–11.3%.

В контрольном варианте урожайность зерна кукурузы в условиях 2019 г. составила 3.71 т/га. Птичий помет 10 т/га достоверно повышал уро-

**Таблица 1.** Элементы структуры урожая кукурузы (2019 г.)

Вариант	Длина початка, см	Число зерен в одном початке, шт.	Масса зерна с одного початка, г	Масса 1000 зерен, г
Без Д и ПП (контроль)	12.0	183	53.0	290
ПП 10 т/га	15.3	235	74.7	318
Д1 4 т/га	13.2	217	65.9	304
Д2 6 т/га	13.8	221	66.8	303
Д3 8 т/га	14.2	230	71.6	311
Д4 10 т/га	14.3	231	71.7	311
Д1 4 т/га + ПП 10 т/га	15.5	234	75.1	321
Д2 6 т/га + ПП 10 т/га	15.7	240	76.7	320
Д3 8 т/га + ПП 10 т/га	15.8	248	79.9	323
Д4 10 т/га + ПП 10 т/га	15.8	250	80.2	320
<i>НСР</i> <sub>05</sub>	1.2	17	4.7	19

Примечание. ПП – птичий помет, Д – диатомит. То же в табл. 2–10.

**Таблица 2.** Урожайность зерна кукурузы (2019 г.)

Вариант	Урожайность, т/га	Отклонение от контроля	
		т/га	%
Без Д и ПП (контроль)	3.71	–	–
ПП 10 т/га	5.23	1.52	41.0
Д1 4 т/га	4.62	0.91	24.5
Д2 6 т/га	4.68	0.97	26.1
Д3 8 т/га	5.01	1.30	35.0
Д4 10 т/га	5.02	1.31	35.3
Д1 4 т/га + ПП 10 т/га	5.48	1.77	47.7
Д2 6 т/га + ПП 10 т/га	5.60	1.89	50.9
Д3 8 т/га + ПП 10 т/га	5.89	2.18	58.8
Д4 10 т/га + ПП 10 т/га	5.92	2.21	59.6
<i>НСР</i> <sub>05</sub>	0.58		

жайность зерна кукурузы на 1.52 т/га или на 41%. Урожайность зерна кукурузы на фоне прямого действия птичьего помета составила 5.23 т/га (табл. 2).

Внесение в серую лесную почву кремнийсодержащей агроруды (диатомита) достоверно повышало урожайность зерна кукурузы на 0.91–1.31 т/га или на 24.5–35.3%. Урожайность зерна кукурузы изменялась в пределах от 4.62 до 5.02 т/га. Установлено, что в вариантах с внесением диатомита в дозах 8 и 10 т/га урожайность зерна кукурузы в условиях 2019 г. была практически одинаковой (5.01–5.02 т/га).

Наиболее существенное влияние на урожайность зерна кукурузы оказало внесение диатомита в комплексе с птичьим пометом. Урожайность

зерна кукурузы изменялась в пределах от 5.48 до 5.92 т/га, достоверно превышая контроль на 1.77–2.21 т/га, или на 47.7–59.6%. В вариантах с внесением диатомита 8 и 10 т/га совместно с птичьим пометом урожайность зерна кукурузы была равнозначной.

Содержание протеина в зерне кукурузы в контрольном варианте было равно 9.3%, его сбор с 1 га составил 345 кг. Птичий помет 10 т/га (в пересчете на сухое вещество) повышал содержание протеина в зерне кукурузы на 0.5%, его сбор с 1 га – на 168 кг или на 48.6% (табл. 3).

Содержание протеина в зерне кукурузы на фоне одностороннего действия кремнийсодержащей агроруды было на уровне контроля и изменялось в пределах от 9.2 до 9.4%. Сбор протеина со-

**Таблица 3.** Качество зерна кукурузы

Вариант	Содержание протеина, %	Отклонение от контроля, %	Сбор протеина, кг/га	Отклонение от контроля	
				кг/га	%
Без Д и ПП (контроль)	9.3	–	345	–	–
ПП 10 т/га	9.8	0.5	513	168	48.6
Д1 4 т/га	9.2	–0.1	425	80.0	23.2
Д2 6 т/га	9.3	0.0	435	90.2	26.1
Д3 8 т/га	9.4	0.1	466	121	35.0
Д4 10 т/га	9.4	0.1	481	136	39.5
Д1 4 т/га + ПП 10 т/га	9.8	0.5	537	192	55.7
Д2 6 т/га + ПП 10 т/га	9.8	0.5	549	204	59.0
Д3 8 т/га + ПП 10 т/га	9.9	0.6	583	238	69.0
Д4 10 т/га + ПП 10 т/га	9.8	0.5	580	235	68.2
<i>HCP</i> <sub>05</sub>		0.4		48	

**Таблица 4.** Элементы структуры урожая яровой пшеницы (2020 г.)

Вариант	Число продуктивных стеблей, шт./м <sup>2</sup>	Отклонение от контроля, шт./м <sup>2</sup>	Длина колоса, см	Отклонение от контроля, см	Число зерен в колосе, шт.	Отклонение от контроля, шт.	Масса зерна одного колоса, г	Отклонение от контроля, г	Масса 1000 зерен, г	Отклонение от контроля, г
ПП 10 т/га	426	22	6.3	1.5	19.0	2.2	0.71	0.10	37.4	1.1
Д1 4 т/га	406	2	4.9	0.1	17.0	0.2	0.63	0.02	37.1	0.2
Д2 6 т/га	410	6	5.0	0.2	17.4	0.6	0.65	0.04	37.4	1.1
Д3 8 т/га	411	6	5.2	0.4	17.5	0.8	0.66	0.05	37.7	1.4
Д4 10 т/га	411	7	2.2	0.4	17.4	0.6	0.65	0.04	37.4	1.1
Д1 4 т/га + ПП 10 т/га	427	23	6.3	1.5	19.2	2.4	0.73	0.12	38.0	1.7
Д2 6 т/га + ПП 10 т/га	430	26	3.4	1.6	19.5	2.7	0.76	0.15	38.9	2.6
Д3 8 т/га + ПП 10 т/га	433	29	6.5	1.7	19.6	2.8	0.77	0.16	39.3	3.0
Д4 10 т/га + ПП 10 т/га	432	28	6.4	1.6	19.5	2.7	0.77	0.16	39.3	3.0
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	21		0.9		1.6		0.06		2.0	

ставил 425–481 кг/га, достоверно превышая контроль на 80.0–136 кг/га или на 23.2–35.9%. Использование диатомита совместно с птичьим пометом достоверно увеличивало содержание протеина в зерне кукурузы на 0.5–0.6%, его сбор – на 192–238 кг/га или на 55.7–69.0%.

В условиях 2020 г. число продуктивных стеблей в период уборки яровой пшеницы в контрольном варианте равнялось 404 шт./м<sup>2</sup>. При использовании птичьего помета в дозе 10 т/га число продуктивных стеблей составляло 426 шт./м<sup>2</sup>, достоверно превышая контроль на 22 шт. Кремний-

содержащая агроруда не оказала существенного влияния на число продуктивных стеблей, которое на фоне ее применения в зависимости от дозы диатомита варьировало от 406 до 411 шт. На фоне применения различных доз кремнийсодержащей агроруды совместно с птичьим пометом число продуктивных стеблей варьировало в интервале от 427 до 433 шт., достоверно превышая контроль на 23–29 шт. (табл. 4).

В агроценозе яровой пшеницы в контрольном варианте длина колоса была равна 4.8 см. Птичий помет в дозе 10 т/га достоверно увеличивал длину

Таблица 5. Урожайность яровой пшеницы (2020 г.)

Вариант	Урожайность, т/га	Отклонение от контроля	
		т/га	%
Без Д и ПП (контроль)	2.46	—	—
ПП 10 т/га	3.03	0.57	23.2
Д1 4 т/га	2.56	0.10	4.1
Д2 6 т/га	2.67	0.21	8.5
Д3 8 т/га	2.71	0.25	10.2
Д4 10 т/га	2.72	0.26	10.6
Д1 4 т/га + ПП 10 т/га	3.12	0.66	26.8
Д2 6 т/га + ПП 10 т/га	3.27	0.81	32.9
Д3 8 т/га + ПП 10 т/га	3.33	0.87	35.4
Д4 10 т/га + ПП 10 т/га	3.33	0.87	35.4
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	0.14		

колоса на 1.5 см. Кремнийсодержащая агроруда в дозах от 4 до 10 т/га не оказала существенного влияния на длину колоса яровой пшеницы. Достоверное увеличение длины колоса было отмечено при использовании диатомита в комплексе с птичьим пометом. Длина колоса на их фоне варьировала в пределах от 6.3 до 6.5 см и превышала контроль на 1.5–1.7 см.

В варианте без удобрений число зерен в колосе по окончании вегетации яровой пшеницы составляло 16.8 шт., а их масса равнялась 0.61 г. Птичий помет в дозе 10 т/га достоверно повышал число зерен в колосе яровой пшеницы на 2.2 шт., массу зерен в колосе — на 0.10 г. В вариантах с использованием диатомита в дозах от 4 до 10 т/га не было отмечено достоверных изменений данных элементов структуры урожая. Последствие кремнийсодержащей агроруды в дозах от 4 до 10 т/га в сочетании с птичьим пометом оказало наиболее существенное влияние на число зерен в колосе и их массу: оно изменялось от 19.2 до 19.6 шт., масса зерна с колоса — от 0.73 до 0.77 г, что было достоверным и больше контроля на 2.4–2.8 шт. и 0.12–0.16 г.

В контрольном варианте масса 1000 зерен была равна 36.3 г. Достоверное увеличение массы 1000 зерен было отмечено в вариантах с внесением кремнийсодержащей агроруды в дозах от 6 до 10 т/га совместно с птичьим пометом. Масса 1000 зерен в этих вариантах изменялась от 38.9 до 39.3 г.

В условиях 2020 г. в варианте без удобрений урожайность зерна яровой пшеницы составляла 2.46 т/га (табл. 5). Птичий помет 10 т/га достоверно повышал урожайность зерна яровой пшеницы на 0.57 т/га или на 23.2%. Внесение диатомита 4 т/га не оказало существенного влияния на повы-

шение урожайности яровой пшеницы. Достоверное увеличение урожайности яровой пшеницы обеспечивала кремнийсодержащая агроруда в дозах от 6 до 10 т/га. Урожайность яровой пшеницы на их фоне изменялась в пределах от 2.67 до 2.72 т/га, превышая контроль на 0.21–0.26 т/га или на 8.5–10.6%.

Наивысшая урожайность яровой пшеницы была получена на фоне использования кремнийсодержащей агроруды в дозах от 4 до 10 т/га совместно с птичьим пометом 10 т/га. Урожайность зерна яровой пшеницы в этих вариантах достоверно превышала контроль на 0.66–0.87 т/га или на 26.8–35.4%. Внесение диатомита в дозах 8 и 10 т/га совместно с птичьим пометом оказало практически равнозначное влияние на урожайность зерна яровой пшеницы.

Содержание клейковины в зерне яровой пшеницы в варианте без использования удобрений было равно 23.8%. На фоне внесения птичьего помета 10 т/га содержание клейковины в зерне яровой пшеницы достоверно превышало контроль на 2.1% (табл. 6). В вариантах с использованием кремнийсодержащей агроруды содержание клейковины в зерне яровой пшеницы не существенно отличалось от контроля. Внесение диатомита совместно с птичьим пометом 10 т/га достоверно увеличивало содержание клейковины в зерне яровой пшеницы на 2.3–2.6%.

В условиях 2021 г. в варианте без удобрений урожайность зеленой массы однолетних трав была равна 18.6, сена — 7.44 т/га (табл. 7). Применение птичьего помета достоверно увеличивало урожайность зеленой массы однолетних трав на 3.68 т/га или на 19.8%, урожайность сена — на 1.48 т/га или на 19.9%. Последствие диатомита

**Таблица 6.** Качество зерна яровой пшеницы (2020 г.)

Вариант	Содержание клейковины	Отклонение от контроля
	%	
Без Д и ПП (контроль)	23.8	–
ПП 10 т/га	25.9	2.1
Д1 4 т/га	23.9	0.1
Д2 6 т/га	24.0	0.2
Д3 8 т/га	24.2	0.4
Д4 10 т/га	24.3	0.5
Д1 4 т/га + ПП 10 т/га	26.1	2.3
Д2 6 т/га + ПП 10 т/га	26.2	2.4
Д3 8 т/га + ПП 10 т/га	26.4	2.6
Д4 10 т/га + ПП 10 т/га	26.4	2.6
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	1.4	

в дозах от 4 до 6 т/га оказало несущественное влияние на урожайность зеленой массы и сена однолетних трав. Урожайность зеленой массы при этом составила 20.3–21.8 т/га, сена – 8.13–8.71 т/га. Кремнийсодержащая агроруда совместно с птичьим пометом достоверно повышала урожайность зеленой массы однолетних трав на 4.26–6.86 т/га или на 22.9–36.9%, сена – на 1.71–2.74 т/га или на 23.0–36.8%.

В контрольном варианте содержание сырого протеина в зеленой массе однолетних трав составляло 2.74%, его сбор – 498 кг/га (табл. 8). Использование птичьего помета 10 т/га, кремнийсодержащей агроруды и их сочетаний не оказало существенного влияния на содержание сырого

протеина. В варианте с внесением птичьего помета сбор сырого протеина составил 617 кг/га, достоверно превышая контроль на 120 кг/га или на 24.1%.

При использовании диатомита в дозах 4 и 6 т/га сбор сырого протеина составил 523–537 кг/га. Отклонение от контроля было несущественным и равнялось 25.5–39.4 кг/га или 5.1–7.9%. Достоверное увеличение сбора сырого протеина было отмечено в вариантах с использованием кремнийсодержащей агроруды в дозах 8 и 10 т/га. На их фоне сбор сырого протеина составил 559–599 кг/га, превышая контроль на 61.3–101 кг/га или на 12.3–20.3%.

Наибольший эффект на сбор сырого протеина оказало последствие кремнийсодержащей агроруды в комплексе с птичьим пометом. Сбор сырого протеина на их фоне изменялся в пределах от 631 до 706 кг/га, достоверно превышая контроль на 134–208 кг/га или на 26.9–41.8%.

Интегральным показателем, характеризующим степень эффективности агроприемов, является продуктивность сельскохозяйственных культур [17].

В условиях 2019 г. продуктивность кукурузы в контрольном варианте составила 4.23 т з.е./га, в условиях 2020 г. продуктивность яровой пшеницы была равна 2.46 т з.е./га, в условиях 2021 г. продуктивность однолетних трав составила 2.98 т з.е./га. Суммарная продуктивность равнялась 9.96 т з.е./га (табл. 9).

На фоне внесения птичьего помета продуктивность кукурузы составила 5.96, яровой пшеницы – 3.03, однолетних трав – 3.57 т з.е./га. Сум-

**Таблица 7.** Урожайность однолетних трав (2021 г.)

Вариант	Урожайность зеленой массы, т/га	Отклонение от контроля		Урожайность сена, т/га	Отклонение от контроля	
		т/га	%		т/га	%
Без Д и ПП (контроль)	18.6	–	–	7.44	–	–
ПП 10 т/га	22.3	3.7	19.8	8.92	1.48	19.9
Д1 4 т/га	19.1	0.5	2.6	7.64	0.20	2.7
Д2 6 т/га	19.6	1.0	5.3	7.84	0.40	5.4
Д3 8 т/га	21.8	3.2	17.0	8.71	1.27	17.1
Д4 10 т/га	20.3	1.7	9.2	8.13	0.69	9.3
Д1 4 т/га + ПП 10 т/га	22.9	4.3	22.9	9.15	1.71	23.0
Д2 6 т/га + ПП 10 т/га	23.3	4.7	25.2	9.32	1.88	25.3
Д3 8 т/га + ПП 10 т/га	25.5	6.9	36.9	10.2	2.74	36.8
Д4 10 т/га + ПП 10 т/га	24.0	5.4	29.1	9.61	2.17	29.2
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	1.4			0.41		

**Таблица 8.** Содержание и сбор сырого протеина (2021 г.)

Вариант	Содержание сырого протеина, %	Сбор сырого протеина, кг/га	Отклонение от контроля	
			кг/га	%
Без Д и ПП (контроль)	2.74	498	–	–
ПП 10 т/га	2.77	617	120	24.1
Д1 4 т/га	2.74	523	26	5.1
Д2 6 т/га	2.74	537	39	7.9
Д3 8 т/га	2.75	599	101	20.3
Д4 10 т/га	2.75	559	61	12.3
Д1 4 т/га + ПП 10 т/га	2.76	631	134	26.9
Д2 6 т/га + ПП 10 т/га	2.76	643	146	29.2
Д3 8 т/га + ПП 10 т/га	2.77	706	208	41.8
Д4 10 т/га + ПП 10 т/га	2.78	668	170	34.3
<i>НСР</i> <sub>05</sub>	0.15	57		

**Таблица 9.** Продуктивность культур зернопаропропашного севооборота

Вариант	Кукуруза (2019 г.)	Яровая пшеница (2020 г.)	Однолетние травы (2021 г.)	Суммарная продуктивность	Отклонение от контроля		
						%	
т з.е./га							
Без Д и ПП (контроль)	4.23	2.46	2.98	9.67	–	–	
ПП 10 т/га	5.96	3.03	3.57	12.6	2.89	29.9	
Д1 4 т/га	5.27	2.56	3.06	10.9	1.22	12.6	
Д2 6 т/га	5.34	2.67	3.14	11.2	1.48	15.3	
Д3 8 т/га	5.71	2.71	3.48	11.9	2.23	23.1	
Д4 10 т/га	5.72	2.72	3.25	11.7	2.02	20.9	
Д1 4 т/га + ПП 10 т/га	6.25	3.12	3.66	13.0	3.36	34.8	
Д2 6 т/га + ПП 10 т/га	6.38	3.27	3.73	13.4	3.71	38.4	
Д3 8 т/га + ПП 10 т/га	6.71	3.33	4.07	14.1	4.44	45.9	
Д4 10 т/га + ПП 10 т/га	6.75	3.33	3.84	13.9	4.25	44.0	

марная продуктивность в этом варианте была равна 12.6 т з.е./га, превышая контроль на 2.89 т з.е./га или на 29.9%.

При использовании кремнийсодержащей агроруды в дозах от 4 до 10 т/га продуктивность кукурузы изменялась в пределах от 5.27 до 5.72, яровой пшеницы – от 2.56 до 2.72, однолетних трав – от 3.06 до 3.25 т з.е./га. Суммарная продуктивность варьировала в интервале от 10.9 до 11.9 т з.е./га, превышая контроль на 1.22–2.23 т з.е./га или на 12.6–23.1%.

Наиболее существенное влияние на продуктивность изученных культур оказало комплексное действие и последствие кремнийсодержащей агроруды совместно с птичьим пометом. Продуктивность кукурузы на их фоне изменялась

в пределах от 6.25 до 6.75, яровой пшеницы – от 3.12 до 3.33, однолетних трав – от 3.66 до 4.07 т з.е./га. Суммарная продуктивность в этих вариантах варьировала в интервале от 13.0 до 14.1 т з.е./га и была больше контроля на 3.36–4.44 т з.е./га или на 34.8–45.9%.

Урожайность сельскохозяйственных культур тесно связана с плодородием почвы. Воздействие почвы на формирование урожайности растений определяется ее режимами и свойствами. В связи с этим весьма важно установить степень взаимосвязей урожайности сельскохозяйственных культур со свойствами, характеризующими уровень плодородия почвы [18].

Корреляционно-регрессионный анализ данных опыта показал, что между урожайностью зер-

на кукурузы, яровой пшеницы, сена однолетних трав и количеством гумуса в пахотном слое существовала сильная корреляционная связь. Прямолинейная взаимосвязь урожайности кукурузы ( $y_1$ ), яровой пшеницы ( $y_2$ ), однолетних трав ( $y_3$ ) от количества гумуса ( $x$ ) описывалась уравнениями прямолинейной регрессии:

$$\begin{aligned}y_1 &= 16.714x - 60.92, & r &= 0.89; \\y_2 &= 5.4426x - 18.752, & r &= 0.97; \\y_3 &= 13.45x - 45.037, & r &= 0.81.\end{aligned}$$

Как свидетельствовали коэффициенты прямолинейной регрессии, увеличение количества гумуса в пахотном слое серой лесной почвы на 1% повышало урожайность зерна кукурузы на 16.7, зерна яровой пшеницы – на 5.4, сена однолетних трав – на 13.5 т/га.

Урожайность зерна кукурузы ( $y_1$ ), яровой пшеницы ( $y_2$ ), сена однолетних трав ( $y_3$ ) в сильной степени зависела от содержания в пахотном слое серой лесной почвы щелочногидролизуемого азота ( $x_1$ ), подвижного фосфора ( $x_2$ ), подвижного калия ( $x_3$ ). Прямолинейная взаимосвязь выражалась уравнениями регрессии:

$$\begin{aligned}\text{азот: } y_1 &= 0.1065x_1 - 3.2418, & r &= 0.73; \\y_2 &= 0.0734x_1 - 2.7344, & r &= 0.94; \\y_3 &= 0.2143x_1 - 7.7672, & r &= 0.82;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{фосфор: } y_1 &= 0.1462x_2 - 3.2104, & r &= 0.75; \\y_2 &= 0.0846x_2 - 1.882, & r &= 0.95; \\y_3 &= 0.2392x_2 - 4.6797, & r &= 0.83;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{калий: } y_1 &= 0.1368x_3 - 7.9136, & r &= 0.75; \\y_2 &= 0.0777x_3 - 4.4664, & r &= 0.95; \\y_3 &= 0.2158x_3 - 11.693, & r &= 0.84.\end{aligned}$$

Таким образом, коэффициенты прямолинейной регрессии показали, что увеличение содержания щелочногидролизуемого азота в пахотном слое серой лесной почвы на 1 мг/кг повышало урожайность зерна кукурузы на 0.107, зерна яровой пшеницы – на 0.073, сена однолетних трав – на 0.214 т/га. Увеличение содержания подвижного фосфора в пахотном слое на 1 мг/кг повышало урожайность зерна кукурузы на 0.146, зерна яровой пшеницы – на 0.085, сена однолетних трав – на 0.239 т/га. Увеличение содержания подвижного калия в пахотном слое на 1 мг/кг повышало урожайность зерна кукурузы на 0.137, зерна яровой пшеницы – на 0.0787, сена однолетних трав – на 0.216 т/га.

Установлено, что урожайность зерна кукурузы ( $y_1$ ), зерна яровой пшеницы ( $y_2$ ), сена однолетних трав ( $y_3$ ) в сильной степени зависела от количества обменных оснований ( $x$ ). Прямолинейная взаимосвязь выражалась уравнениями регрессии:

$$\begin{aligned}y_1 &= 0.9487x - 15.785, & r &= 0.92; \\y_2 &= 0.4067x - 6.105, & r &= 0.88; \\y_3 &= 0.8908x - 10.938, & r &= 0.73.\end{aligned}$$

Таким образом, увеличение в почве количества обменных оснований на 1 мг-экв/100 г почвы повышало урожайность зерна кукурузы на 0.949, зерна яровой пшеницы – на 0.407, сена однолетних трав – на 0.891 т/га.

Установлено, что между урожайностью зерна кукурузы ( $y_1$ ), зерна яровой пшеницы ( $y_2$ ), сена однолетних трав ( $y_3$ ) и величиной рН<sub>КСИ</sub> существовала сильная корреляционная связь. Характер взаимосвязи выражался уравнениями прямолинейной регрессии:

$$\begin{aligned}y_1 &= 3.6291x - 14.227, & r &= 0.85; \\y_2 &= 1.2207x - 3.7938, & r &= 0.87; \\y_3 &= 3.3198x - 9.5319, & r &= 0.73.\end{aligned}$$

Как свидетельствовали коэффициенты прямолинейной регрессии, увеличение рН<sub>КСИ</sub> на 1 ед. рН повышало урожайность зерна кукурузы на 3.63, зерна яровой пшеницы – на 1.22, сена однолетних трав – на 3.32 т/га.

Взаимосвязь урожайности зерна кукурузы ( $y_1$ ), зерна яровой пшеницы ( $y_2$ ), сена однолетних трав ( $y_3$ ) от количества водопрочных агрегатов ( $x$ ) в пахотном слое серой лесной почвы указывала на сильную связь между параметрами. Прямолинейная взаимосвязь выражалась уравнениями регрессии:

$$\begin{aligned}y_1 &= 0.1385x - 0.8847, & r &= 0.93; \\y_2 &= 0.0546x + 0.4517, & r &= 0.99; \\y_3 &= 0.1654x + 1.3658, & r &= 0.93.\end{aligned}$$

Таким образом, увеличение количества водопрочных агрегатов в пахотном слое серой лесной почвы на 1% повышало урожайность зерна кукурузы на 0.139, зерна яровой пшеницы – на 0.055, сена однолетних трав – на 0.165 т/га.

Установлено, что между равновесной плотностью ( $x$ ) пахотного слоя серой лесной почвы и урожайностью зерна кукурузы ( $y_1$ ), зерна яровой пшеницы ( $y_2$ ), сена однолетних трав ( $y_3$ ) существовала сильная обратная корреляционная

связь. Прямолинейная зависимость выражалась уравнениями регрессии:

$$y_1 = -15.457x + 25.829, \quad r = -0.82;$$

$$y_2 = -12.248x + 19.393, \quad r = -0.91;$$

$$y_3 = -33.417x + 50.832, \quad r = -0.86.$$

Установлено, что с увеличением плотности пахотного сдоя почвы на 1 г/см<sup>3</sup> урожайность зерна кукурузы снижалась на 15.5, зерна яровой пшеницы – на 12.2, сена однолетних трав – на 33.4 т/га.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наивысший эффект влияния кремнийсодержащей агроруды (диатомита) на урожайность сельскохозяйственных культур и качество растениеводческой продукции обеспечивало комплексное применение и последствие кремнийсодержащей агроруды с птичьим пометом. Урожайность зерна кукурузы в этих вариантах изменялась от 5.48 до 5.92, яровой пшеницы – от 3.12 до 3.33, сена однолетних трав – от 9.15 до 10.2 т/га. Суммарная продуктивность культур варьировала в интервале от 13.1 до 14.1 т з.е./га, превышая контроль на 3.36–4.44 т з.е./га или на 34.8–45.9%.

Корреляционно-регрессионный анализ экспериментальных данных показал, что урожайность зерна кукурузы и яровой пшеницы, сена однолетних трав в сильной степени зависела от содержания в пахотном слое серой лесной почвы основных элементов питания, а также ее агрофизических и агрохимических свойств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аскаргов А.А., Аскаргова А.А. Устойчивое сельское хозяйство: сущность и необходимые условия его формирования // Управл-е эконом. сист.: электр. научн. журн. 2012. № 6 (42). С. 31.
2. Куликова А.Х., Яшин Е.А., Волкова Е.С. Местные нетрадиционные ресурсы и отходы сельскохозяйственного производства как источники элементов питания растений // Вестн. УлГСХА. 2022. № 2 (58). С. 60–66.
3. Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Пироговская Г.В., Ермолович И.Е. Перспективы использования кремниевых препаратов в сельском хозяйстве (обзор научной литературы) // Почвовед. и агрохим. 2022. № 1 (68). С. 219–234.
4. Куликова А.Х., Яшин Е.А. Роль кремния и высококремнистых пород в защите посевов сельскохозяйственных культур // 2015. № 4 (32). С. 30–35.
5. 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. 23–32.
6. Самсонова Н.Е. Кремний в растительных и животных организмах // Агрохимия. 2019. № 1. С. 86–96.
7. Матыченков И.В. Взаимное влияние кремниевых, фосфорных и азотных удобрений в системе почва–растение: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2014. 21 с.
8. Безручко Е.В., Федотова Л.С. Доступный для растений кремний – фактор устойчивого производства картофеля // Агрохимия. 2021. № 8. С. 70–81.
9. Кузин Е.Н., Арефьев А.Н., Кузина Е.Е. Влияние природных цеолитов и их сочетаний с удобрениями на урожайность сельскохозяйственных культур // Нива Поволжья. 2016. № 1 (38). С. 42–49.
10. Серая Т.М., Богатырева Е.Н., Кирдун Т.М., Мачок Т.В., Бирюкова О.М., Белявская Ю.А. Урожайность и качество зерна озимой пшеницы в зависимости от систем удобрения при традиционной и поверхностной обработке дерново-подзолистой супесчаной почвы // Агрохимия. 2022. № 5. С. 71–78.
11. Kuzina E.E., Arefyev A.N., Kuzin E.N. Influence of diatomite and its combinations with manure on the fertility of leached black earth soil (chernozem) and on the yield of vegetable crops // Bulg. J. Agricult. Sci. 2021. T. 27. № 3. С. 512–518.
12. Афанасьев Р.А., Мерзлая Г.Е. Сравнительная эффективность систем удобрения // Агрохимия. 2021. № 2. С. 31–36.
13. Арефьев А.Н., Ковальский К.Ю., Кузин Е.Н., Кузина Е.Е. Влияние диатомита и его сочетаний с птичьим пометом на плодородие почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур // Молочн.-хоз. вестн. 2021. № 3 (43). С. 8–20.
14. Никулина Е.В., Дубина Л. Влияние препарата нанокремния на продуктивность кукурузы // Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса. Пенза, 2022. С. 203–205.
15. Царева М.В. Оценка эффективности куриного помета на дерново-подзолистой почве разного гранулометрического состава на урожайность и качество силосной массы кукурузы // Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК. Брянск, 2022. С. 64–72.
16. Хезев А.М., Абубекиров Р.Н., Антихович О.К., Дорожкина Л.А. Реакция гибридов кукурузы на применение удобрений // Агрохим. вестн. 2022. № 2. С. 31–36.
17. Медведева Т.Н., Артамонова И.А. Методика интегральной оценки эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения // Вестн. КурганГСХА. 2015. № 2. С. 16–18.
18. Алексеев А.И. Влияние природных цеолитов на плодородие чернозема выщелоченного и продуктивность сельскохозяйственных культур: Дис. ... канд. с.-х. наук. Пенза, 2013. 168 с.

## **Influence of Silicon-Containing Agro-Ore (Diatomite) on the Yield of Agricultural Crops and the Quality of Crop Production**

**E. N. Kuzin<sup>a</sup>, A. N. Arefyev<sup>a, #</sup>, and E. E. Kuzina<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup>Penza State Agrarian University  
ul. Botanicheskaya 30, Penza 440014, Russia*

*<sup>#</sup>E-mail: arefiev.a.n@pgau.ru*

In the soil and climatic conditions of the forest-steppe of the Middle Volga region, the effect and aftereffect of various doses of silicon-containing agro-ore (diatomite) and its combinations with bird droppings on the productivity of agricultural crops has been scientifically substantiated and experimentally proven. The highest effect on the productivity of corn, spring wheat, annual grasses was provided by the complex action and aftereffect of silicon-containing agricultural ore together with bird droppings. The yield of corn grain in these variants varied from 5.48 to 5.92, spring wheat – from 3.12 to 3.33, hay of annual grasses – from 9.15 to 10.2 t/ha. The total productivity of crops of the grain-to-crop rotation link when using silicon-containing agricultural ore (diatomite) mixed with bird droppings varied in the range from 13.0 to 14.1 tons of grain/ha, exceeding the control by 3.36–4.44 tons of grain/ha, or by 34.8–45.9%.

*Keywords:* silicon-containing agricultural ore (diatomite), bird droppings, corn, spring wheat, spring vetch, oats, yield, crop structure elements.

УДК 631.811:632.51:631.582

## ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ЗАСОРЕННОСТЬ ЗЕРНОТРАВЯНОПРОПАШНОГО СЕВООБОРОТА

© 2023 г. А. М. Шпанев<sup>1,2,\*</sup>, В. В. Смук<sup>1,2</sup>, М. А. Фесенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт  
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений  
196608 Санкт-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

\*E-mail: ashpanev@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

После доработки 14.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

В многолетнем исследовании в длительном стационарном опыте выявлено, что действие минеральных удобрений распространялось на количественную составляющую и структуру засоренности полей зерноотраважнопропашного севооборота но не на видовой состав сорной растительности. Под влиянием минеральных удобрений увеличивалась высота и масса сорных растений, но снижалась их численность за период совместного произрастания с культурными растениями в течение вегетации (на 12.0–22.6%). В отсутствие выраженной конкурентоспособности культурных растений в неудобренном варианте опыта густота сорняков от весеннего периода к уборке урожая возрастала на 47%. Засоренность полей многолетними двудольными видами сорных растений и их относительное обилие в удобренных вариантах снижались в 2.4–3.6 раза, а малолетними двудольными видами – увеличивались в 1.3–1.4 раза. Отзывчивыми на внесение минеральных удобрений оказались марь белая и пикульники, тогда как торица полевая и редька дикая преимущественно произрастали в неудобренном варианте, где кислотность почвы имела более высокие показатели.

*Ключевые слова:* длительный стационарный опыт, зерноотраважно-пропашной севооборот, засоренность полей, видовой состав, видовое обилие, динамика численности сорняков.

**DOI:** 10.31857/S000218812312013X, **EDN:** STTXCL

### ВВЕДЕНИЕ

В отечественной литературе сведения, касающиеся влияния длительного применения минеральных удобрений на засоренность агроценозов отдельных культур или целостной севооборотной агроэкосистемы, ограничиваются небольшим количеством публикаций, к тому же довольно устаревших. Например, в длительном опыте РГАУ им. К.А. Тимирязева в посадках картофеля отмечено снижение численности и массы сорных растений как при бессменном возделывании (на 52.2 и 47.0%), так и в севообороте (на 37.5 и 30.4%), а в посевах озимой ржи – увеличение данных параметров засоренности (на 18.1 и 230, 56 и 23% соответственно) [1]. Схожий результат был получен в посевах озимой ржи в длительном опыте отдела агрохимии Смоленского НИИСХ, где засоренность посева данной культуры малолетними сорняками в 1-й ротации севооборота увеличивалась

в зависимости от доз минеральных удобрений на 37.8–48.8, во 2-й – на 14.9–32.8, в 3-й – на 2.6–10.5% [2]. В длительном стационарном опыте Пермского НИИСХ засоренность посевов озимой ржи и овса посевного, размещенных после занятого и сидерального пара, возрастала под влиянием минеральных удобрений на 37.2 и 60.0 и 26.7 и 108% соответственно, при использовании в качестве предшественника чистого пара – снижалась на 42.2 и 5.9% [3].

Сведения, касающиеся влияния систематического применения минеральных удобрений, могут быть получены только в длительных стационарных опытах, среди которых ныне действующих осталось не так уж много. Одним из них является агроэкологический стационар на базе Меньковского филиала Агрофизического НИИ, представляющий собой 7-польный зерноотраважно-пропашной севооборот с классическим для

Северо-Западного региона составом и чередованием культур [4]. Его история насчитывает уже более 40 лет, за время которых оставалось неизменным ежегодное внесение минеральных удобрений согласно схеме опыта, а на протяжении последних 12 лет проводили изучение всех фитосанитарных параметров и эффектов от применения средств защиты растений [5].

Цель работы – анализ многолетних данных влияния длительного применения минеральных удобрений на засоренность полей зерноотрава-пропашного севооборота в почвенно-климатических условиях Северо-Запада России.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение длительного применения минеральных удобрений на засоренность 7-польного зерноотравапропашного севооборота проводили в Меньковском филиале Агрофизического НИИ, расположенном в Гатчинском р-не Ленинградской обл., в период очередной его ротации (2012–2018 гг.). Согласно схеме севооборота, последовательно возделывали люпин узколистный (сидеральный пар)–рожь озимую–ячмень яровой с подсевом многолетних трав (клевер красный + тимофеевка луговая)–многолетние травы 1- и 2-го годов пользования–картофель–рапс яровой. Севооборот был заложен в 1982 г. и на сегодняшний день представляет собой длительный фундаментальный опыт, схемой которого предусмотрено изучение 3-х уровней удобренности, формируемых разными дозами минеральных удобрений из расчета планируемой урожайности культур. В варианте с высокой удобренностью доза составляла N100P75K75, со средней – N65P50K50, с низкой – удобрения не вносили. Внесение минеральных удобрений осуществляли механически поперек поля ежегодно под все культуры, за исключением люпина и многолетних трав 1-го года пользования. Площадь под каждым из вариантов составляла 0.18, поля – 0.6, севооборота – 4.2 га.

Для оценки засоренности полей севооборота использовали методику постоянных учетных площадок с их стационарным размещением на протяжении всего периода вегетации культур [6]. Площадь постоянных площадок составляла 0.1 м<sup>2</sup> для культур сплошного сева, 1.4 м<sup>2</sup> – в посадках картофеля с шириной междурядий 0.7 м<sup>2</sup>. В каждом варианте удобренности ежегодно устанавливали по 6 (картофель, многолетние травы, люпин узколистный) – 12 (рожь озимая, ячмень яровой, рапс яровой) постоянных площадок, всего на поле – 18–36, севообороте – 180, за все годы иссле-

дования – 1260 площадок. В начальный период развития агрофитоценоза на постоянных площадках определяли видовое обилие и численность сорных растений, перед уборкой урожая – видовое обилие, численность, фитомассу и высоту сорных растений каждого вида. В качестве дополнительных показателей засоренности полей проводили расчет индекса попарного видового сходства Сьёренсена и коэффициента общности удельного обилия Шорыгина [7, 8].

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Statistica 6.0 при применении дисперсионного анализа для выявления достоверных различий засоренности вариантов опыта с разным уровнем минерального питания.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования на площади 7-польного зерноотравапропашного севооборота выявлено произрастание 58 видов сорных растений из 20 разных семейств. На долю малолетних и многолетних сорняков приходилось 36 и 22 вида соответственно. Массовыми видами были марь белая (*Chenopodium album* L.), фиалка полевая (*Viola arvensis* Murr.), пастушья сумка обыкновенная (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik.), пикульники (*Galeopsis* spp.), торица полевая (*Spergula arvensis* L.), дымянка аптечная (*Fumaria officinalis* L.), ромашка непахучая (*Matricaria inodora* L.), редька дикая (*Raphanus raphanistrum* L.). Среди многолетних преобладали пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), осот полевой (*Sonchus arvensis* L.) и щавель малый (*Rumex acetosella* L.). В среднем в полях севооборота насчитывали 8 видов/м<sup>2</sup> и 220 экз./м<sup>2</sup> при величине надземной массы сорных растений, равной 185 г/м<sup>2</sup>.

Согласно полученным данным, не было обнаружено различий в видовом составе сорных растений, встречаемых в вариантах с разным уровнем удобренности. Усредненные величины индекса попарного видового сходства между неудобренным и среднеудобренным вариантами составляли 0.88, неудобренным и высокоудобренным – 0.86, средне- и высокоудобренным – 0.89 (табл. 1). В то же время при расчетах коэффициента общности удельного обилия выявлено влияние удобренности на структуру засоренности полей. Наименее схожими оказались неудобренный и высокоудобренный варианты (59.3), тогда как наиболее высокая общность отмечена между средне- и высокоудобренным вариантами опыта (79.4).

**Таблица 1.** Сходство видового состава и общность удельного обилия сорных растений в вариантах разной удобренности полей зернотравянопропашного севооборота

	Поле 1		Поле 2		Поле 3		Поле 4		Поле 5		Поле 6		Поле 7	
	НРК <sub>1</sub>	НРК <sub>2</sub>												
Индекс попарного видового сходства														
НРК <sub>0</sub>	0.81	0.84	0.91	0.91	0.91	0.78	0.92	0.86	0.93	0.90	0.92	0.91	0.78	0.87
НРК <sub>1</sub>		0.91		0.89		0.86		0.87		0.90		0.96		0.85
Коэффициент общности удельного обилия														
НРК <sub>0</sub>	69.9	53.3	46.6	46.1	74.0	66.6	60.6	65.6	63.1	57.7	80.9	73.8	65.3	52.3
НРК <sub>1</sub>		69.1		86.0		84.7		73.4		80.1		81.1		81.1

Примечание. НРК<sub>0</sub> – N0P0K0, НРК<sub>1</sub> – N65P50K50, НРК<sub>2</sub> – N100P75K75. То же в табл. 2–6.

**Таблица 2.** Влияние длительного применения минеральных удобрений на густоту произрастания и относительное обилие массовых видов сорных растений в зернотравяно-пропашном севообороте

Вид	Дозы минеральных удобрений						НСР <sub>05</sub>
	N0P0K0		N65P50K50		N100P75K75		
	экз./м <sup>2</sup>	%	экз./м <sup>2</sup>	%	экз./м <sup>2</sup>	%	
Марь белая	37	16.1	82	28.1	102	36.6	12
Фиалка полевая	37	16.1	58	19.9	46	16.5	11
Пастушья сумка обыкновенная	18	7.8	25	8.6	20	7.2	5.9
Пикульники	10	4.3	30	10.3	21	7.5	6.7
Торица полевая	23	10.0	14	4.8	13	4.7	4.1
Дымянка аптечная	10	4.3	9	3.1	10	3.6	3.4
Ромашка непахучая	7	3.0	7	2.4	8	2.9	4.0
Редька дикая	7	3.0	7	2.4	3	1.1	2.6
Пырей ползучий	5	2.2	5	1.7	7	2.5	1.6
Щавель малый	11	4.8	3	1.0	2	0.7	3.5
Бородавник обыкновенный	4	1.7	6	2.1	4	1.4	3.1
Осот полевой	10	4.3	5	1.7	2	0.7	3.6
Незабудка полевая	4	1.7	3	1.0	4	1.4	0.7

Изменения в структуре засоренности полей были связаны с влиянием удобрений на густоту произрастания отдельных видов сорных растений. Например, под влиянием длительного применения удобрений увеличивалась численность видов сорных растений, отзывчивых на улучшение питательного режима почвы. К таковым относились марь белая и пикульники, фактическая численность которых в зависимости от удобренности варианта возрастала в 2.2–2.8 и 2.1–3.0 раза соответственно, а относительное обилие – с 16.1 до 28.1–36.6% и с 4.3 до 7.5–10.3% (табл. 2). В отношении мари белой был получен схожий результат в других регионах возделывания культур [9, 10]. Ранее нами было выявлено, что дымянка аптечная преимущественно произрастала в удоб-

ренных вариантах в посевах рапса ярового [11]. Тем не менее, для некоторых видов сорняков оказалась свойственна отрицательная реакция на длительное внесение минеральных удобрений. Такие виды как торица полевая и редька дикая, относящиеся к группе оксифитов – растений, предпочитающих кислую реакцию почвенного раствора, в большей численности произрастали в неудобренном варианте опыта. Например, в варианте без удобрений кислотность почвы была больше (рН 4.2), чем в вариантах с многолетним внесением средних и высоких доз минеральных удобрений (рН 4.4). По литературным данным, на повышение концентрации питательных элементов в почве положительно реагируют подмаренник цепкий, паслен черный, ромашка непа-

**Таблица 3.** Влияние длительного применения минеральных удобрений на структуру засоренности полей зерно-травянопропашного севооборота

Биологические группы	Дозы минеральных удобрений						HCP <sub>05</sub>
	N0P0K0		N65P50K50		N100P75K75		
	экз./м <sup>2</sup>	%	экз./м <sup>2</sup>	%	экз./м <sup>2</sup>	%	
Многолетние однодольные	5	2.2	6	2.0	8	2.9	1.6
Многолетние двудольные	29	12.6	12	4.1	8	2.9	6.4
Малолетние однодольные	1	0.4	1	0.3	2	0.7	1.8
Малолетние двудольные	196	85	274	94	262	94	22

**Таблица 4.** Влияние длительного применения минеральных удобрений на засоренность полей зерно-травянопропашного севооборота

Показатель засоренности	Дозы минеральных удобрений			HCP <sub>05</sub>
	N0P0K0	N65P50K50	N100P75K75	
Видовой состав	50	50	48	–
Видовое обилие, видов/м <sup>2</sup>	9.4	9.3	9.6	0.5
Начальная засоренность, экз./м <sup>2</sup>	230	292	279	22
Конечная засоренность, экз./м <sup>2</sup>	338	257	216	31
Изменения в засоренности за период вегетации, %	+47.0	–12.0	–22.6	–
Фитомасса при уборке урожая, г/м <sup>2</sup>	182	252	225	31
Масса 1-го сорного растения, г/растение	0.54	0.98	1.04	0.20

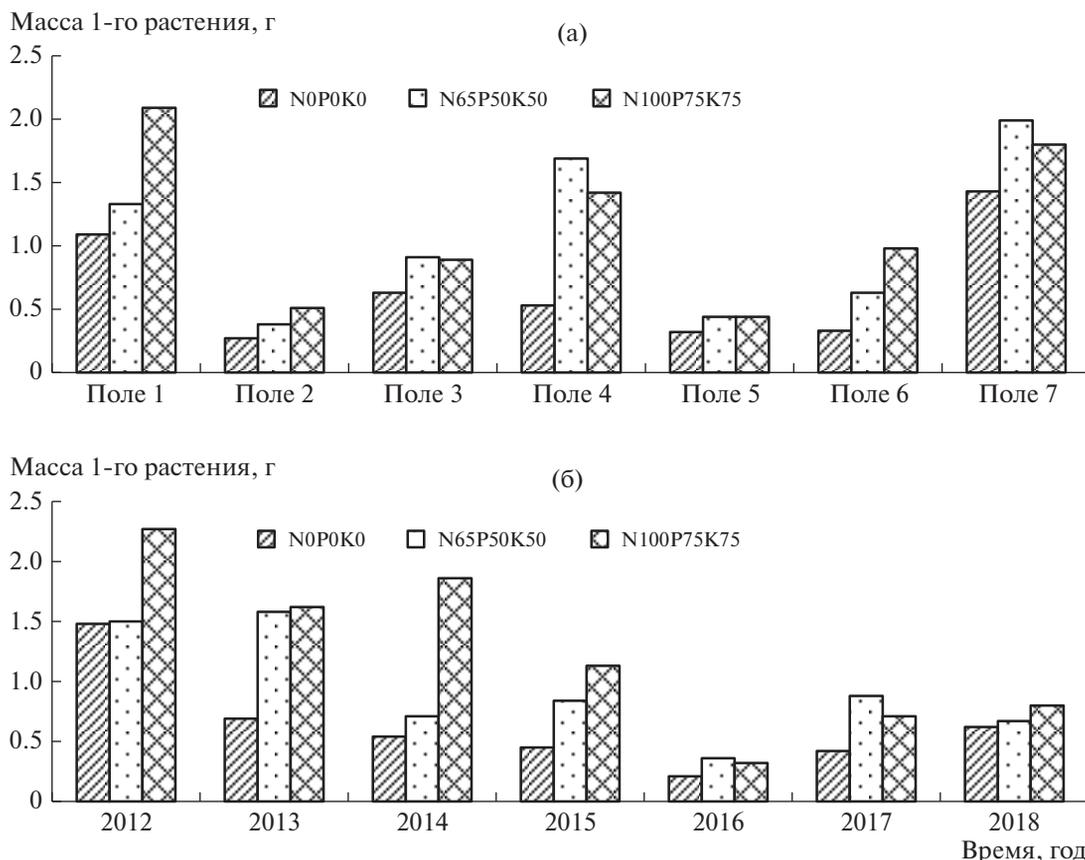
хучая, щирца запрокинутая, гречишка вьюнковая, пырей ползучий, звездчатка средняя, отрицательно – щетинник сизый, фиалка полевая, осот полевой, вьюнок полевой, жимолость полевая [12].

В целом можно констатировать, что в результате длительного внесения минеральных удобрений происходило достоверное увеличение засоренности полей изученного севооборота малолетними видами сорных растений. В варианте средней удобренности увеличение засоренности малолетниками составило 28.4, высокой удобренности – 25.4%. При этом между вариантами разной степени удобренности отсутствовали достоверные различия начальной засоренности полей.

Полученные данные свидетельствовали о выраженном отрицательном влиянии длительного применения минеральных удобрений на численный состав многолетних двудольных сорных растений. В удобренных вариантах опыта по сравнению с неудобренным густота осота полевого сни-

жалась в 2–5 раз, щавеля малого – в 3.7–5.5 раза, мать и мачехи обыкновенной – в 3.4–6.3 раза, чистеца обыкновенного – в 1.3–3.4 раза. Снижение суммарной численности данной группы сорных растений составило 2.4 и 3.6 раза соответственно в средне- и высокоудобренном вариантах. При этом вклад в структуру засоренности полей снижался с 12.6 до 4.1 и 2.9% (табл. 3). Сокращение долевого участия видов сорных растений с многолетним циклом развития в условиях применения минеральных удобрений подтверждено литературными данными и в основном касается корнеотпрысковых видов [12].

Одна из значимых фитосанитарных проблем зерно-травяно-пропашного севооборота – это сильная засоренность полей пыреем ползучим [13, 14]. По нашим данным, наиболее высокая численность пырея ползучего отмечена в посадках картофеля, предшественником которого являлись многолетние травы 2-го года пользования. В среднем за период исследования в посадках этой культуры насчитывалось 24 и 26 экз./м<sup>2</sup> на 7–10 сут после высадки клубней и перед десика-



**Рис. 1.** Усредненная надземная масса 1-го сорного растения в вариантах разной удобрённости зерноотрашнопропашного севооборота в зависимости: (а) – от поля ротации, (б) – от года опыта.

цией соответственно. В качестве тенденции можно отметить, что по мере снижения удобрённости вариантов уменьшалась численность пырея с 29 до 22 и 20 экз./м<sup>2</sup>. Впрочем, выявленная закономерность устойчиво просматривалась на протяжении всего периода изучения засоренности севооборота. В удобренных вариантах растения пырея ползучего формировали более высокую надземную массу (1.51–1.57 г против 1.18 г) и высоту (37.1–37.3 см против 27.8 см). В посевах ржи озимой в удобренных и неудобренном вариантах насчитывалось 4–6 и 2 экз./м<sup>2</sup>, рапса ярового – 4–7 и 3 экз./м<sup>2</sup>.

Влияние удобрений распространялось не только на начальную засоренность полей и ее структуру, но и на итоговые показатели, определенные во время уборки урожая. В неудобренном варианте, в отсутствие выраженной конкурентоспособности культурных растений, наблюдали увеличение численности сорных растений за период вегетации на уровне 47% (табл. 4).

Под действием удобрений отмечено усиление фитоценотического давления со стороны куль-

турных растений [15–17]. В нашем опыте это приводило к снижению численности сорняков в удобренных вариантах (на 12.0–22.6%), но в то же время – к увеличению их вегетативной массы (в 1.8–1.9 раза). Выявленные эффекты устойчиво отмечали на всех полях на протяжении всего периода исследования (рис. 1). Наиболее значимое влияние удобрений на величину надземной массы сорняков в пересчете на 1 экз./м<sup>2</sup> приходилось на 2013 г., который по своему гидротермическому режиму оказался наиболее благоприятным для роста и развития как культурных, так и сорных растений. Обратная ситуация отмечена в 2018 г. в условиях повышенного температурного режима.

В посевах рапса ярового усредненная величина массы одного сорного растения на момент уборки урожая возрастала с 0.88 (неудобренный вариант) до 2.00 г (высокоудобренный), ячменя ярового – с 0.53 до 1.27 г, ржи озимой – с 0.22 до 0.35 г, картофеля – с 0.93 до 1.24 г. Густота сорных растений в полях многолетних трав 1-го года пользования и фитомасса сорняков в полях многолетних трав 2-го года пользования снижались

**Таблица 5.** Влияние длительного применения минеральных удобрений на засоренность культур зерноотравно-пропашного севооборота

Культура	Показатель засоренности	Дозы минеральных удобрений			HCP <sub>05</sub>
		N0P0K0	N65P50K50	N100P75K75	
Люпин узколистный	Видовое обилие, видов/м <sup>2</sup>	6.4	7.0	6.8	1.2
	Численность, экз./м <sup>2</sup> (3 настоящих листа)	278	376	368	93
	Фитомасса, г/м <sup>2</sup> (перед дискованием)	278	301	308	54
Рожь озимая	Видовое обилие, видов/м <sup>2</sup>	9.1	8.6	8.0	1.0
	Численность, экз./м <sup>2</sup> (фаза выхода в трубку)	152	270	279	46
	Фитомасса, г/м <sup>2</sup> (полная спелость)	93	69	81	24
Ячмень яровой	Видовое обилие, видов/м <sup>2</sup>	9.4	9.4	8.4	0.6
	Численность, экз./м <sup>2</sup> (фаза кущения)	392	498	466	51
	Фитомасса, г/м <sup>2</sup> (полная спелость)	194	273	303	43
Многолетние травы 1 г.п.	Видовое обилие, видов/м <sup>2</sup>	3.8	3.8	2.7	0.5
	Численность, экз./м <sup>2</sup> (отрастание)	191	118	73	56
	Фитомасса, г/м <sup>2</sup> (перед скашиванием)	51	56	58	21
Многолетние травы 2 г.п.	Видовое обилие, видов/м <sup>2</sup>	3.1	3.1	2.6	0.9
	Численность, экз./м <sup>2</sup> (отрастание)	117	119	135	66
	Фитомасса, г/м <sup>2</sup> (перед скашиванием)	74.0	62.2	27.7	9.0
Картофель	Видовое обилие, видов/м <sup>2</sup>	19.7	18.5	19.3	0.9
	Численность, экз./м <sup>2</sup> (7–10 сут после посадки)	117	157	187	31
	Фитомасса, г/м <sup>2</sup> (перед десикацией)	256	256	169	99
Рапс яровой	Видовое обилие, видов/м <sup>2</sup>	9.7	9.1	9.1	0.6
	Численность, экз./м <sup>2</sup> (2–4 настоящих листа)	220	239	227	22
	Фитомасса, г/м <sup>2</sup> (полная спелость)	241	383	375	95

по мере возрастания дозы внесения минеральных удобрений (табл. 5). Это было связано с особенностями засоренности сеянных травостоев многолетних трав, согласно которым доля многолетних сорных растений в общей структуре возрастала до 16.5–18.3%. При этом основное их количество произрастало в неудобренном варианте, создавая то самое преимущество над удобренными вариантами. Также можно отметить, что наиболее высокие показатели видового обилия фиксировались в неудобренном варианте, наименее – в высокоудобренном.

Достоверное увеличение надземной массы и высоты растений под действием минеральных удобрений можно констатировать для таких видов сорняков как марь белая, фиалка полевая, пырей ползучий, бородавник обыкновенный,

осот полевой. Отзывчивость на внесение удобрений других видов сорных растений проявлялась слабее, что можно было фиксировать величинами индивидуальных показателей их развития, не имевшими достоверных различий с неудобренным вариантом (табл. 6).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ полученных данных показал, что действие минеральных удобрений в длительном стационарном опыте распространялось на количественную составляющую и структуру засоренности полей зерноотравнопропашного севооборота, а также индивидуальные показатели развития сорных растений и не распространялось на видовой состав сорной растительности. Засоренность полей многолетними

**Таблица 6.** Влияние длительного применения минеральных удобрений на индивидуальные показатели развития массовых видов сорных растений в зернотравнопропашном севообороте

Вид	Показатель	Дозы минеральных удобрений			НСР <sub>05</sub>
		N0P0K0	N65P50K50	N100P75K75	
Марь белая	г/растение	0.27	0.73	1.63	0.30
	см/растение	10.2	17.2	22.8	1.9
Фиалка полевая	г/растение	0.29	0.59	0.61	0.14
	см/растение	17.6	27.6	27.8	3.3
Пастушья сумка обыкновенная	г/растение	0.26	0.30	0.31	0.14
	см/растение	14.1	19.2	20.0	4.8
Пикульники	г/растение	1.37	3.73	4.09	1.01
	см/растение	21.9	35.7	38.9	6.0
Торица полевая	г/растение	0.62	1.21	0.76	0.38
	см/растение	19.0	24.9	22.6	2.5
Дымянка аптечная	г/растение	1.50	1.80	0.68	0.80
	см/растение	20.6	42.3	29.7	7.2
Ромашка непахучая	г/растение	0.63	0.58	1.18	0.85
	см/растение	12.2	17.5	20.9	5.3
Редька дикая	г/растение	5.79	6.14	6.55	4.3
	см/растение	42	39	30	11
Пырей ползучий	г/растение	1.19	1.69	2.19	0.35
	см/растение	37.9	53.2	54.7	5.7
Щавель малый	г/растение	0.93	0.61	0.72	0.26
	см/растение	10.1	10.8	7.9	1.7
Бородавник обыкновенный	г/растение	0.40	0.65	1.12	0.47
	см/растение	19.9	27.4	26.6	6.4
Осот полевой	г/растение	3.07	8.49	5.59	4.42
	см/растение	18.3	31.3	24.8	8.1
Незабудка полевая	г/растение	0.66	0.58	0.75	0.44
	см/растение	16.5	18.8	21.0	6.2

двудольными видами сорных растений и их относительное обилие снижались, малолетними двудольными видами – увеличивались. Отзывчивыми на внесение минеральных удобрений оказались марь белая и пикульники, тогда как торица полевая и редька дикая преимущественно произрастали в неудобренном варианте, где кислотность почвы имела более высокие показатели.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Полин В.Д.* Влияние севооборота и удобрений на засоренность посадок картофеля и посевов озимой ржи // *Агро XXI*. 2009. № 4–6. С. 8–10.
2. *Конова А.М., Самойлов Л.Н., Державин Л.М.* Эффективность комплексного применения удобрений и пестицидов на озимой ржи в полевом севообороте // *Агрохимия*. 2012. № 3. С. 13–24.
3. *Фомин Д.С., Ямалтдинова В.Р., Тетерлев И.С.* Влияние вида пара и фона питания на засоренность посевов и продуктивность севооборотов // *Пермск. аграрн. вестн.* 2016. № 4 (16). С. 55–60.
4. *Иванов А.И., Фесенко М.А., Вертебный В.Е., Дубовицкая В.И.* Результаты и развитие исследований в многолетнем стационарном полевом опыте в семипольном севообороте // *Агрофизика*. 2012. № 3. С. 50–57.
5. *Шпанев А.М., Фесенко М.А., Смур В.В.* Эффективность применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в полевом севообороте на Северо-Западе РФ // *Агрохимия*. 2021. № 1. С. 12–22.
6. *Зубков А.Ф.* Методические указания по сбору полевой биоценологической информации с целью оценки вредности комплекса вредных организмов. Л.: ВИЗР, 1978. 18 с.
7. *Sorensen T.* A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of spe-

- cies content and its application to analysis of the vegetation on Danish commons // *Biol. Skrifter*. 1948. № 5. P. 1–34.
8. Шорыгин А.А. Питание, избирательная способность и пищевые взаимоотношения некоторых *Goobiidae* Каспийского моря // *Зоол. журн.* 1939. Т. 18. Вып. 1. С. 27–51.
  9. Труфанов А.М., Воронин А.Н., Исаичева У.А., Кононова М.К. Фитосанитарное состояние посева ярового рапса при применении ресурсосберегающих агротехнологий // *Вестн. АПК Верхневолжья*. 2015. № 1 (29). С. 22–25.
  10. Турусов В.И., Гармашов В.М., Корнилов И.М., Нужная Н.А., Гаврилова С.А. Влияние системы обработки почвы, удобрений, гербицида и регулятора роста на сорный компонент в посевах озимой пшеницы // *Защита и карантин раст.* 2015. № 12. С. 26–28.
  11. Шпанев А.М., Фесенко М.А. Влияние минерального питания на фитосанитарную обстановку в посевах ярового рапса на Северо-Западе РФ // *Агрохимия*. 2022. № 8. С. 44–50.
  12. Дудкин И.В. Научное обоснование приемов и систем регулирования засоренности посевов сельскохозяйственных культур в ландшафтном земледелии лесостепи Центрального Черноземья: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Курск, 2009. 38 с.
  13. Дудкин И.В., Дудкина Т.А. Влияние севооборотов на засоренность посевов // *Земледелие*. 2013. № 8. С. 40–42.
  14. Смук В.В., Шпанев А.М. Засоренность посадок картофеля, размещенных по пласту многолетних трав в Ленинградской области // *Вестн. защиты раст.* 2016. № 2 (88). С. 38–42.
  15. Титова Е.М., Внукова М.А. Эффективность комплексного применения удобрений и гербицида Димесол в посевах ярового ячменя // *Вестн. Орел-ГАУ*. 2012. № 2. С. 32–35.
  16. Вьюгин С.М., Вьюгина Г.М. Регулирование фитосанитарного состояния агроценозов // *Земледелие*. 2015. № 12. С. 26–28.
  17. Шпанев А.М., Смук В.В., Фесенко М.А. Фитосанитарный эффект применения минеральных удобрений на посадках картофеля в Северо-Западном регионе // *Агрохимия*. 2017. № 12. С. 38–45.

## Influence of Long-Term Use of Mineral Fertilizers on Weed Infestation of Grain-Grass-Rowed Crop Rotation

A. M. Shpanev<sup>a,b,#</sup>, V. V. Smuk<sup>a,b</sup>, and M. A. Fesenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Agrophysical Research Institute*

*Grazhdanskiy prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia*

<sup>b</sup>*All-Russian Institute of Plant Protection*

*shosse Podbel'skogo 3, Saint-Petersburg–Pushkin 196608, Russia,*

<sup>#</sup>*E-mail: ashpanev@mail.ru*

In a long-term study in a long-term stationary experiment, it was revealed that the effect of mineral fertilizers extended to the quantitative composition and structure of the contamination of fields of grain-grass crop rotation, but not to the species composition of weed vegetation. Under the influence of mineral fertilizers, the height and weight of weeds increased, but their number decreased during the period of co-growth with cultivated plants during the growing season (by 12.0–22.6%). In the absence of a pronounced competitiveness of cultivated plants in the non-manueverable version of the experiment, the weeds from the spring period to the harvest increased by 47%. The contamination of fields with perennial dicotyledonous weed species and their relative abundance in fertilized variants decreased by 2.4–3.6 times, and with small-year dicotyledonous species increased by 1.3–1.4 times. White marjoram and pickles turned out to be responsive to the application of mineral fertilizers, while field thoric and wild radish mainly grew in an untreated version, where the acidity of the soil had higher indicators.

*Keywords:* long-term stationary experience, grain-grass-row crop rotation, infestation of fields, species composition, species abundance, dynamics of the number of weeds.

УДК 631.82:631.816.355:633.521

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕКОРНЕВОЙ ПОДКОРМКИ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА ПРЕПАРАТОМ КОНТРОЛФИТ-Si НА РАЗНЫХ ФОНАХ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ<sup>1</sup>

© 2023 г. А. М. Конова<sup>1</sup>, А. Ю. Гаврилова<sup>1,\*</sup>, Н. Е. Самсонова<sup>2</sup><sup>1</sup>Федеральный научный центр лубяных культур

Комсомольский проспект, 17/56, Тверь 170041, Россия

<sup>2</sup>Смоленская государственная сельскохозяйственная академия

ул. Большая Советская, 10/2, Смоленск 214000, Россия

\*E-mail: augavrilova@gmail.com

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Изучили отзывчивость льна-долгунца на минеральные удобрения и некорневую подкормку водным раствором препарата Контролфит-Si на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве. Показано, что реакция льна-долгунца на минеральные удобрения зависела от гидротермических условий внешней среды, доз и соотношения питательных элементов. Избыточная влажность и засушливые условия отрицательно сказались на продуктивности посевов. Некорневая подкормка растений препаратом Контролфит-Si нивелировала негативное влияние неблагоприятных погодных условий, повысила отзывчивость растений на минеральные удобрения, способствовала более полному использованию питательных элементов из удобрений. В среднем за 3 года на фонах полного минерального удобрения подкормка на 25–30% повысила урожайность льносоломой с лучшим эффектом на фоне N48P48K48 (4.03 т/га). На урожайности льносемян подкормка положительно не отразилась. На формирование 1 т урожая льносоломой с соответствующим количеством семян вне зависимости от условий питания растений потребовалось 13.8 кг N, 5.9 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и 10.7 кг K<sub>2</sub>O.

**Ключевые слова:** лен-долгунец, минеральные удобрения, некорневая подкормка, препарат Контролфит-Si, урожайность, вынос питательных элементов.

**DOI:** 10.31857/S0002188123120074, **EDN:** SJSCL

### ВВЕДЕНИЕ

Лен-долгунец (*Linum usitatissimum* L.) является одной из важнейших технических культур России и имеет практически неограниченный рынок сбыта. Имея слаборазвитую корневую систему и короткий период активного поглощения питательных элементов (бутонизация—цветение), лен предъявляет высокие требования к пищевому режиму почвы. Поэтому вопросы совершенствования технологии его выращивания в части формирования оптимальных условий питания являются актуальными.

Основные районы возделывания льна-долгунца расположены в зоне дерново-подзолистых почв, характеризующихся повышенной кислотностью и невысоким естественным плодородием.

Частой причиной снижения урожайности являются засухи, частота проявления которых в последние десятилетия растет, или избыток осадков, особенно опасный после цветения льна. В этих условиях актуален поиск путей снижения негативного воздействия на растения внешних факторов и стабилизации продукционного процесса. Одним из них является использование минеральных удобрений.

На формирование 1 т льноволокна с учетом побочной продукции требуется 70–80 кг N, 25–30 кг – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и 90–104 кг – K<sub>2</sub>O. Соотношение питательных элементов в минеральных удобрениях зависит от плодородия почвы. По данным Кошелевой [1], высокая продуктивность фотосинтеза отмечена при удобрении льна с соотношением удобрений N : P : K = 1 : 2 : 3, по другим сведениям лучшим оказалось соотношение N : P : K = 1 : 1.5 : 2 [2], комплексное удобрение с выравненным соотношением (1 : 1 : 1) было менее эффектив-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания ФГБНУ “Федеральный научный центр лубяных культур” (тема № FGSS-2019-0011).

ным, чем смесь удобрений с соотношением 1 : 2 : 4 [3].

Из питательных элементов наибольшее влияние на повышение устойчивости растений к неблагоприятным факторам среды оказывает калий. Он способствует образованию более плотных лубяных пучков, уменьшает длину междоузлий, у клеток склеренхимы и паренхимы образуются утолщенные стенки с более высоким содержанием лигнина. Это повышает устойчивость растений к полеганию, поражению болезнями и вредителями. Калий защищает растения от негативного воздействия перепадов температур и дефицита влаги.

Фосфор в растениях принимает участие в фотосинтезе, дыхании, в целом – в энергетическом обмене. Он усиливает способность клеток удерживать влагу, повышая устойчивость растений к засухе и низким температурам, усиливает рост корней и способствует созданию цветочных почек.

Что касается азота, то его избыток снижает механическую прочность тканей, вызывает полегание растений, способствует повреждению растений вредителями и болезнями, ухудшает качество продукции.

В настоящее время все большее внимание уделяют исследованиям, посвященным использованию соединений кремния при выращивании сельскохозяйственных культур. Показано, что Si разносторонне влияет на физиолого-биохимические процессы в растениях, обеспечивает защиту от стрессов абиотической (радиации, нарушения минерального питания, засухи, засоления, загрязнения тяжелыми металлами, высоких и низких температур и др.) и биотической природы (бактериальных и грибковых заболеваний, поражения вредителями) и способствует продукционному процессу в целом [4–9]. В случае нехватки Si растения чаще проявляют нарушения роста и развития.

Кремний-опосредованные механизмы защиты растений при неблагоприятных условиях роста включают повышение водоудерживающей способности растительных тканей, изменение структуры и снижение недостатка воды в клетках [12], усиление активности антиоксидантных ферментов [10] и синтеза эндогенных фитогормонов [11]. Кремний способствует фотосинтезу [13–15], оказывает положительное влияние на синтез углеводов, белков, хлорофилла [6, 16], улучшает усвоение и обмен азота и фосфора в тканях растений [17].

По запасам в почве Si занимает 2-е (после кислорода) место, однако содержание его подвижных форм не превышает 1–3% общих запасов или 150–200 мг/кг почвы [18], что сопоставимо с содержанием подвижного фосфора и калия. Отчуждение Si из пахотного слоя за счет выноса урожаями (30–700 кг/га по данным ФАО, по другим данным – 50–200 кг/га [19]) и выщелачивания в мировой океан (до 300 тыс. т в год [20]) при практическом отсутствии промышленных кремниевых удобрений приводит к формированию его отрицательного баланса (до 6–20 кг/га) [21]. Это может являться ограничивающим фактором формирования высоких урожаев, особенно при неблагоприятных условиях внешней среды.

Поступление Si в растения может осуществляться не только через корень, но и через лист. О высокой эффективности листового питания растений накоплено немало фактов. Например, обработка растений риса водным раствором силиката натрия привела к повышению продуктивности метелок, массы 1000 зерен, урожайности зерна и содержания в нем крахмала [22], повысила устойчивость к засухе чувствительных к ней сортов пшеницы [23], значительно снизила распространение мучнистой росы [24]. Использование этого приема привело к повышению содержания питательных веществ в плодах яблони [25], росту урожайности и качества плодов финиковой пальмы [26], к снижению поражения растений бобов белой плесенью [27], повышению устойчивости растений винограда к холоду [28]. Приведены сведения о защитном от болезней действии листовой обработки растворами силикатов калия и натрия растений огурца, кабачка, тыквы, винограда, земляники, риса, сои, пшеницы, стручкового перца; о положительном влиянии на урожайность и качество плодов манго, финиковой пальмы, винограда, репчатого лука [29]. По данным [30], некорневая подкормка растений льна растворами силикатов натрия и магния улучшила их питательный статус по сравнению с контрольными растениями и увеличила выход соломы и масла.

В России для использования в листовом питании растений Si изучают препараты Силактив, Силиплант, Келик-К-Si, Квантум-аквасил, Контролфит-Si [31–33]. Отмечено их положительное влияние на фотосинтез, активность антиоксидантных ферментов, устойчивость растений к засухе, урожайность и качество продукции. Однако сведения не всегда однозначны, что может быть связано с видовыми и сортовыми особенностями культур и различиями внешних условий. Очень мало сведений о результативности листовой под-

кормки Si посевов льна-долгунца и о связи ее с уровнем минерального питания растений.

Цель работы – установить действие минеральных удобрений и некорневой подкормки растений льна-долгунца препаратом контролфит-Si на величину урожая, содержание и вынос основных питательных элементов.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой опыт с новым сортом льна-долгунца Феникс проведен на базе обособленного подразделения Смоленский НИИСХ ФНЦ ЛК в 2019–2021 гг. Сорт выведен в Федеральном научном центре лубяных культур, в 2018 г. включен в государственный реестр Центрального и Северо-Западного регионов РФ. Является позднеспелым, высокопродуктивным, устойчивым к полеганию, не склоненным к осыпанию семян. В слабой степени поражается грибными болезнями.

Двухфакторный эксперимент (фактор А – минеральные удобрения, фактор В – некорневая подкормка) проводили в трехкратной повторности. Размещение делянок рендомизированное. Площадь делянки – 32 м<sup>2</sup>. Предшественником льна была горчица после подъема залежи. В опыте вносили АФК (16 : 16 : 16), N<sub>аа</sub> (34.5%), P<sub>сд</sub> (42%) и K<sub>х</sub> (56%). Водный раствор препарата Контролфит-Si применяли в качестве подкормки растений в фазе “елочки” на всех фонах минерального питания в дозе 1.1 л/га с расходом рабочего раствора из расчета 300 л/га. Схема опыта приведена в таблицах.

Контролфит-Si – раствор, содержащий 17% водорастворимого Si и 7% K<sub>2</sub>O, pH 11.0–11.5. Страна-производитель – Испания. С использованной дозой препарата на растения попало 220 г Si/га и 90 г K<sub>2</sub>O/га.

Почва, на которой проводили опыт, была определена как дерново-подзолистая среднесуглинистая, слабокислая (рН<sub>KCl</sub> 5/4) с низким содержанием углерода (по Тюрину) (С – 2/0%), повышенным содержанием (по Кирсанову) – подвижных форм P (142 мг/кг), средним – K (98 мг/кг) и средним уровнем дефицита доступного растениям Si (337 мг/кг) [34].

Норма высева семян льна – 60 кг/га. Способ посева – узкорядный. Учет урожая проведен сплошным методом. Для оценки достоверности различий полученные результаты обрабатывали методом дисперсионного анализа при помощи программы STRAZ.

После разложения растительных проб методом мокрого озоления по Гинзбург образцы ана-

лизировали на содержание фосфора по методу Мерфи–Райли, калия – методом пламенной фотометрии и азота – по методу Чмелевой–Тютерева [35].

Лен-долгунец – культура умеренного климата, любит рассеянный свет, облачность. Он лучше удается в местах с умеренно теплой, скорее прохладной погодой. Это влаголюбивое растение, особенно в период от всходов до фазы бутонизации. При температуре воздуха >22°C в сочетании с дефицитом осадков рост растений угнетен, усиливается ветвление стеблей и ухудшается качество волокна, а в условиях засухи резко снижается высота растений, усиленно развивается ксилема, снижается качество и выход волокна. Избыточное количество осадков, особенно после цветения, когда лен мало расходует воды, способствует полеганию растений, повреждению болезнями, ведет к снижению величины и качества урожая волокна и семян.

Агрометеорологические условия вегетационных периодов 2019–2021 гг. существенно различались (табл. 1).

Сумма активных температур за май–сентябрь в 2019 г. была на 6.5% меньше среднееголетних показателей, особенно прохладно было в июле и августе (на 1.5–2.0°C ниже климатической нормы). Недобор осадков составил 22%, однако характер их распределения по месяцам в целом соответствовал норме.

Весенне-летний период 2020 г. при близком к среднееголетнему температурному режиму оказался избыточно влажным: сумма осадков на 23% превысила норму, гидротермический коэффициент (ГТК) в июне соответствовал избыточному увлажнению, в июле – зоне дренажа.

В 2021 г. июнь и июль (наиболее ответственный за водопотребление период развития льна) оказались критически засушливыми месяцами (почти 2-кратный недобор осадков), при этом среднемесячная температура воздуха была на 2.5–3.7°C выше климатической нормы. В июле величина ГТК составила 0.78, что свидетельствовало о засухе, отрицательно повлиявшей на формирование плодов и семян. Таким образом, по сочетанию температурного режима воздуха и влагообеспеченности растений, более благоприятным для развития льна-долгунца оказался 2019 г.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внесение NPK, а также метеорологические условия значительно повлияли на урожайность соломы и семян льна-долгунца (табл. 2). В усло-

**Таблица 1.** Агрометеорологические условия вегетационных периодов 2019–2021 гг.

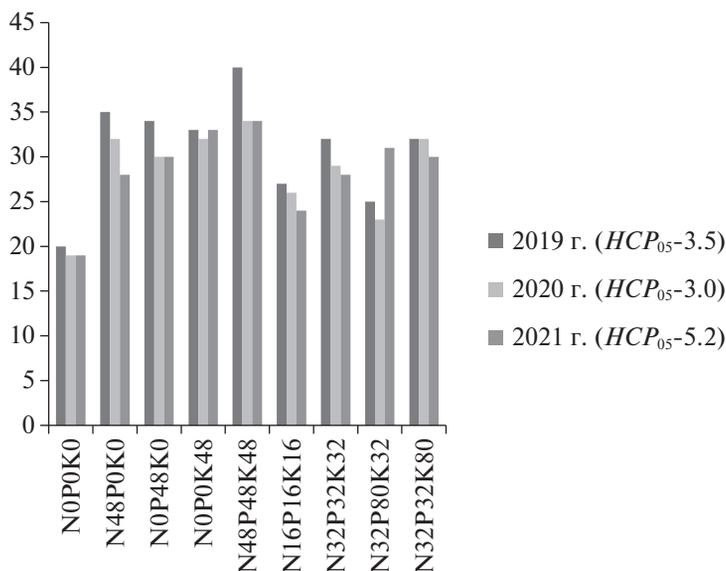
Месяц	Температура воздуха, °С				Сумма осадков, мм			
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Средне-многолетняя	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Средне-многолетняя
Май	14.0	10.2	12.1	13.1	80	118	90	95
Июнь	19.0	18.5	19.1	16.6	62	93	69	99
Июль	15.3	16.7	21.1	17.4	62	130	42	107
Август	15.5	16.6	17.2	17.0	93	90	139	69
Сентябрь	11.3	13.3	9.1	12.3	34	82	112	56
Показатель					2019 г.	2020 г.	2021 г.	Среднее
ГТК по Селянинову (июнь/июль)					1.08/1.30	1.62/2.51	1.09/0.78	1.26/1.53
Количество дней с осадками >1 мм (июнь + июль)					38	40	25	34
Σ t° июнь/июль					570/474	573/518	633/533	592/508

**Таблица 2.** Влияние минеральных удобрений и некорневой подкормки растений препаратом Контролфит-Si на урожайность соломы и семян льна-долгунца, т/га

Вариант	Без подкормки				С подкормкой			
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Среднее	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Среднее
<b>Солома</b>								
N0P0K0	3.28	1.37	1.00	1.88	3.28	1.37	1.43	2.02
N48P0K0	3.05	2.00	1.10	2.05	3.14	1.98	1.44	2.18
N0P48K0	3.36	2.60	0.98	2.31	3.38	2.39	1.51	2.43
N0P0K48	3.00	2.00	0.90	1.97	3.40*	2.48*	1.59	2.49
N48P48K48 (1 : 1 : 1)	5.91	2.74	0.98	3.21	6.88*	3.02*	2.18	4.03
N16P16K16 (1 : 1 : 1)	3.64	2.51	0.90	2.35	4.22*	2.72*	2.02	2.99
N32P32K32 (1 : 1 : 1)	3.76	2.65	0.90	2.43	4.56*	2.88*	2.07	3.17
N32P80K32 (1 : 2.5 : 1)	3.96	3.25	0.88	2.70	4.21*	3.36	2.18	3.25
N32P32K80 (1 : 1 : 2.5)	3.97	3.29	0.98	2.75	4.68*	3.48*	2.24	3.47
<i>HCP</i> <sub>05</sub>								
Фактор А – удобрения					0.46	0.18	0.25	
Фактор Б – подкормка					0.15	0.12	0.25	
<b>Семена</b>								
N0P0K0	0.46	0.30	0.30	0.35	0.46	0.30	0.23	0.33
N48P0K0	0.69	0.44	0.33	0.48	0.60	0.42	0.28	0.43
N0P48K0	0.53	0.42	0.36	0.44	0.56	0.40	0.26	0.41
N0P0K48	0.54	0.45	0.49	0.49	0.57	0.47	0.28	0.44
N48P48K48 (1 : 1 : 1)	0.67	0.65	0.62	0.64	0.71	0.68	0.33	0.57
N16P16K16 (1 : 1 : 1)	0.51	0.44	0.32	0.42	0.54	0.45	0.26	0.42
N32P32K32 (1 : 1 : 1)	0.61	0.48	0.41	0.50	0.65	0.50	0.32	0.49
N32P80K32 (1 : 2.5 : 1)	0.48	0.51	0.40	0.46	0.52	0.52	0.34	0.46
N32P32K80 (1 : 1 : 2.5)	0.58	0.49	0.37	0.48	0.64	0.53	0.43	0.53
<i>HCP</i> <sub>05</sub>								
Фактор А – удобрения					0.06	0.09	0.08	
Фактор Б – подкормка					0.02	0.03	0.02	

виях благоприятного по погодным условиям 2019 г. урожайность соломы была в 1.2–2.4 раза больше, чем в избыточно влажном и более жарком 2020 г. и в 2.8 раза больше, чем в 2021 г., ха-

рактеризовавшимся существенным недобором осадков и высокой температурой воздуха в июне–июле. Во все годы самой высокой она была при внесении полного минерального удобрения с



**Рис. 1.** Влияние погодных условий на число коробочек льна на разных фонах минерального питания, шт./10 растений. По оси ординат – число коробочек с 10 растений (шт.), по оси абсцисс – варианты опыта. То же на рис. 2.

суммарной дозой 144 кг д.в./га: N48P48K48 (1 : 1 : 1), N32P80K32 (1 : 1.5 : 1) и N32P32K80 (1 : 1 : 1.5).

Положительное влияние на урожайность льносоломки оказала листовая подкормка растений препаратом Контролфит-Si. Особенно заметным оно было в жарком и засушливом 2021 г.: по сравнению с соответствующими вариантами без подкормки она выросла в 1.3–2.4 раза, причем это влияние проявилось во всех вариантах. Это согласовалось с известными в литературе сведениями о защитной роли кремния при действии неблагоприятных абиотических факторов.

Высокий эффект от подкормки был и в благоприятном по погодным условиям 2019 г.: прибавка урожая соломы достигла 6–21%, при этом эффект отсутствовал в контроле и в вариантах с внесением одного азота или фосфора. В этих же вариантах подкормка не проявилась и в избыточно влажном 2020 г., в остальных вариантах минерального питания она составила 6–24%, кроме варианта N32P80K32, где эффект отсутствовал.

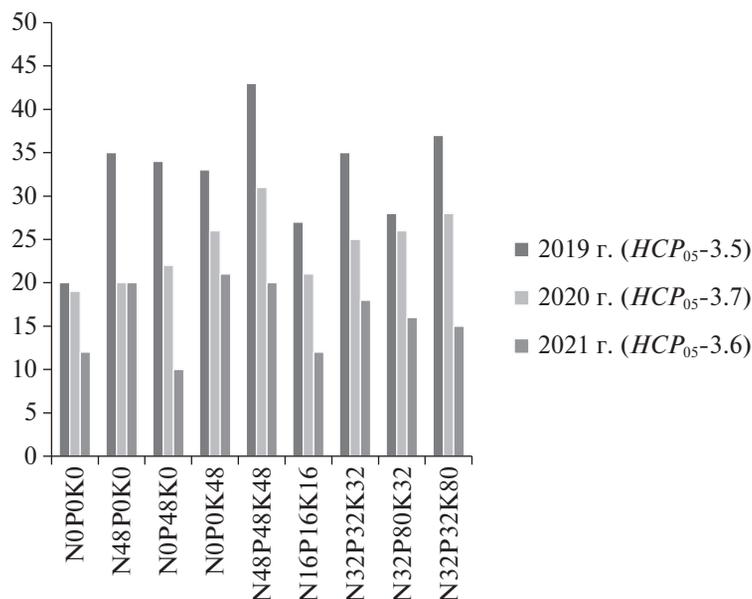
В среднем за 3 года на фоне сбалансированного питания растений, а также в варианте N0P0K48 подкормка обеспечила рост урожайности льносоломки на 20–30%. При внесении только азотного или фосфорного удобрения, а также в варианте без удобрений эффект подкормки был очень слабым.

Урожайность семян льна-долгунца в среднем за 3 года при внесении удобрений повысилась на 20–82% по отношению к контролю без удобрений (табл. 2) с максимальным эффектом в вари-

анте N48P48K48. Зависимость выхода семян от погодных условий была такой же как и льносоломки: больший эффект от удобрений получен в 2019 г., самый низкий (более чем в 3 раза) – в 2021 г. с засушливыми условиями в период завязывания плодов и семян. Несмотря на различия погодных условий, во все годы урожайность семян была больше при внесении N48P48K48.

Действие некорневой подкормки растений на формирование урожайности семян льна-долгунца существенно зависело от погодных условий. В 2019 г. с более благоприятными для роста и развития льна-долгунца погодными условиями на всех минеральных фонах, кроме N48P0K0 и контроля, подкормка способствовала достоверному росту урожайности семян. В избыточно влажном 2020 г. она оказалась не эффективной, в 2021 г. с засушливым и жарким июнем и июлем урожайность льносемян от подкормки достоверно снизилась. В этом году на фоне подкормки было сформировано в 1.7–3.0 раза меньше коробочек, чем в соответствующих вариантах без нее (рис. 1, 2), и гораздо меньше, чем в 2019 и 2020 гг. В условиях низкой завязываемости плодов снижалась их акцепторная емкость, и питательные вещества использовались на увеличение массы соломы. В 2021 г. подкормка привела к получению в 1.2–1.8 раза более легковесных семян (табл. 3). В результате в среднем за 3 года некорневая подкормка не изменила или даже снизила их урожайность.

Таким образом, использование кремнийсодержащего препарата Контролфит-Si для листо-



**Рис. 2.** Совместное влияние минеральных удобрений и некорневой подкормки растений препаратом Контролфит-Si на формирование коробочек льна в разные по погодным условиям годы, шт./10 растений.

вой подкормки растений льна-долгунца на всех фонах сбалансированного минерального питания позволило получить более высокую урожайность льносолумы и повысить устойчивость рас-

тений к неблагоприятным факторам среды выращивания.

Коэффициент отзывчивости льна-долгунца на удобрение и подкормку, определенное как отно-

**Таблица 3.** Изменение массы 1000 семян льна-долгунца в зависимости от условий минерального питания, г

Вариант	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Среднее за 2019–2021 гг.
Без подкормки				
N0P0K0	5.3	4.3	4.2	4.6
N48P0K0	5.5	4.8	4.4	4.9
N0P48K0	5.4	4.7	4.5	4.8
N0P0K48	5.4	4.7	4.6	4.9
N48P48K48 (1 : 1 : 1)	5.6	5.2	5.0	5.2
N16P16K16 (1 : 1 : 1)	5.4	4.7	4.6	4.9
N32P32K32 (1 : 1 : 1)	5.5	5.0	4.8	5.1
N32P80K32 (1 : 2.5 : 1)	5.2	5.1	4.9	5.0
N32P32K80 (1 : 1 : 2.5)	5.5	5.2	4.9	5.2
С подкормкой				
N0P0K0	5.3	4.3	3.1	4.2
N48P0K0	5.4	4.7	3.7	4.6
N0P48K0	5.5	4.5	3.6	4.5
N0P0K48	5.4	4.8	3.8	4.7
N48P48K48 (1 : 1 : 1)	5.7	5.4	4.2	5.1
N16P16K16 (1 : 1 : 1)	5.4	4.6	3.3	4.4
N32P32K32 (1 : 1 : 1)	5.6	5.0	3.5	4.7
N32P80K32 (1 : 2.5 : 1)	5.3	5.1	4.1	4.8
N32P32K80 (1 : 1 : 2.5)	5.6	5.2	3.9	4.9
<i>HCP</i> <sub>05</sub>				
Фактор А – удобрения	0.3	0.3	0.6	0.2
Фактор Б – подкормка	0.1	0.1	0.2	0.1

**Таблица 4.** Коэффициент отзывчивости льна-долгунца на минеральные удобрения и некорневую подкормку препаратом Контролфит-Si

Вариант	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Среднее за 2019–2021 гг.
Удобрения				
N48P0K0	1.00	1.46	1.10	1.18
N0P48K0	1.04	1.80	1.03	1.28
N0P0K48	0.95	1.47	1.07	1.14
N48P48K48 (1 : 1 : 1)	1.76	2.03	1.23	1.79
N16P16K16 (1 : 1 : 1)	1.11	1.77	1.94	1.29
N32P32K32 (1 : 1 : 1)	1.17	1.87	1.00	1.36
N32P80K32 (1 : 2.5 : 1)	1.19	2.25	0.98	1.47
N32P32K80 (1 : 1 : 2.5)	1.22	2.26	1.04	1.50
Удобрения + подкормка				
N48P0K0	1.00	1.44	1.32	1.17
N0P48K0	1.05	1.67	1.36	1.27
N0P0K48	1.06	1.77	1.44	1.31
N48P48K48 (1 : 1 : 1)	2.03	2.21	1.93	2.06
N16P16K16 (1 : 1 : 1)	1.27	1.90	1.75	1.57
N32P32K32 (1 : 1 : 1)	1.39	2.02	1.84	1.64
N32P80K32 (1 : 2.5 : 1)	1.26	2.32	1.94	1.66
N32P32K80 (1 : 1 : 2.5)	1.42	2.40	2.05	1.79

шение полезной биомассы растений (солома + семена) удобренных вариантов к контролю зависел от суммарной дозы, соотношения элементов в удобрении и погодных условий (табл. 4). Наибольший коэффициент отмечен в 2020 г., характеризовавшемся избытком осадков, хотя общая урожайность полезной биомассы была больше в 2019 г. В условиях 2021 г. с засухой и высокими температурами воздуха в июне и июле наблюдали слабую реакцию растений на внесение минеральных удобрений, а в сочетании с некорневой подкормкой — существенно больше.

Некорневая подкормка во все годы опыта способствовала росту отзывчивости растений на минеральные удобрения, особенно при совместном внесении азота, фосфора и калия. При росте дозы эффект усиливался и достиг максимума в варианте N48P48K48. При использовании такой же суммарной дозы питательных элементов, но при других соотношениях (1 : 2.5 : 1 и 1 : 1 : 2.5) в среднем за 3 года отмечен более низкий коэффициент отзывчивости льна-долгунца на подкормку и удобрение.

Относительное содержание питательных элементов в соломе и семенах льна практически не зависело от условий минерального питания, некорневой подкормки и погодных условий, что указывало на преимущественно генетически обу-

словленный контроль химического состава тканей растений. Можно лишь отметить рост содержания азота в семенах льна при применении минеральных удобрений (табл. 5). Содержание азота, фосфора и калия в сухой массе семян в среднем было равно 4.40, 1.02 и 0.80% соответственно, соломы — 0.62, 0.43 и 0.94% соответственно.

Потребность растений в элементах питания тесно коррелировало с их выносом урожаем, который определялся, в первую очередь, величиной урожая, а также содержанием элементов в растительных тканях. В среднем за 3 года опыта наибольший вынос питательных элементов урожаем льна-долгунца (семена + солома) был в варианте N48P48K48 как без подкормки, так и с подкормкой: в 1.9–2.2 раза больше, чем в контроле.

Показано, что для формирования 1 т урожая соломы льна-долгунца сорта Феникс с соответствующим количеством семян в среднем необходимо: N — 13.8, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 5.9 и K<sub>2</sub>O — 10.7 кг. Эти данные могут быть использованы в сортовой агротехнике при расчете доз минеральных удобрений на запланированный урожай.

Некорневая подкормка растений препаратом Контролфит-Si способствовала более полному использованию питательных элементов из удобрений (**КИУ**) (табл. 6).

**Таблица 5.** Содержание азота, фосфора и калия в урожае льна-долгунца (среднее за 2019–2021 гг.)

Вариант	Содержание, % в сухом веществе						Вынос, кг/га		
	семена			солома			семена + солома		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Без подкормки									
N0P0K0	4.00	0.97	0.75	0.58	0.36	0.88	24.9	10.2	19.1
N48P0K0	4.28	0.98	0.69	0.62	0.38	0.88	33.2	12.5	21.3
N0P48K0	4.33	0.95	0.80	0.59	0.39	0.89	32.7	13.2	24.1
N0P0K48	4.47	0.99	0.68	0.59	0.40	0.90	33.5	12.8	21.0
N48P48K48 (1 : 1 : 1)	4.40	0.98	0.68	0.62	0.42	0.98	49.5	19.8	35.9
N16P16K16 (1 : 1 : 1)	4.36	0.96	0.72	0.59	0.39	0.92	32.2	13.2	24.6
N32P32K32 (1 : 1 : 1)	4.38	1.00	0.83	0.62	0.42	0.93	37.0	15.2	26.8
N32P80K32 (1 : 2.5 : 1)	4.40	1.08	0.84	0.64	0.42	0.92	37.5	16.3	28.7
N32P32K80 (1 : 1 : 2.5)	4.42	1.04	0.89	0.64	0.43	0.94	38.8	16.8	30.2
Вынос 1 т соломы с соответствующим количеством семян							14.7	6.0	10.7
С подкормкой Контролфит-Si									
N0P0K0	4.02	0.98	0.76	0.59	0.37	0.90	25.2	10.7	20.7
N48P0K0	4.30	0.99	0.71	0.62	0.39	0.90	32.0	12.8	22.7
N0P48K0	4.34	0.96	0.82	0.60	0.40	0.90	32.4	13.6	25.3
N0P0K48	4.48	0.99	0.70	0.60	0.41	0.93	34.6	14.6	26.3
N48P48K48 (1 : 1 : 1)	4.42	0.99	0.71	0.64	0.44	1.00	51.1	23.3	44.4
N16P16K16 (1 : 1 : 1)	4.38	0.97	0.74	0.59	0.40	0.93	35.5	16.1	30.9
N32P32K32 (1 : 1 : 1)	4.40	1.02	0.85	0.64	0.45	0.94	42.0	19.3	34.0
N32P80K32 (1 : 2.5 : 1)	4.42	1.11	0.86	0.65	0.44	0.93	41.4	19.4	34.2
N32P32K80 (1 : 1 : 2.5)	4.44	1.08	0.90	0.66	0.45	0.96	46.4	19.6	38.1
Вынос 1 т соломы с соответствующим количеством семян							13.1	5.7	10.6
Средний вынос 1 т соломы с соответствующим количеством семян							13.8	5.9	10.7

При внесении полного минерального удобрения КИУ азота повысился на 3.4–23.8, фосфора – на 3.9–18, калия – на 9.8–39.3%, причем наибольший эффект отмечен при самой низкой дозе минеральных удобрений (N16P16K16), с ростом

**Таблица 6.** Усвоение льном-долгунцом азота, фосфора и калия из удобрений (среднее за 2019–2021 гг.), %

Вариант	Без подкормки			С подкормкой		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
N48P0K0	17.3	–	–	14.8	–	–
N0P48K0	–	6.3	–	–	7.5	–
N0P0K48	–	–	4.0	–	–	15.0
N48P48K48	51.2	20.0	35.0	54.6	27.3	52.7
N16P16K16	45.6	18.8	34.4	66.2	36.9	73.7
N32P32K32	37.8	15.6	24.1	53.4	28.4	46.5
N32P80K32	39.4	7.6	30.0	51.6	11.5	47.2
N32P32K80	43.4	20.6	13.9	67.2	29.4	23.7

дозы КИУ снижался. Это может быть основанием для использования умеренных доз минеральных удобрений при сочетании их с некорневой подкормкой кремнийсодержащим препаратом. По совокупности изученных показателей (урожайность, коэффициент отзывчивости на удобрения и подкормку, содержание и вынос питательных элементов урожаем, коэффициенты использования NPK из удобрений) в условиях эксперимента лучшим был вариант N48P48K48 + подкормка.

Таким образом, использование препарата Контролфит-Si для некорневой подкормки растений льна-долгунца целесообразно и легко вписывается в технологию его возделывания.

## ВЫВОДЫ

1. Реакция льна-долгунца на минеральные удобрения зависела от гидротермических условий внешней среды, доз и соотношения питательных элементов в удобрении. Избыточная влажность и

засушливые условия отрицательно сказались на продуктивности посевов. Доза минеральных удобрений, соответствующая N48P48K48, имела преимущество: в среднем за 3 года урожайность льносоломки составила 3.2, льносемян — 0.64 т/га.

2. Некорневая подкормка растений препаратом Контролфит-Si нивелировала негативное влияние неблагоприятных погодных условий, повысила отзывчивость растений на минеральные удобрения, способствовала более полному использованию из них питательных элементов. В среднем за 3 года на фонах полного минерального удобрения подкормка на 25–30% повысила урожайность льносоломки с лучшим эффектом на фоне N48P48K48 (4.03 т/га). На урожайности льносемян она положительно не отразилась.

3. На формирование 1 т урожая льносоломки с соответствующим количеством семян вне зависимости от условий минерального питания в среднем было израсходовано: азота — 13.8, фосфора — 5.9 и калия — 10.7 кг. Эти данные могут быть использованы в сортовой агротехнике при расчете доз минеральных удобрений на запланированный урожай льна-долгунца сорта Феникс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошелева Л.Л. Физиология питания и продуктивность льна-долгунца. Минск: Наука и техника, 1980. 37 с.
2. Налиухин А.Н. Эффективность применения азотного удобрения под лен-долгунец в зависимости от фона минерального питания на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве // *Агрохим. вестн.* 2012. № 1. С. 5–7.
3. Сорокина О.Ю. Анализ изменения оптимальных доз минеральных удобрений под лен-долгунец // *Агрохим. вестн.* 2014. № 3. С. 16–19.
4. Самсонова Н.Е. Кремний в растительных и животных организмах // *Агрохимия.* 2019. № 1. С. 86–96. <https://doi.org/10.1134/S0002188119010071>
5. Новикова Н.Е., Самсонова Н.Е. Влияние соединений кремния на процесс прорастания семян гороха и защиту проростков от окислительных повреждений // *Вестн. аграрн. науки.* 2020. № 2. С. 21–28. <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2020.2.21>
6. Самсонова Н.Е., Шупинская И.А., Антонова Н.А. Влияние корневого и фолиарного питания растений минеральными удобрениями и соединениями кремния на показатели фотосинтетической деятельности и урожайность яровой пшеницы // *Агрохимия.* 2017. № 2. С. 11–18.
7. Lux Alexander, Kohanová Jana, Švec Miroslav. Effect of silicon on drought tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L., cv. *Venturero*) // 7-th Inter. Conf. in Silicon in Agricult. *Proced. Abstract.* 2017. P. 70.
8. Shi X., Zhang C., Wang H. and Zhang F. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings // *Plant and Soil.* 2005. V. 272. № 1–2. P. 53–60.
9. Vaculik Marek, Vaculiková Miroslava, Tandy Susan, Luxová Miroslava, Schulín Rainer Silicon-induced alleviation of antimonate (SbV) toxicity in maize // 7-th Inter. Conf. in Silicon in Agricult. *Proced. Abstract.* 2017. P. 61.
10. 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.
11. Слатья И.В., Ложникова В.Н., Кондратьева В.В., Ниловская Н.Т. Действие стресса и соединений кремния на содержание эндогенных фитогормонов и рост ярового ячменя // *Агрохимия.* 2013. № 8. С. 38–48.
12. Самсонова Н.Е., Зайцева З.Ф., Капустина М.В., Антонова Н.А. Влияние соединений кремния и сложного NPK-удобрения на водный режим листьев и урожайность яровой пшеницы // *Агрохимия.* 2014. № 9. С. 58–66.
13. Agarie S., Agata W., Kubota F., Kaufman P.B. Physiological roles of silicon in photosynthesis and dry matter production in rice plants // *Japan J. Crop Sci.* 1992. V. 61. P. 200–206.
14. Kwon T.O., Lee S.B., Lee J.H., Park K.H. The influence of low temperature at the boot stage on yield and nutrient uptake of rice with application of soil improves // *Res. Rep. Rural Develop. Admin. Plant Environ. Microl. & Farm Prod. Util. Korea Rep.* 1989. V. 31. № 1. P. 14–23.
15. Sacala E. Role of silicon in plant resistance to water stress // *J. Elemental.* 2009. № 4. P. 619–630.
16. Матыченков В.В., Кособрюхов А.А., Бочарникова Е.А. Урожайность кукурузы и содержание хлорофилла в растениях при внесении в почву кремниевых удобрений // *Агрохимия.* 2013. № 5. С. 25–30.
17. Самсонова Н.Е., Лякина О.А., Новикова Н.Е. Влияние фосфатов пониженной растворимости и кремния на продуктивность и химический состав сельскохозяйственных культур // *Вестн. ОрелГАУ.* 2010. № 3. С. 12–16.
18. Аммосова Я.М., Балабко П.Н., Матыченков В.В. Кремнезем в системе почва–растение // *Агрохимия.* 1990. № 10. С. 103–108.
19. Casey W.H., Kinrade S.D., Knight C.T.G., Rains D.W., Epstein E. Aqueous silicate complexes in wheat, *Triticum aestivum* L. // *Plant Cell Environ.* 2004. V. 27. P. 51–54.
20. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 262 с.
21. Голованов Д.Л. Кремний — незаменимый микроэлемент питания природных и культурных злаков / Удобрения и химические мелиоранты в агроэкосистемах. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 247–250.
22. Ahmad A., Afzal M., Ahmad A.U.H., Tahir M. Effect of foliar application of silicon on yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.) // *Cercetări Agronomice în Moldova.* 2013. V. 46. № 3 (155). P. 21–28.
23. Maghsoudi K., Emam Y., Ashraf M. Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed

- wheat cultivars differing in drought tolerance // Turk. J. Bot. 2015. V. 39. P. 625–634.
24. *Guével M.H., Menzies J.G., and Bélanger R.R.* Effect of root and foliar applications of soluble silicon on powdery mildew control and growth of wheat plants // Europ. J. Plant Pathol. 2007. V. 119. № 4. P. 429–436.
  25. *Javaid K. and Misgar F.A.* Effect of foliar application of orthosilicic acid on leaf and fruit nutrient content of apple cv. “Red Delicious” // Adv. Res. J. Multidisciplin. Discover. 2017. V. 20. Ch. 7. P. 30–32.
  26. *Moamen M. Al-Wasfy.* Response of sakkoti date palms to foliar application of royal jelly, silicon and vitamins B // J. Amer. 2013. V. 9 (5). P. 315–321.
  27. *Paula Jr T.J., Vieira R.F., Teixeira H., Carneiro J.E.S., Lima R.C., Lehner M.S. and Santos J.* Foliar application of calcium chloride and calcium silicate decreases white mold intensity on dry beans // Tropic. Plant Pathol. 2009. V. 34 № 3. P. 171–174.
  28. *Ghader Habibi.* Effects of soil- and foliar-applied silicon on the resistance of grapevine plants to freezing stress // Acta Biol. Szegedien. 2015. V. 59. № 2. P. 109–117.
  29. *Henk-Maarten Laane.* The Effects of foliar sprays with different silicon // Plants. 2018. V. 7. № 45. P. 1–22. <https://doi.org/10.3390/plants7020045> pp 1-22
  30. *Shedid S.I., Bakri B.A., Nofal O.A.* The reaction of the nutrient content of flax (*Linum usitatissimum* L.) to foliar application of two different sources of silicon fertilizers // Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci. 2016. № 7 (6). P. 393–398.
  31. *Дорожкина Л.А., Караваев В.А., Гунар Л.Э., Поддымкина Л.М.* Циркон и силиплант – антистрессовые и рострегулирующие препараты // Плодородие. 2016. № 2 (89). С. 13–15.
  32. *Паращенко В.Н., Кремзин Н.М., Чижиков В.Н., Туманьян Н.Г., Швыдкая Л.А.* Эффективность некорневой подкормки риса комплексным удобрением, содержащим кремний (келик калий–кремний) // Рисоводство. 2012. № 21. С. 24–28.
  33. *Чижиков В.Н., Паращенко В.Н., Швыдкая Л.А.* Эффективность некорневой подкормки посевов риса удобрением Контролфит кремний // Actual Sci. 2016. № 10. С. 59–60.
  34. *Матыченков В.В.* Градация почв по дефициту доступного растениям кремния // Агрохимия. 2007. № 7. С. 22–27.
  35. *Куркаев В.Т.* Ускоренное определение азота, фосфора и калия в растениях из одной навески // Почвоведение. 1959. № 9. С. 114–117.

## Effectiveness of Foliar Top Dressing of Flax with the Drug Controlfit-Si on Different Backgrounds of Mineral Nutrition in the Conditions of the Central Non-Chernozem

A. M. Konova<sup>a</sup>, A. Y. Gavrilo<sup>a,#</sup>, and N. E. Samsonova<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Federal Research Center for Bast Fiber Crops  
Komsomolsky pr. 17/56, Tver 170041, Russia*

<sup>b</sup>*Smolensk State Agricultural Academy  
Bolshaya Sovetskaya ul. 10/2, Smolensk 214000, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: augavrilova@gmail.com*

The responsiveness of flax to mineral fertilizers and foliar top dressing with an aqueous solution of the drug Controlfit-Si on sod-podzolic medium loamy soil was studied. It is shown that the reaction of flax to mineral fertilizers depended on the hydrothermal environmental conditions, doses and the ratio of nutrients. Excessive humidity and arid conditions negatively affected the productivity of crops. Foliar top dressing of plants with the drug Controlfit-Si leveled the negative impact of adverse weather conditions, increased the responsiveness of plants to mineral fertilizers, contributed to a more complete use of nutrients from fertilizers. On average, for 3 years on the backgrounds of full mineral fertilizer, top dressing increased the yield of flax straw by 25–30% with the best effect against the background of N48P48K48 (4.03 t/ha). Top dressing did not have a positive effect on the yield of flax seeds. It took 13.8 kg N, 5.9 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 10.7 kg K<sub>2</sub>O to form 1 ton of flax crop with the appropriate amount of seeds, regardless of plant nutrition conditions.

*Keywords:* flax, mineral fertilizers, foliar top dressing, controlfit-Si, yield, removal of nutrients.

УДК 631.559:631.811:631.582(571.54)

## УРОЖАЙНОСТЬ КУЛЬТУР И БАЛАНС ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ В ЗЕРНОПАРОВОМ СЕВООБОРОТЕ В УСЛОВИЯХ СУХОЙ СТЕПИ БУРЯТИИ

© 2023 г. А. С. Билтуев<sup>1,\*</sup>, Л.-З. В. Будажапов<sup>1</sup>, А. К. Уланов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Бурятский научно-исследовательский институт сельского хозяйства  
Министерства науки и высшего образования РФ  
ул. Третьякова, 25з, Улан-Удэ 670045, Россия

\*E-mail: burniish@inbox.ru

Поступила в редакцию 11.04.2023 г.

После доработки 15.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В полевом агрохимическом опыте исследовали потенциал продуктивности культур и баланс элементов питания в зернопаровом севообороте с чередованием культур пар—пшеница—овес—овес на зерносе-наж в условиях усиления аридизации климата сухостепной зоны Бурятии. Выявлено, что основное внесение N40P40 под зерновые культуры и N40P40K40 под кормовую (овес на зерносе-наж) было наиболее эффективным среди минеральных вариантов и равным по действию и после-действию внесения навоза 40 т/га и органо-минерального удобрения навоз 10 т/га + N50P25K60. Бездефицитный баланс азота получен при внесении навоза в дозе 11 т/га севооборотной площади. Применение рекомендуемой дозы минеральных азотных удобрений 30 кг/га не возмещало потерь азота, его дефицит составлял 12 кг/га в год. Положительный баланс фосфора получен при внесении фосфорных удобрений в дозе 33 кг/га, а также действия и последствие навоза 11 т/га. Калийный режим почв в опыте был наиболее дефицитен, варианты применения калийных удобрений (30 кг/га пашни севооборота), органических и органо-минеральных удобрений не смогли восполнить потери калия в севообороте.

*Ключевые слова:* каштановая почва, система удобрений, урожайность культур, баланс элементов пи-тания, сухая степь, Бурятия.

DOI: 10.31857/S0002188123110030, EDN: PPPRTD

### ВВЕДЕНИЕ

Баланс питательных веществ является науч-ной основой для разработки системы удобрения в севооборотах. Расчет его статей позволяет опре-делить не только направленность его динамики, но способы сохранения и повышения потенци-ального плодородия почв. Между тем, экономи-ческие условия, сложившиеся в аграрном секторе Сибири с конца 1990-х гг., позволяли вести лишь экстенсивную и ординарную систему земледелия [1]. Поэтому устойчивый отрицательный баланс питательных веществ сложился не только в ари-дных зонах, но и в зернопроизводящих регионах [2].

Каштановые почвы являются основными в па-хотном фонде республики Бурятия и занимают более половины его площади (309 тыс. га). Ана-лиз результатов агрохимических опытов, прове-денных в различных земледельческих зонах стра-ны, определил для почв аридных и субаридных территорий необходимость положительного ба-

ланса азота и фосфора, и бездефицитного — калия [3]. Результаты полевых исследований в зернопа-ровом и зернопарокормовом севооборотах в сухо-степной зоне Бурятии (1967—1997 гг.) позволили заключить, что положительный баланс азота на-ступал лишь при внесении навоза КРС в дозе 10—17 т/га севооборотной площади. Органо-мине-ральная и минеральная системы, эквивалентные дозе навоза 10 т/га, приводили к бездефицитному балансу. Применение азотных удобрений в дозе 27—46 кг/га в составе двойных и тройных комби-наций не возмещало потерь азота. В отличие от азо-та, положительный баланс фосфора обеспечивали не только эти дозы органических и органо-мине-ральных удобрений, но и минеральные фосфаты в дозе P38, бездефицитный баланс элемента наступал уже при рядковом внесении P<sub>сд</sub>20 (11 кг/га севообо-ротной площади). Баланс калия в целом был ана-логичен азотному: положительный — при приме-нении органических удобрений и дефицитный —

**Таблица 1.** Физико-химические свойства почвы опытного участка

Слой почвы, см	рН <sub>KCl</sub>	Гумус	N <sub>общ</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sub>подв</sub>	K <sub>2</sub> O <sub>обм</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
		%		мг/100 г почвы		мг-экв/100 г	
				по Чирикову			
0–20	6.4	1.31	0.09	23.1	10.1	9.4	4.3
20–30	6.0	1.30	0.08	19.8	8.8	8.8	4.8
30–40	6.1	1.08	0.04	18.1	5.8	8.0	3.3

**Таблица 2.** Характеристика увлажнения вегетационного периода

Характеристика увлажнения			Год (n = 24)
Засуха	экстремальная	ГТК ≤ 0.3	2016, 2017
	сильная	0.3 < ГТК ≤ 0.6	2003, 2010, 2014, 2019
	умеренная	0.6 < ГТК ≤ 0.8	2000, 2009, 2011, 2013, 2018, 2020
	слабая	0.8 < ГТК ≤ 1.0	1999, 2001, 2002, 2005
Обеспеченного увлажнения		1.0 < ГТК ≤ 1.3	2004, 2008, 2012, 2015, 2021
Избыточного увлажнения		ГТК > 1.3	1998, 2006, 2007

при внесении К27 [4]. Условия проведения исследования в первые 30 лет опыта были более благоприятными по увлажнению, чем в последующие годы. В результате усиления аридизации, согласно планетарного тренда изменения климата, в последние десятилетия наблюдали заметное увеличение количества засушливых лет [5].

Цель работы – определение урожайности культур и баланса элементов питания в последние 6 ротаций (1998–2021 гг.) 4-польного зернопарового севооборота с чередованием культур пар–пшеница–овес–овес на зерносеяж при систематическом применении различных систем удобрения в продолжающемся длительном полевом агрохимическом опыте.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыт размещен на опытном поле Бурятского НИИСХ в южной сухостепной зоне Республики Бурятия (п. Иволгинск). Показатели плодородия исходной супесчаной мучнистокарбонатной малогумусной супесчаной каштановой почвы соответствовали средним параметрам зональных почв (табл. 1): нейтральной реакцией среды, очень низким содержанием гумуса и общего азота, малой суммой поглощенных оснований, высоким содержанием подвижного фосфора и повышенным – обменного калия.

Климатические условия в период исследования оценивали по величине ГТК за май–июль по Селянинову в классификации Улановой [6]. В су-

хой степи Забайкалья это наиболее критический период, в наибольшей степени определяющий продуктивность зерновых культур [7]. Засухи в период исследования отмечали в течение 16-ти из 24-х лет, или в 67% случаев. Из них экстремальная и сильная засухи наступали в 25% случаев, умеренная – в 25% и слабая – в 17% случаев. Отметим, что эффект экстремальных и сильных засух имел пролонгированное действие, особенно при периодическом их наступлении. Периоды обеспеченного увлажнения отмечали в 21%, избыточного – в 12% случаев (табл. 2). Сумма годовых осадков в среднем за время наблюдений составляла 236 мм, при этом основная их масса (>70%) выпадала во второй половине лета.

В период исследования прошло 6 ротаций зернопарового севооборота. Для определения баланса было выбрано 7 вариантов систем удобрения: минеральная – N40P40, P40K40, N40K40, N40P40K40; органическая – навоз 20 и 40 т/га; органо-минеральная – навоз 10 т/га + N50P25K60 (эквивалентно навозу 10 т/га) в сравнении с контролем без удобрений. Минеральные удобрения (N<sub>аа</sub>, P<sub>сд</sub>, K<sub>х</sub>) вносили ежегодно под вспашку весной, органические (навоз КРС с содержанием NPK соответственно 50, 25 и 60 кг/т), а также органо-минеральные – один раз в ротацию под перепахку пара. Опыт входит в систему Географической сети опытов с удобрениями (№ 100). Повторность в опыте четырехкратная, площадь делянок 100 м<sup>2</sup>.

Баланс основных элементов (NPK) рассчитывали на основе методических указаний и реко-

мендаций, а также корректировки отдельных показателей с учетом результатов региональных исследований [8]. Приход элементов питания с удобрениями определяли по дозе ежегодного внесения действующего вещества удобрений (кг) или навоза (т) на 1 га севооборотной площади и количеству лет в изученном периоде. Общий вынос элементов рассчитывали по формуле:  $P_{\text{вын}} = U_0 - Co + Uп Сп$ , где  $U_0$  – урожайность зерна пшеницы и овса при влажности 14% (ц/га),  $Uп$  – урожайность соломы пшеницы и овса при влажности 17% (ц/га),  $Co$  и  $Сп$  – содержание элемента в основной и побочной продукции (%). Для овса, убранный на зеленую массу и зерносемя, формула имела вид:  $P_{\text{вын}} = U_0 Co$ , где  $U_0$  – урожайность зеленой массы овса (ц/га),  $Co$  – содержание элемента в зеленой массе (%). В отдельные годы овес не давал зерна и учитывали его зеленую массу. Для приведения зеленой массы овса и зерносемян от уборочной (55%) к стандартной влажности применяли понижающий коэффициент 0.54.

Расчет баланса азота наиболее сложен из-за особенностей его биогеохимического цикла. Азот поступал в почву с органическими ( $Поу$ ) и минеральными удобрениями ( $Пму$ ), семенами ( $Пс$ ), осадками ( $По$ ) и в результате несимбиотической азотфиксации ( $Пн$ ). В расходные статьи баланса были включены потери азота за счет выноса хозяйственной продукцией ( $Рвын$ ), вымывания вниз по профилю ( $Рвыщ$ ), плоскостного смыва и дефляции ( $Рэр$ ) и денитрификации ( $Рг$ ). Потери за счет выноса сорняками не учитывали, т.к. их рост подавляли на ранних стадиях развития. Приход азота с семенами при среднем содержании азота в зерне пшеницы 2.3% и овса 1.9% и норме высева в 200 кг/га составлял 3.0 кг/га. Приход азота с осадками был принят в размере 6.9 кг/га при среднем содержании аммиака в атмосферных осадках 0.3 мг/л. Однако с учетом размеров эмиссии при испарении непродуктивных осадков, размеры его включения в биотический цикл составили 3.8 кг/га [9]. Размеры азотфиксации учитывали только для свободноживущих диазотрофов, т.к. симбиотические отсутствовали, а вклад ассоциативных был очень мал [10]. В нашем опыте эти показатели составили 4.5 и 7.5 кг/га соответственно в безазотных вариантах и при применении азотсодержащих (минеральных и органических) удобрений. Потери от выщелачивания на пашне каштановых почв, по данным проектных внутрихозяйственных обследований ГСАС “Бурятская”, составляли в среднем 5 кг N/га, а от эрозионно-дефляционных процессов – 6 кг N/га. Газообразные потери за счет денитрификации были незначительными и составляли в среднем

6 кг/га. Подобное обусловлено как малым стартовым содержанием нитратов при посеве (3.0–10 мг/кг) с понижающим трендом его динамики в летний период, так и низкой влажностью бесструктурной или малооструктурной почвы в вариантах опыта [11–13]. При сокращении статей уравнения баланса азота ( $B_N$ , кг/га) имели вид для вариантов:

с азотными удобрениями:  $B_N = (Пму + Поу) - P_{\text{вын}} - 2.7$ ;

без азотных минеральных и органических удобрений:  $B_N = (Пму + Поу) - P_{\text{вын}} - 5.7$ .

Баланс фосфора ( $B_P$ , кг/га) состоял из меньшего количества статей, что связано с особенностями круговорота фосфатов в системе почва–растение–удобрение. С семенами поступало 1.5 кг/га, а обобщенные эрозионно-дефляционные потери составляли 1.6 кг/га год. При компенсации статей баланс фосфора определяли как:  $B_P = (Пму + Поу) - P_{\text{вын}}$ .

Баланс калия ( $B_K$ , кг/га) имел свои особенности, связанные с химическими свойствами солей калия. К приходным статьям относили поступление с семенами (0.9 кг/га) и осадками (1.8 кг/га). Потери калия за счет выщелачивания (1.2 кг/га) и смыва (2.5 кг/га) частично компенсировались его поступлением с семенами и осадками. Остатком в расходной части в 1 кг  $K_2O$ /га/год сочли целесообразным пренебречь из-за его малозначимости. В итоге баланс определяли как:  $B_K = (Пму + Поу) - P_{\text{вын}}$ .

Размеры средних постоянных потерь элементов питания от выщелачивания, эрозии и дефляции приняты согласно нормативным данным ГСАС “Бурятская”, размеры несимбиотической азотфиксации, газообразные потери и поступление с осадками определены согласно нормативам [14, 15]. Средневзвешенный химический состав растений в вариантах опыта был рассчитан на основе анализа химического состава растительной продукции в длительном опыте БурятНИИСХ. Интенсивность баланса рассчитывали как соотношение приходной и расходной частей, выраженное в %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дефицит почвенного и атмосферного увлажнения, а также азотного питания являются основными причинами, лимитирующими урожайность полевых культур на каштановых почвах Бурятии. Урожайность культур зернопарового севооборота зависела от условий увлажнения периода май–июль, вида и доз внесенных удобрений. Азот яв-

**Таблица 3.** Урожайность культур зернопарового севооборота (среднее за 1998–2021 гг.), ц/га

Вариант	Урожайность зерна				Зерносеменная масса овса	
	пшеница		овес			
	$M \pm m$	$V, \%$	$M \pm m$	$V, \%$	$M \pm m$	$V, \%$
Контроль без удобрений	9.6 ± 0.9	48.6	8.5 ± 1.3	60.5	44.1 ± 5.9	66.0
N40P40	12.3 ± 1.6	41.7	12.8 ± 2.2	69.5	74.6 ± 9.8	64.8
P40K40	10.1 ± 1.1	54.4	9.1 ± 1.3	59.2	55.2 ± 7.3	64.9
N40K40	10.6 ± 1.4	64.3	12.1 ± 2.1	70.3	74.5 ± 9.5	62.3
N40P40K40	11.8 ± 1.6	40.1	13.0 ± 2.4	77.6	83.8 ± 12.1	70.8
Навоз 40 т/га	12.8 ± 1.9	43.6	13.5 ± 2.7	82.3	78.3 ± 10.5	66.0
Навоз 20 т/га	12.3 ± 1.7	68.5	12.4 ± 2.2	73.7	58.5 ± 9.5	64.9
Навоз 10 т/га + NPK	12.0 ± 2.0	75.4	13.5 ± 2.7	81.2	79.1 ± 11.6	71.8
HCP <sub>05</sub>	1.8		2.3		13	

ляется наиболее дефицитным элементом, он эффективен как в условиях засухи, так и при хорошем увлажнении. Эффективное действие фосфорных удобрений отмечали лишь в условиях от слабой засухи до избыточного увлажнения, а калийных — только при обеспеченном и избыточном увлажнении [16]. Значительные вариации метеорологических условий вызвали и очень высокую изменчивость урожайности культур (табл. 3). При этом в большей степени от засух страдали 2-я и 3-я культуры после пара, как наименее обеспеченные почвенной влагой. Урожайность овса на зерно и зерносемена практически полностью зависела от прихода атмосферных осадков, поэтому в отдельные годы, при наступлении экстремальных и сильных засух, его не учитывали.

Наименьшая урожайность пшеницы после пара получена в контрольном варианте. Внесение азотных удобрений в составе двойного удобрения N40P40 позволило существенно повысить урожайность, а действие фосфорных, калийных и фосфорно-калийных удобрений не дало существенной прибавки. В опыте получены равные урожайности при применении органических (в дозах 20 и 40 т/га) и органо-минеральных удобрений, которые были сопоставимы с ежегодным внесением N40P40.

Овес, возделываемый 2-й культурой, испытывал последствие органических и органо-минеральных удобрений. Действие фосфорно-калийных удобрений было сопоставимо с вариантом без удобрений. Применение азотных и органических удобрений позволило существенно повысить урожайность овса. Между тем, в опыте не было выявлено достоверных различий между вариантами, в которых вносили азот, их средняя урожайность находилась в пределах 12.1–13.5 ц/га.

Анализ урожайности овса на зерносемена подтвердил ранее выявленные тенденции действия минеральных и последствие 2-го года органических удобрений [16]. Максимальная урожайность зерносеменной массы получена в вариантах внесения полного минерального (N40P40K40), последствие 2-го года органических (40 т/га) и органо-минеральных (навоз 10 т/га + NPK) удобрений; минимальная — в контроле. Высокое содержание калия в зерносеменной массе обеспечило не только эффективность внесения в составе трехкомпонентных удобрений, но и эффект ежегодного внесения P40K40, сопоставимого с последствием 2-го года дозы навоза 20 т/га.

Условия вегетации растений в период исследования отличались большей засушливостью с мая по 1-ю декаду июля, что снизило такие элементы продуктивности как полевая всхожесть, число колосков и цветков. Например, если средняя урожайность пшеницы в опыте в предыдущие 30 лет (1968–1997 гг.) составлял 21 ц/га, то в период с 1998 по 2021 г. она снизилась до 11 ц/га. Сокращение валового сбора зерна обычно усиливает активность баланса элементов питания, однако в нашем опыте этого не произошло (табл. 4). Основной причиной подобного явилось то, что 2-я культура (овес после пшеницы) в силу сухой первой половины вегетации и более влагообеспеченной второй давал 2-ю волну всходов, интенсивный подгон и в 35% случаев его убирали на зеленую массу. Значительная зеленая масса овса, составлявшая в среднем 72 ц/га, обеспечила больший вынос элементов в целом в севообороте в этом относительно засушливом цикле лет.

Баланс азота изменялся в соответствии с дозами внесенных удобрений. Наибольший дефицит азота отмечали в вариантах без применения азот-

**Таблица 4.** Среднегодовой баланс элементов питания в зернопаровом севообороте

Вариант	Внесено удобрений на 1 га пашни севооборота	Баланс, ± кг/га			Интенсивность баланса, %		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Контроль без удобрений	Без удобрений	-25	-11	-34	31	12	3
N40P40	N30P33	-13	17	-58	68	208	2
P40K40	P33K30	-28	18	-13	28	236	69
N40K40	N30K30	-12	-12	-29	70	21	50
N40P40K40	N30P33K30	-18	12	-39	62	164	42
Навоз 40 т/га	Навоз 11.1 т/га	8	18	-16	117	192	80
Навоз 20 т/га	Навоз 6.1 т/га	-10	3	-28	76	119	56
Навоз 10 т/га + NPK	Навоз 3.0 т/га + N16P9K19	-24	-6	-41	55	73	45

**Таблица 5.** Среднегодовой вынос элементов питания урожаем культур в зернопаровом севообороте, кг/га

Вариант	Пшеница			Овес			Овес на зерносеуж		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Контроль без удобрений	29.0	11.0	14.1	25.1	10.3	32.1	26.2	12.6	51.7
N40P40	43.3	10.6	19.3	42.9	14.3	43.2	48.2	21.1	96.0
P40K40	30.1	12.2	16.0	24.7	11.8	31.0	32.6	17.5	68.1
N40K40	37.9	11.0	16.2	39.0	12.9	39.3	50.6	20.3	100
N40P40K40	43.3	10.7	17.7	43.5	16.7	45.8	58.0	29.0	118
Навоз 40 т/га	44.8	13.7	21.1	47.8	19.3	52.5	57.8	27.0	144
Навоз 20 т/га	40.0	13.5	19.3	42.0	16.6	45.6	47.3	22.9	110
Навоз 10 т/га + NPK	40.7	11.7	18.2	42.3	16.0	44.7	53.0	26.3	116

ных удобрений: контроль (-25 кг N/га, интенсивность 31%), P33K30 (-28 кг/га, интенсивность 28%). Внесение средней дозы N40 значительно снизило дефицит баланса. При этом больший эффект получен при внесении одних фосфорных (-13 кг/га) и калийных (-12 кг/га), чем фосфорно-калийных удобрений (-18 кг/га). Подобное было связано с большим выносом урожаем, при внесении полного минерального удобрения (табл. 5). Бездефицитный баланс азота отмечен при внесении навоза 40 т/га.

Баланс фосфора был менее дефицитным, чем азота и калия, что обусловлено его меньшим содержанием в продукции. При малых и средних урожаях, внесенные фосфаты в составе минеральных и органических удобрений полностью восполняли его дефицит. Снижение дефицита элемента было обусловлено также низкой миграционной способностью фосфатов удобрений. Отрицательный баланс отмечен лишь в вариантах без удобрений и внесения N40K40, дефицит не превышал 12 кг/га. За 24 года применение минеральных фосфорных удобрений в дозе P40 обеспечило активный баланс фосфора: ((+12)–(+18) кг/га, интенсивность 160–240%). При этом больший расход фосфора удобрений отмечен при

его внесении в составе полного минерального удобрения, меньший – при его внесении в парных сочетаниях с азотными и калийными удобрениями. Органические (навоз 20 т/га) и эквивалентные этой дозе органо-минеральные (навоз 10 т/га + NPK) удобрения показали сходные показатели баланса, близкие к нулевому (14–(-6) кг/га, интенсивность 120–73%). Увеличение дозы навоза от 20 до 40 т/га повысило баланс фосфора в 6 раз. Подобное было связано с диспропорцией в поступлении и выносе фосфора в этих вариантах.

Наиболее дефицитный баланс сложился для калия. Подобное обусловлено тем, что продуктивность севооборота в большей степени обеспечивалась за счет кормовой культуры – овса, заготавливаемого на зерносеуж. Урожайность зерносеужной массы при приведении ее к стандартной влажности была сопоставима по массе с суммарным хозяйственным урожаем зерновых культур – пшеницы и овса. Высокая продуктивность в структуре севооборота в сочетании с повышенным содержанием калия в зерносеужной массе (2.0–2.9%) значительно повысили вынос элемента и соответственно дефицит его баланса относительно других элементов. Наибольший дефицит K<sub>2</sub>O (-58 кг/га, интенсивность 2%) получен при внесении N40P40.

Столь низкие показатели обусловлены отсутствием калийных удобрений при относительно высокой урожайности зеленой массы овса (в среднем 74 ц/га). Снижение дефицита до  $-39$  кг/га обеспечило внесение калия в составе полного минерального и органо-минерального удобрений. Повышение дозы калия в составе органических удобрений в 2 раза (навоз 20 и 40 т/га) позволило лишь сократить дефицит баланса от  $-28$  до  $-16$  кг/га. Баланс калия зависел от доз калийных удобрений и продуктивности зеленой массы овса, обладавших разнонаправленным действием на его активность. Повышение доз снижало его дефицит, а рост урожайности — увеличивал. Действие этих факторов было одинаковым для дефицита баланса калия в вариантах контроль и N40P40K40.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях усиления аридизации климата в период исследования снизилась урожайность культур севооборота, и изменилась эффективность действия удобрений. Выявлено, что применение минеральных (N40P40), органических (навоз 20 и 40 т/га) и органо-минеральных (навоз 10 т/га + NPK) удобрений оказывало равное действие на увеличение урожайности пшеницы. Аналогичное действие оказали все азотсодержащие минеральные и органические удобрения и на урожайность овса на зерно. Действие фосфорных, калийных и фосфорно-калийных удобрений не давало существенной прибавки урожайности зерновых культур. Максимальную урожайность зерносеменной массы овса обеспечило внесение полного минерального (N40P40K40), последействия 2-го года навоза 40 т/га и органо-минеральных удобрений. Высокое содержание калия в продукции определило эффективность применения калийных удобрений под эту культуру.

Бездефицитный баланс азота получен лишь при внесении органических удобрений в дозе 11 т/га севооборотной площади. Выявлено, что применение минерального азота в дозе N30 не возмещало выноса элемента урожаем, дефицит составил 12 кг/га. Баланс фосфора был наименее дефицитным. Положительный баланс был получен во всех вариантах применения фосфорных удобрений в дозе P33, он изменялся от 12 до 18 кг/га. Сходный эффект был получен при внесении навоза 11 т/га. Все варианты применения калийных минеральных (K30), органических (навоз 6–11 т/га) и органо-минеральных (навоз 3 т/га + K19) не обеспечили возмещения затрат калия. Наименьший его дефицит был отмечен при применении P40K40 ( $-13$  кг/га) и навоза в дозе 11 т/га.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамзиков Г.П. Современное состояние плодородия сибирских почв и перспективные агрохимические направления его сохранения // Мат-лы XI Международ. симп. НП "Содружество ученых агрохимиков и агроэкологов". М.: ВНИИА, 2017. С. 28–45.
2. Сычев В.Г., Шафран С.А. О балансе питательных веществ в земледелии России // Плодородие. 2017. № 1 (94). С. 1–4.
3. Юркин С.Н. Баланс азота, фосфора и калия в условиях интенсификации земледелия. М.: ВНИИТЭИСХ, 1975. 107 с.
4. Лапухин Т.П. Система применения удобрений в полевых севооборотах на каштановых почвах сухой степи Забайкалья: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Барнаул, 2000. 40 с.
5. Билтуев А.С., Будажанов Л.В., Уланов А.К., Хутакова С.В. Агрофизические свойства и динамика влажности каштановой почвы в условиях засухи в сухостепной зоне Бурятии // Вестн. НГАУ. 2017. № 1 (42). С. 77–83.
6. Уланова Е.С. Засухи в СССР и их влияние на производство зерна // Метеорол. и гидрол. 1988. № 7. С. 127–134.
7. Цыбенков Б.Б., Билтуев А.С. Формирование урожайности яровой пшеницы в аридных условиях Бурятии // Вестн. КрасГАУ. 2016. № 6 (117). С. 120–125.
8. Составление проекта на применение удобрений: Рекомендации. М.: МСХ РФ, 2000. 125 с.
9. Бюллетень Географической сети опытов с удобрениями. Влияние дождевых осадков на загрязнение сельскохозяйственных угодий (по данным локального мониторинга). Вып. 14. М.: ВНИИА, 2013. 30 с.
10. Мишустин Е.Н., Черепков Н.И., Калининская Т.А. Несимбиотической азотфиксации в пахотных почвах // Проблемы почвоведения. М.: Наука, 1978. С. 92–96.
11. Гамзиков Г.П. Азот в земледелии Западной Сибири. М.: Наука, 1981. 266 с.
12. Кудяров В.Н., Кузнецова Т.В. Оценка размеров несимбиотической азотфиксации в почве методом баланса // Почвоведение. 1990. № 11. С. 79–89.
13. Myrold D.D. Soil nitrogen cycle // Encyclopedia of environmental microbiology. Canada: G. Ditton, 2002. P. 2936–2944.
14. Методические рекомендации по изучению показателей плодородия почв, баланса гумуса и питательных веществ в длительных опытах. М.: Почв. ин-т им В.В. Докучаева, 1987. 80 с.
15. Сычев В.Г., Музыкаев П.Д., Панкова Н.К. Методические указания по определению баланса питательных веществ азота, фосфора, калия, гумуса, кальция. М.: ЦИНАО, 2000. 40 с.
16. Лапухин Т.П., Билтуев А.С., Рузавин Ю.Н. Влияние климатических факторов на зерновую продуктивность овса в условиях сухостепной зоны Бурятии // Длительное применение удобрений. Агрохимические, агрономические и экологические аспекты: науч. тр. Новосибирск: РАСХН, СО, 2011. С. 83–89.

## **Crop Yield and Balance of Nutrition Elements in the Grain–Steam Crop Rotation in the Conditions of the Dry Steppe of Buryatia**

**A. S. Biltuev<sup>a,#</sup>, L.-Z. V. Budazhapov<sup>a</sup>, and A. K. Ulanov<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup>Buryat Scientific Research Institute of Agriculture Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation  
ul. Tretyakova 25z, Ulan-Ude 670045, Russia*

*<sup>#</sup>E-mail: burniish@inbox.ru*

In the field agrochemical experiment, the potential of crop productivity and the balance of nutrition elements in the grain–steam crop rotation with alternating crops of steam–wheat–oats–oats per grain crop under conditions of increased aridization of the climate of the dry-steppe zone of Buryatia were investigated. It was revealed that the main application of N40P40 for grain crops and N40P40K40 for fodder (oats for grain planting) was the most effective among the mineral options and equal in effect and aftereffect to the application of manure 40 t/ha and organo-mineral fertilizer manure 10 t/ha + N50P25K60. A deficiency-free nitrogen balance was obtained when manure was applied at a dose of 11 t/ha of crop rotation area. The use of the recommended dose of mineral nitrogen fertilizers of 30 kg/ha did not compensate for nitrogen losses, its deficit was 12 kg/ha per year. A positive phosphorus balance was obtained when applying phosphorus fertilizers at a dose of 33 kg/ha, as well as the effects and aftereffects of manure 11 t/ha. The potash regime of soils in the experiment was the most deficient, the use of potash fertilizers (30 kg/ha of arable crop rotation), organic and organo-mineral fertilizers could not compensate for the loss of potassium in crop rotation.

*Keywords:* chestnut soil, fertilizer system, crop yield, balance of nutrients, dry steppe, Buryatia.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК: 546.28:543

# МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КРЕМНИЯ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ, ПОЧВАХ, РАСТЕНИЯХ И АГРОХИМИКАТАХ<sup>1</sup>

© 2023 г. Е. А. Бочарникова<sup>1,2,\*</sup>, В. В. Матыченков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт фундаментальных проблем биологии РАН  
ул. Институтская, 2, Пущино, Московская обл. 142290, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии  
ул. Институт, влад. 5, р.п. Большие Вяземы, Одинцовский р-н, Московская обл. 143050, Россия

\*E-mail: msvk@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Описан комплекс методов по определению активных форм кремния – мономеров и полимеров кремниевой кислоты – в системе почва–растение с целью оценки кремниевого состояния почв, уровня обеспеченности растений кремнием, а также оценки потенциальной эффективности твердых кремнийсодержащих соединений в качестве источника биодоступного кремния. Предложенный для характеристики обеспеченности почв биодоступным кремнием параметр “активный кремний” включает актуальный кремний, т.е. содержание монокремниевой кислоты, присутствующей в почвенном растворе в данный момент, и “потенциальный кремний” – монокремниевую кислоту, которая может перейти в почвенный раствор из твердой фазы. На основании параметра “активный кремний” разработана классификация почв в зависимости от уровня дефицита биоактивного кремния.

*Ключевые слова:* методы исследования, активные формы кремния, природные воды, почвы, растения, агрохимикаты, классификация почв в зависимости от уровня дефицита биоактивного кремния.

DOI: 10.31857/S0002188123120037, EDN: IGZXFV

### ВВЕДЕНИЕ

Кремний – второй по распространенности элемент на планете. Общее содержание кремния в растениях изменяется от 1 до 100 г/кг сухой массы [1]. Содержание кремния в растительных тканях часто превышает содержание азота и калия [2]. Многочисленные лабораторные, тепличные и полевые эксперименты свидетельствуют, что внесение кремниевых удобрений позволяет увеличить урожайность различных культур посредством воздействия как на почву, так и на растения [3]. За последнее десятилетие интерес к агрохимикатам на основе кремния значительно возрос, т.к. установлено, что применение кремнийсодержащих соединений позволяет снизить негативное влияние на растения многочисленных стресс-факторов [4, 5]. Развитие научных исследований в данной области обуславливает увеличение потребности в получении информации о содержании биодоступных и химически актив-

ных форм кремния в почве и кремниевых агрохимикатах, а также о степени обеспеченности растений кремнием, что, в свою очередь, определяет необходимость совершенствования методов определения кремния и разработки методов, отличающихся простотой, доступностью и высокой информативностью. Цель работы – разработки определения активных форм кремния в природных водах, почвах, растениях и агрохимикатах.

### ФОРМЫ КРЕМНИЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРИРОДНЫХ РАСТВОРАХ

В природных растворах, включая почвенные воды, внутриклеточные и внеклеточные растворы, присутствует несколько растворимых форм кремния, среди которых выделяют монокремниевую кислоту, содержащую 1 атом кремния, олигомеры кремниевой кислоты, содержащие от 2-х до 100 атомов кремния [6], а также поликремневые кислоты, содержащие >100 атомов кремния. В литературе можно встретить 2 формы монокремниевой кислоты: ортокремниевую кислоту

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103-6.

( $H_4SiO_4$ ) и метакремниевую кислоту ( $H_2SiO_3$ ). Преобладающей формой в водных системах и в почвенном растворе является ортокремневая кислота [7, 8]. Предполагают, что метакремниевая кислота в растворах с  $pH > 3.0$  нестабильна и переходит в ортокремневую кислоту или ее анионы [9]. Однако термин метакремниевая кислота часто используют в работах по исследованию силиката натрия, поскольку данное соединение содержит анион метакремниевой кислоты [10]. Определение монокремниевой кислоты основано на реакции с молибдатом аммония с образованием желтого комплекса [11]. Обе формы монокремниевой кислоты вступают в реакцию с молибдатом аммония, поэтому многие авторы предлагают использовать единый термин “монокремниевая кислота” [7, 8, 11].

Нами была предложена модификация метода Маллин и Райли [11], заключающаяся в использовании в качестве восстановителя сульфата железа вместо нестабильного нафтола. Данная методика определения содержания монокремниевой кислоты в растворе позволяет полностью исключить мешающее воздействие фосфора, анион которого также образует желтый комплекс с молибдатом аммония. Для анализа содержания монокремниевой кислоты в водном растворе готовят 2 раствора: раствор “1” – молибденовокислый аммоний четырехводный (10 г) растворяют в 470 мл бидистиллированной воды, затем добавляют 30 мл концентрированной HCl; раствор “2” – щавелевую кислоту (20 г) растворяют в дистиллированной воде (500 мл) и добавляют семиводный сульфат железа (6 г). Параллельно 250 мл концентрированной серной кислоты смешивают с 250 мл дистиллята и охлаждают до комнатной температуры. Растворы щавелевой кислоты и серной кислоты осторожно смешивают.

Образец раствора (от 2 до 40 мг Si) помещают в 50-мл пластиковую колбу. pH раствора должен быть в интервале от 2.0 до 7.0. При необходимости кислотность корректируют концентрированной соляной кислотой. Затем приливают 10 мл раствора 1 и через 10 минут приливают 10 мл раствора 2, после чего оставляют на 3 ч для прохождения реакции. Концентрацию Si измеряют на спектрофотометре при длине волны 660 нм.

Поликремневые кислоты в растворах более стабильны, чем олигомеры кремниевых кислот. Эти соединения не реагируют с молибденовокислым аммонием, поэтому их прямое определение возможно с помощью атомно-адсорбционного метода (с чрезвычайно низкой чувствительностью) или метода индуктивно-связанной плазмы (ICP), обладающего достаточной точностью. Од-

нако оба метода не позволяют различать мономерные и полимерные формы. Поэтому если в растворе присутствуют обе формы кремниевой кислоты, то необходимо использовать параллельно 2 методики – определение содержания монокремниевой кислоты методом молибденовокислого аммония и ICP-определение общего содержания кремния в растворе. Заменить ICP-метод можно путем деполимеризации полимеров кремниевой кислоты посредством обработки раствора ультразвуком либо 2-недельной инкубации в сильнощелочной среде [12]. После этой процедуры определяют содержание монокремниевой кислоты в растворе колориметрическим методом. На основе данных по содержанию монокремниевой кислоты до и после деполимеризации вычисляют содержание полимерных форм.

### МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИОДОСТУПНОГО КРЕМНИЯ В ПОЧВЕ

Знания о подвижности и доступности в почве того или иного питательного элемента позволяют выявить уровень дефицита элемента в питании растений и разработать рекомендации по применению удобрений. При этом для характеристики состояния исследуемого элемента в системе почва–растение предпочтительнее иметь не более 1–2 параметров, методы определения которых должны быть простыми и информативными.

Анализировать общее содержание кремния в почве с целью оценки обеспеченности питания растений кремнием не имеет смысла, т.к. в почве кремний в основном присутствует в составе труднорастворимых силикатов и крупнокристаллического кремнезема.

Существует несколько общепринятых методов определения биодоступного кремния в почве, основанных на экстракции различными реагентами, среди которых кислотные и щелочные реагенты наиболее популярны [13, 14]. Кроме того, разработаны методы на основе водных и солевых экстракций [15, 16]. Также используют уксусно-натриевый буфер и лимоннокислую вытяжку [17, 18].

Однако необходимо учитывать, что в почвенном растворе постоянно присутствуют как мономерные, так и полимерные формы кремниевой кислоты. Последние не доступны для растений [1, 18]. При высушивании образца обе формы трансформируются в аморфный кремнезем, который при последующей экстракции образца растворяется, образуя только монокремниевую кислоту, концентрация которой отражает суммарное содержание мономеров и полимеров кремниевой

кислоты, присутствовавших в исходном образце, что приводит к искажению данных о содержании биодоступного кремния. Один из наиболее изученных и широко применяемых методов анализа сухих образцов почв с целью оценки обеспеченности биодоступным кремнием основан на экстракции 0.1 н.  $\text{CaCl}_2$  [19, 20]. В ряде исследований было показано, что коэффициент корреляции между концентрацией кремния в данном экстракте и общим содержанием кремния в растениях составляет  $R = 0.60$  [21].

Для более точного определения биодоступного кремния был предложен метод, основанный на экстракции сухой почвы водой в течение 1 нед при температуре  $40^\circ\text{C}$ . Этого времени достаточно для восстановления равновесия между мономерными и полимерными формами кремния [22]. Однако данный метод длительный и громоздкий.

Нами был разработан несложный в реализации метод измерения концентрации мономеров и полимеров кремниевой кислоты в почве. Метод основан на водной экстракции свежего почвенного образца с содержанием влаги от 8 до 50% [13]. Предложенный метод был протестирован на ряде почв с различной влажностью [23, 24]. По результатам тестирования, влажность почвы от 8 до 50% незначительно влияла на концентрацию моно- и поликремниевых кислот. О точности метода измерения концентрации монокремниевой кислоты в почве судили по коэффициенту корреляции ( $R$ ) между полученной величиной и общим содержанием Si в тканях исследованных растений. Коэффициент корреляции составил 0.85 ( $sd = 0.557$ ,  $p = 0.95$ ) и 0.92 ( $sd = 0.410$ ,  $p = 0.95$ ) в случае линейной и квадратичной функции соответственно [25].

**Водная экстракция свежей почвы.** К навеске 6 г невысушенного образца почвы, имеющего влажность 10–20%, добавляют 30 мл воды дистиллята. Образец перемешивают 60 мин и центрифугируют при 6000 об./мин в течение 10 мин). В полученном растворе немедленно определяют концентрацию монокремниевой кислоты колориметрическим методом. Концентрацию поликремневых кислот определяют после деполимеризации в щелочной среде или *ICP*-методом.

Одной из особенностей поведения соединений кремния в водных системах является их низкая растворимость при высокой скорости растворения [8]. В системе почва–растение образующаяся в результате растворения твердых соединений монокремниевая кислота быстро поглощается растениями и почвенными микроорганизмами, что обуславливает необходимость получения ин-

формации о потенциальной способности кремнийсодержащих соединений восполнять биодоступный кремний в почвенном растворе. Поэтому в характеристику кремниевого состояния почв было предложено включить содержание кремния, экстрагируемого 0.1 н.  $\text{HCl}$ . Данный параметр признан как наиболее информативный, отражающий потенциальное содержание биодоступного кремния в почве [26].

**Экстракция слабой кислотой.** Почву сушат ( $75^\circ\text{C}$ ), растирают в фарфоровой ступке и просеивают через сито 1 мм. Навеску почвы 2 г помещают в 50-мл пластиковый сосуд и приливают 20 мл 0.1 М  $\text{HCl}$ . Суспензию встряхивают в течение 1 ч и центрифугируют при 6000 об./мин в течение 10 мин. В растворе измеряют концентрацию монокремниевой кислоты.

Для удобства кремний, переходящий в водную вытяжку из свежей почвы, предложено обозначить как “актуальный Si” (**Акту. Si**), а кремний, переходящий в кислую вытяжку из сухой почвы, как “потенциальный Si” (**Пот. Si**), т.е. характеризующий запас потенциально доступного Si в почве. Содержание поликремниевых кислот в водной вытяжке из свежей почвы является отдельным параметром.

Для оценки уровня дефицита биодоступного Si в почве необходимо иметь информацию об обеих формах кремния: актуальном и потенциальном. Однако на практике более удобно использовать один параметр, поэтому нами был разработан параметр “активный Si” (**Акт. Si**). Для вычисления величины активного Si было выявлено количественное соотношение между актуальным и потенциальным кремнием. Как свидетельствовали наши исследования по оценке кремниевого состояния почв разных типов, величина актуального Si составляет  $\approx 1/10$  часть от потенциального Si [24, 27]. По результатам исследований других авторов [26], в водный раствор переходит  $\approx 1/10$  части аморфного тонкодисперсного кремнезема, который является основным источником растворимого кремния в почве. Для вычисления активного Si (**Акт. Si**) в почве используют формулу:

$$\text{Акт. Si} = 10 \times (\text{Акту Si}) + \text{Пот. Si}.$$

Как показали результаты вегетационных экспериментов, величина коэффициента корреляции между содержанием активного Si в почве и содержанием Si в наземной части растений равна 0.85–0.95 [28]. Таким образом, данный комплексный параметр позволяет с высокой степенью достоверности характеризовать способность почвы обеспечивать кремниевое питание растений.

**Таблица 1.** Классификация почв и грунтов в зависимости от обеспеченности активными формами кремния

Уровень обеспеченности кремнием	Формы кремния, мг Si/кг почвы		
	Акту. Si	Пот. Si	Акт. Si
Высокая	>41	>601	>999
Хорошая	21–41	301–601	501–999
Низкая	11–21	101–301	201–501
Критически низкая	0–11	0–101	0–201

На основании данных о содержании различных форм Si в почвах была разработана классификация почв и грунтов в зависимости от обеспеченности биодоступным кремнием (табл. 1).

Высокая обеспеченность характерна для почв и грунтов, имеющих высокий уровень плодородия (аллювиальные почвы, вулканические, целинные черноземы). Внесение удобрений и мелиорантов на основе Si возможно для повышения эффективности традиционных минеральных удобрений, а также для предотвращения деградации почвенного покрова.

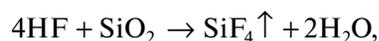
Целинные почвы, такие как бурая или серая лесная, сероземы обычно имеют хорошую обеспеченность активными формами Si. Также к данной группе относятся почвы с высоким уровнем естественного плодородия, например, черноземы, но длительно вовлеченные в сельскохозяйственное производство. Внесение кремниевых удобрений и мелиорантов на основе Si возможно для улучшения кремниевого питания растений Si и оптимизации применения минеральных и органических удобрений, а также средств защиты растений.

Низкая обеспеченность активными формами Si наблюдается в малопродуктивных и деградированных почвах. Внесение удобрений и мелиорантов на основе Si целесообразно для уменьшения скорости деградации почв и для обеспечения питания растений кремнием.

Критически низкая обеспеченность почв и грунтов активными формами Si встречается в сильно деградированных и песчаных почвах. Применение агрохимикатов на основе кремния необходимо для обеспечения продуктивности и устойчивости растениеводства и повышения эффективности традиционных удобрений.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ

Впервые содержание кремния в растениях начали измерять количественно еще в XIX веке с помощью гравиметрического метода. Поскольку в составе растений преобладают органические соединения, весовой метод анализа кремния включает 2 этапа. На первом этапе растительный образец озоляют при 550°C для удаления органики. После перевода в раствор других зольных элементов 6 М соляной кислотой образец фильтруют через беззольный фильтр, затем фильтр вместе с кремнийсодержащим осадком прокаливают и взвешивают [29]. В современных методах определения общего содержания кремния в растениях используют H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>–NaOH. Это связано с тем, что концентрированные кислоты (HNO<sub>3</sub>, HCl, HClO<sub>4</sub>), широко применяемые при определении общего содержания металлов в растениях, не обеспечивают полного растворения кремнезема [30]. Применение фтороводородной кислоты в качестве растворителя при разложении проб создает опасность потери Si за счет улетучивания в результате реакции:



где SiF<sub>4</sub> – бесцветный газ, растворимый в воде и органических растворителях [31].

Разработаны следующие методики определения общего содержания кремния в тканях растений.

*Разложение в автоклаве.* В 100-мл пластиковые пробирки помещают по 100 мг высушенного, растертого и просеянного через сито 0.5 мм образца, добавляют 2 мл 50% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Затем добавляют 4.5 г 50%-ного NaOH, аккуратно перемешивают и плотно закрывают крышками. Пробирки помещают в автоклав и выдерживают при давлении 138 кПа в течение 1 ч. Полученный раствор переносят в 500-мл мерную колбу, доводят объем до метки, хорошо перемешивают и анализируют содержание растворимого Si.

*Разложение в муфеле.* Никелевые тигли, содержащие по 500 мг сухого растертого образца, помещают в муфельную печь при комнатной температуре, затем температуру постепенно увеличивают до 600°C в течение 90 мин и при данной температуре оставляют на 4 ч. После охлаждения добавляют по 2.5 г NaOH и содержимое аккуратно перемешивают. Тигли снова помещают в муфель, после увеличения температуры в течение 1 ч до 500°C образцы выдерживают 30 мин. Затем образцы охлаждают и содержимое растворяют в 10 мл теплой дистиллированной воды. После чего

содержимое тиглей переносят в 300-мл пластиковые стаканы и добавляют 2 М  $\text{HNO}_3$  для нейтрализации избытка  $\text{NaOH}$ , используя фенолфталеин в качестве индикатора. Затем раствор переносят в 500-мл мерную колбу, доводят объем до метки, хорошо перемешивают и анализируют на содержание  $\text{Si}$ .

**Микроволновое разложение.** В тefлоновые пробирки для микроволновой печи помещают по 100 мг сухого образца и добавляют 2.5 г  $\text{NaOH}$  и 2.5 мл дистиллированной воды и оставляют на 12 ч. Затем добавляют по 3 мл 30%-ного  $\text{H}_2\text{O}_2$ , пробирки закрывают и помещают в керамический штатив на 1 ч. После чего пробирки устанавливают в микроволновую печь на 60 мин. Затем содержимое пробирок переносят в 300-мл пластиковые сосуды и нейтрализуют остатки  $\text{NaOH}$  2 М  $\text{HNO}_3$ , используя фенолфталеин в качестве индикатора. Содержимое пробирок переносят в 500-мл мерные колбы, доводят объем до метки, хорошо перемешивают и определяют содержание  $\text{Si}$ .

Долгое время концентрацию растворимых форм кремния в клетках растений не анализировали, однако сложилось представление, что поскольку концентрации моно- и поликремневых кислот в природных растворах обычно <1 микромоля  $\text{Si}$  [7, 25, 28], то и концентрации растворимого кремния в клетках растений также низкие. Нами были разработаны методики определения концентрации растворимого кремния в тканях растений, а также в симпласте и апопласте растений [25].

**Определение концентрации растворимого кремния.** Берут навеску 0.1–0.2 г свежих растительных тканей, приливают 200 мл дистиллята и измельчают в ступке, после чего образец центрифугируют при 5000 об./мин в течение 15 мин. В супернатанте измеряют концентрации монокремниевой кислоты и ее полимерных форм описанным выше методом.

**Определение концентрации кремния в апопласте и симпласте.** Кусочки свежих растительных тканей длиной 20–25 мм взбалтывают с 200 мл дистиллята в течение 1 ч. В полученном растворе измеряют концентрации монокремниевой и поликремневых кислот и рассчитывают их содержание в апопласте растений. Оставшиеся после фильтрования растворов образцы растительных тканей растирают в ступке до однородного состояния и вновь смешивают с дистиллированной водой в соотношении 1 : 100 по весу. Затем суспензию в течение 60 мин встряхивают, центрифугируют и в полученном супернатанте измеряют концентрацию моно- и поликремневых кислот, рассчитывают их содержание в симпласте растений.

## СОЕДИНЕНИЯ КРЕМНИЯ В КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ ПРЕПАРАТАХ

Кремниевые агрохимикаты чаще представлены твердыми соединениями, быстрая (24 ч) водная экстракция которых не достаточна для адекватной оценки содержания в них биодоступного кремния.

Для оценки потенциальной эффективности кремниевых удобрений было предложено использовать не только содержание монокремниевой кислоты в 24-часовом водном экстракте, но и в 4-суточном водном экстракте [25]. Это время необходимо для установления равновесия в системе вода–соединение кремния. Для определения содержания активного кремния в кремнийсодержащих соединениях предложено следующее уравнение:

$$\text{Акт. Si} = 10 \times (\text{Акту Si}_{1 \text{ сут}} + \text{Акту Si}_{4 \text{ сут}}) + \text{Пот. Si}$$

Результаты проведенных исследований показали, что предложенный метод может быть рекомендован для оценки потенциальной эффективности кремнийсодержащего соединения в качестве источника биодоступного кремния [25, 30].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Epstein E. Silicon // Ann. Rev. Plant Biol. 1999. V. 50. № 1. С. 641–664.
2. Ильин В.Б. Элементарный химический состав растений. Новосибирск: Наука, СО, 1985. 130 с.
3. Snyder G.H., Matichenkov V.V., Datnoff L.E. Silicon // Handbook of plant nutrition. CRC Press, 2016. P. 567–584.
4. Mostofa M.G., Rahman M.M., Ansary M.M.U., Keya S.S., Abdelrahman M., Miah M.G., Phan Tran L.S. Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants // Critic. Rev. Biotechnol. 2021. V. 41. № 6. P. 918–934.
5. Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system // Biotechnology. 2019. V. 9. № 3. P. 1–16.
6. Knight T.G., Kinrade S.D. A primer on the aqueous chemistry of silicon // Silicon in agriculture. Studies in plant science. Amsterdam: Elsevier, 2001. P. 57–84.
7. Dietzel M. Interaction of polysilicic and monosilicic acid with mineral surfaces // Water-rock interaction. Springer Dordrecht, 2002. P. 207–235.
8. Iler R.K. The chemistry of silica. N.Y.: Wiley, 1979. 866 p.
9. Mondal B., Ghosh D., Das A.K. Thermochemistry for silicic acid formation reaction: Prediction of new reaction pathway // Chem. Phys. Lett. 2009. V. 478. P. 115–119.
10. Wu J., Shi Y., Zhu Y.X., Wang Y.C., Gong H. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by

- silicon: a review // *Pedosphere*. 2013. V.23. № 6. P. 815–825.  
[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60073-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60073-9)
11. Mullin J.B., Riley J.P. The colorimetric determination of silicate with reference to sea and natural waters // *Anal. Chem. Act.* 1955. № 12. P. 162–176.
  12. Матыченков В.В., Шнайдер Г.С. Подвижные соединения кремния в некоторых почвах южной Флориды // *Почвоведение*. 1996. № 12. С. 1448–1453.
  13. Матыченков В.В., Аммосова Я.М., Бочарникова Е.А. Метод определения доступного для растений кремния в почвах // *Агрохимия*. 1997. № 1. С. 76–84.
  14. Farmer V.C., Ressel J.D., Smith B.F. Extraction of inorganic forms of translocated Al, Fe, and Si from a podsol Bs horizon // *Soil Sci.* 1983. V. 34. № 3. P. 571–576.
  15. Haysom M.B.C., Chapman L.S. Some aspects of the calcium silicate trials at Mackay // *Proc. Queens. Soc. Sugar Cane Technol.* 1975. V. 42. P. 117–122.
  16. Khalid R.A., Silva J.A. Residual effect of calcium silicate on pH, phosphorus and aluminium in tropical soil profile // *Soil Sci. Plant Nutr.* 1980. V. 26. P. 87–98.
  17. Imaizumi K., Yoshida S. Edaphological studies on silicon supplying power of paddy fields // *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci.* 1958. № 8. P. 261–304.
  18. Ma J.F., Takahashi E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Netherlands: Elsevier, 2002, 281 p.
  19. Caubet M., Cornu S., Saby N. P., Meunier J.D. Agriculture increases the bioavailability of silicon, a beneficial element for crop, in temperate soils // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 1–11.
  20. Miles N., Van Antwerpen R., Van Heerden P.D.R., Rhodes R., Weigel A., McFarlane S.A. Extractable silicon in soils of the sugar industry and relationships with crop uptake // *Proc. South Afric. Sugar Technol. Associat.* 2011. V. 84. P. 189–192.
  21. Berthelsen S., Noble A.D., Kingston G., Hurney A., Rudd A., Garside A. Improving yield and ccs in sugarcane through the application of silicon based amendments. Final report SRDC Project CLW009. 2003.
  22. Nonaka K., Takahashi K. A method of measuring available silicates in paddy soils // *Jap. Agric. Res. Q.* 1988. V. 22. P. 91–95.
  23. Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties // *Silicon in agriculture. Studies in plant science*. Amsterdam: Elsevier, 2001. P. 209–219.
  24. Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Погорелов А.Г. Сравнительная характеристика некоторых кремниевых удобрений // *Агрохимия*. 2011. № 11. С. 25–30.
  25. Барсукова А.Г., Рочев В.А. Влияние кремнегельсодержащих удобрений на подвижность кремнекислоты в почве и доступность ее растениям // *Контроль и регулирование содержания макро- и микроэлементов в почве и растениях на Среднем Урале*. Тр. Свердловск. СХИ. 1979. Т. 54. С. 84–88.
  26. Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A. Si in horticultural industry // *Production practices and quality assessment of food crops*. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 2004. V. 2. P. 217–239.
  27. Матыченков В.В. Градация почв по дефициту доступного растениям кремния // *Агрохимия*. 2007. № 7. С. 22–30.
  28. Snyder G.H. Methods for silicon analysis in plants, soils, and fertilizers // *Silicon in agriculture. Studies in plant science*. Amsterdam: Elsevier, 2001. P. 185–196.
  29. Saihua L., Yunhe X., Ji X., Juan H., Bocharnikova E.A., Matichenkov V.V. Microwave digestion for colorimetric determination of total Si in plant and mineral samples // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2018. V. 49. № 7. P. 840–847.
  30. Shimizu M. Silicon (IV) fluoride // *Encyclopedia of reagents for organic synthesis*. John Wiley & Sons, 2001.

## Methods for Investigations the Biologically Active Forms of Si in Soil, Plants and Agrochemicals

E. A. Bocharnikova<sup>a,#</sup> and V. V. Matichenkov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Fundamental Problems of Biology of the Russian Academy of Sciences  
142290 Pushchino, Moscow region, Institutskaya str., 2, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: msvk@rambler.ru*

A set of methods for determining the active forms of silicon – monomers and polymers of silicic acid – in the soil–plant system is described in order to assess the silicon state of soils, the level of plant availability of silicon, as well as to assess the potential effectiveness of solid silicon-containing compounds as a source of bioavailable silicon. The parameter “active silicon” proposed to characterize the availability of bioavailable silicon in soils includes actual silicon, i.e. the content of monosilicon acid present in the soil solution at the moment, and “potential silicon” – monosilicon acid, which can pass into the soil solution from the solid phase. Based on the “active silicon” parameter, a classification of soils has been developed depending on the level of bioactive silicon deficiency.

**Keywords:** research methods, active forms of silicon, natural waters, soils, plants, agrochemicals, classification of soils depending on the level of bioactive silicon deficiency.

УДК 631.811.98:631.811.93

**БИОСТИМУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ<sup>1</sup>**

© 2023 г. А. О. Гранкина

*Институт фундаментальных проблем биологии РАН  
142290 Пущино, Московская обл., Серпуховской р-н, ул. Институтская, 2, Россия**E-mail: 9265260049@bk.ru*

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Биостимуляторы являются новым типом агрохимикатов, обладающих высокой эффективностью при внесении низких доз (до 10 кг/га). Интерес к использованию биостимуляторов подтвержден появлением не только научных работ, но и формированием в различных странах законодательных баз, регулирующих использование и классификацию данного типа веществ в сельском хозяйстве. Благодаря воздействию кремнийсодержащих соединений как биостимуляторов роста растений можно комплексно решить несколько задач современного сельского хозяйства: минимизировать последствия воздействия стресс-факторов, снизить нормы использования ядохимикатов и доз удобрений, улучшить качество производимой продукции, остановить деградацию почв. Ассортимент мировых производителей кремниевых препаратов-биостимуляторов представлен жидкими (монокремниевой кислотой) или твердыми (аморфным кремнеземом или гелем кремниевой кислоты) формами. Существуют несколько кремний-опосредованных механизмов, обеспечивающих защиту растений в условиях биотического и абиотического стрессов. Существует гипотеза влияния кремния на сигнальную систему растений, которая требует дополнительного исследования.

*Ключевые слова:* биостимуляторы, кремний.

**DOI:** 10.31857/S0002188123120062, **EDN:** IKYRMM

**ВВЕДЕНИЕ**

Чрезмерное использование химических удобрений часто является основной причиной деградации почв, загрязнения окружающей среды и негативного влияния на здоровье человека [1]. Применение большого количества химических удобрений также связывают с дисбалансом питания выращиваемых растений, что способствует заражению болезнями сельскохозяйственных культур, усилению атак насекомых-вредителей, а также стимулирует рост сорняков [2]. Для решения этих проблем в последнее время было предложено использовать биостимуляторы, которые способствуют смягчению негативного воздействия различных абиотических стресс-факторов для выращиваемых растений, включая такие как климатические изменения (засуха, заморозки, снижение качества поливных вод и др.), где невозможно использовать традиционные химические средства защиты растений [3]; повышают природную устойчивость выращиваемых расте-

ний к биотическим стресс-факторам и снижают нормы использования ядохимикатов в сельском хозяйстве [4]; позволяют сокращать дозы применения химических удобрений и повышают эффективность использования внесенных в систему почва–растение питательных веществ [2]; улучшают качество получаемой сельскохозяйственной продукции [5]; позволяют снизить скорость деградации почвенного покрова, выраженное в уменьшении содержания важнейших микроэлементов (железа, цинка, бора и др.) [6].

Особое внимание сейчас уделяется необходимости снижения доз внесения минеральных удобрений. Например, European Commission еще до энергетического кризиса планировала снизить внесение агрохимикатов на 30% к 2050 г. [7]. Несомненно, что проблема с высокими ценами на энергоносители и природный газ еще больше повысят интерес к биостимуляторам [8]. Поэтому сегодня наиболее развивающимся сектором в сельском хозяйстве является производство и применение биостимуляторов [9, 10]. Этот рынок является одним из самых быстрорастущих секторов сельского хозяйства, увеличиваясь на 12–15% в

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103-6 и договора АПТ-ЦИ-2020-04 с АО «Апатит».

год. Предполагают, что рынок биостимуляторов увеличится с 2.79 млрд \$ США в 2018 г. до 6.98 млрд \$ США в 2026 г.

Однако часто термин биостимулятор используют неправильно, причисляя к этому классу стимуляторы роста или микроэлементы [11]. Поэтому важно точно определить, что понимают под термином биостимулятор.

### БИОСТИМУЛЯТОРЫ

Важно, что само понятие стресса у растений используют только со 2-й половины XX века [12]. Различная интенсивность и длительность негативного раздражителя порождают стресс, который вызывает специфическую или неспецифическую реакцию организма [13, 14]. Первое обычно возникает, когда стрессор фокусируется на определенной цели, второе – когда реакции на различные стрессоры схожи. Поскольку укореняющиеся растения не могут вырваться из вредной среды, они развили другие защитные стратегии, включая способность избегать стресса (например, морфологические и биохимические барьеры, препятствующие или задерживающие стрессорную активность внутри клетки, адаптацию жизненного цикла к сезонам года) и/или стрессоустойчивость (например, альтернативные пути, позволяющие клетке функционировать в стрессовых условиях, предотвращение вызванных стрессом изменений, толерантность к изменениям или механизмы быстрого восстановления повреждений) [14].

Традиционные методы производства растениеводческой продукции основаны в основном на совершенствовании агротехники (например, обработки почвы, рекультивации, внесении макро- и микроэлементов (удобрений), орошении и т.п.) ограничены из-за невозможности эффективно использовать биологический потенциал культивируемого сорта [15]. Предотвращения ущерба, наносимого вредными организмами или абиотическими стрессами полевым культурам, производство и защита растений в основном основываются на стимулировании их роста и развития с одновременным снижением опасностей, представляемых для человека и окружающей среды, а также на обеспечении безопасной высококачественной сельскохозяйственной продукцией. Использование пестицидов, представляющих собой в основном яды, позволяет снизить негативное воздействие биотических стресс-факторов, но не может влиять на абиотические стресс-факторы. Поэтому применение биостимуляторов представляется наилучшим сред-

ством удовлетворения острой потребности в альтернативных методах, основанных на новых биологически активных, экологически чистых и безопасных веществах, применение которых повышает природную устойчивость растений к неблагоприятным условиям.

Однако до сих пор нет четкого определения, что есть биостимулятор. Вот несколько примеров таких определений:

– растительные биостимуляторы (фитостимуляторы) – это различные нетоксичные вещества преимущественно природного происхождения, которые улучшают и стимулируют жизненные процессы растений более дифференцированно, чем удобрения или фитогормоны. Влияние биостимуляторов на обработанные растения не является следствием прямой способности регулировать обмен веществ, и их действие может быть разнонаправленным. Решающим моментом является то, что биостимуляторы, в отличие от биорегуляторов и гормонов, улучшают обменные процессы растений, не изменяя их естественного гомеостаза [10];

– биостимуляторы – это различные природные вещества, активирующие естественные биологические процессы, которые помогают растениям преодолеть стрессы и достичь максимального генетического потенциала с точки зрения урожайности и качества (<http://biotech2030.ru/biostimulatory-dlya-rastenij-prodazhinabirayut-oborot/>);

– биостимулятором являются вещества и/или микроорганизмы, используемые для обработки семян, растений или ризосферных микроорганизмов, которые стимулируют естественные процессы, повышающие усвоение питательных веществ, эффективность их использования, устойчивость к абиотическому стресс-фактору или качество и урожайность сельскохозяйственных культур (Agriculture Improvement Act of 2018, USA).

Биостимуляторы используют как для обработки почвы (микроорганизмы), обработки семян, так и взрослых растений. Существует несколько классификаций биостимуляторов. Например на сайте (<https://info.agricen.com/growing-for-future-ag-biologicals-booklet>) биостимуляторы делят на 4 группы – органические кислоты, микроорганизмы, экстракты и др. Однако сегодня существует более детальные классификации биостимуляторов. Согласно регламенту Европейского Союза ((ЕС) 2019/1009), биостимуляторы в целом разделены на 2 большие категории в зависимости от происхождения – микробные и немикробные

препараты [16]. К категории микробных биостимуляторов относят бактерии, дрожжи и нитевидные грибы [17]. Эти микроорганизмы извлекают из почвы, растений и других органических материалов [18]. Микробные биостимуляторы вносят в почву, ими обрабатывают семена, и они могут оказывать прямое или косвенное действие на повышение урожайности сельскохозяйственных культур [19]. Микроорганизмы могут оказывать прямое воздействие на урожай через установление взаимной симбиотической ассоциации с растениями (например, микориза) или косвенно, увеличивая биодоступность питательных веществ для растений [20]. В последнем европейском Регламенте по удобрениям (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1009>), микроорганизмы *Azotobacter* spp., *Mycorrhiza*, *Rhizobium* spp. и *Azospirillum* spp. признаны биостимуляторами.

Для немикробных биостимуляторов обычно выделяют 6 подкатегорий: 1 – хитозан – полисахарид является компонентом хитина. Известно 2 способа получения хитозана, которые заключаются в извлечении хитозана непосредственно из клеточных стенок термохимическими или ферментативными методами деацетилирования хитина, позволяющими удалять N-ацетильные группы из хитина. В настоящее время хитозан получают путем термохимического гидролиза хитина [21]; 2 – гуминовые и фульвокислоты – природные компоненты органического вещества почвы, образующиеся в результате процессов разложения растений, животных и микроорганизмов, а также дополнительно модифицированные метаболической активностью почвенных микробов [22]; 3 – гидролизаты животных и растительных белков, которые представляют собой смесь соединений, таких как аминокислоты, пептиды и полипептиды, получаемые путем химического, ферментативного и термического гидролиза белков из сложных биологических матриц [23]; 4 – экстракты морских водорослей, которые представляют собой большую группу и включают макроскопические морские водоросли и многоклеточные водоросли, принадлежащие к различным таксономическим группам, таким как бурые, красные и зеленые водоросли [24]; 5 – фосфит [ $\text{H}_2\text{PO}_3^-$  или  $\text{HPO}_3^{2-}$ ], аналог фосфата является неорганическим биостимулятором в сельском хозяйстве, который усиливает рост и продуктивность различных культурных растений, выращиваемых в условиях абиотических стресс-факторов [25], 6 – кремний является общепризнанным неорганическим биостимулятором, который актив-

но используют во многих странах как биостимулятор [26].

Часто к неорганическим биостимуляторам относят также селен, поскольку препараты на его основе позволяли улучшить усвоение питательных веществ, повышать устойчивость растений к стресс-факторам и улучшать качество урожая [27].

Эффективное использование биостимуляторов требует понимания процессов, определяющих их воздействия на онтогенез и устойчивость выращиваемых растений. Любой стресс-фактор усиливает синтез активных форм кислорода (АФК), что характерно для большинства живых организмов, вызывая окислительный стресс [28, 29]. АФК – супероксидный радикал, пероксид водорода, синглетный кислород, гидроксильный радикал, пероксидный и алкоксильные радикалы [30]. В клетках любого организма происходят окислительно-восстановительные реакции, которые обеспечивают эти организмы необходимой энергией. Молекулярный кислород важен для извлечения химической энергии, запасенной в органических молекулах и прежде всего углеводах и белках. С его помощью различные ферменты (оксидоредуктазы) осуществляют окислительные реакции. Противовесом АФК в этих реакциях являются различные антиоксиданты [31]. Антиокислительная защитная система включает ферментативные (энзимные) и неферментативные (не энзимные) компоненты [32]. Ферментативные компоненты (аскорбатпероксидаза, глутатионпероксидаза, глутатионредуктаза, гваяколпероксидаза, каталаза, супероксиддисмутаза и др.) работают в разных клеточных компартментах и активируются, когда клетки испытывают окислительный стресс, т.е. находятся под каким-либо стресс-фактором. Аскорбиновая кислота,  $\alpha$ -токоферол, глутатион, каротиноиды, пролин и флавоноиды относятся к неферментативным антиоксидантам [33]. Механизм снижения активности АФК антиоксидантами может быть различным, но все они либо нейтрализуют избыточный заряд АФК, либо расщепляют АФК и липидные радикалы, либо защищают напрямую клеточные мембраны и клеточные органеллы [31, 33, 34].

Несмотря на то, что сами АФК, как правило, обладают сигнальными функциями, инициируя процессы активации энзимных и неэнзимных антиоксидантов, противостоять многим стресс-факторам растения не могут, что ведет к потерям урожая и качества выращиваемой продукции. Поэтому поддержание баланса окислительно-восстановительных процессов при использовании биостимуляторов является основным спосо-

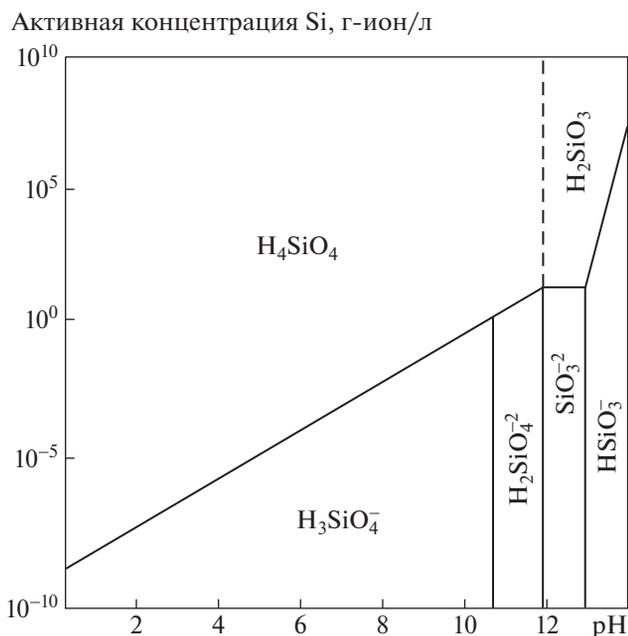


Рис. 1. Типы кремниевых кислот в растворах [42].

бом защиты растений в условиях стресс-факторов. Способность того или иного продукта, участвующего непосредственно в регулировании окислительно-восстановительного баланса растений, является одним из ключевых параметров классификации этого продукта как биостимулятора.

### КРЕМНИЕВЫЕ БИОСТИМУЛЯТОРЫ

Многочисленные современные исследования свидетельствуют, что кремневые препараты положительно влияют на онтогенез растений и их устойчивость к стрессам различной природы [35, 36]. В настоящее время определены следующие механизмы, обеспечивающие защиту растений при использовании кремний-содержащих соединений в условиях биотического и абиотического стресс-факторов: 1 — аккумуляции кремния в эпидермальных тканях растений и образование двойного кутикулярного слоя, который препятствует развитию заболеваний растений и атакам насекомых [37]; 2 — ускорение развития корневой системы растений и увеличение содержания хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов в клетках растений [38]; 3 — нейтрализация неорганических загрязняющих веществ (тяжелых металлов и мышьяка) монокремниевой кислотой в апопласте и симпласте растений [39]; 4 — контроль и регуляция транспорта макро- и микроэлементов [40]; 5 — активация специфических и неспецифических антиоксидантов при воздействии на растения различных стресс-факторов [41].

В настоящее время можно выделить 2 группы кремнийсодержащих препаратов, которые могут быть определены как биостимуляторы согласно малым дозам внесения (до 10 кг/га) и по воздействию на растения, где фиксируется увеличение активности стресс-ферментов или антиоксидантов. Это жидкие препараты на основе концентрированной монокремниевой кислоты и твердые препараты, химический состав которых определяется либо как аморфный тонкодисперсный кремнезем, либо как гель кремниевой кислоты.

*Препараты на основе концентрированной монокремниевой кислоты.* Препараты этой группы производят во многих странах — США (Quick-sol, Silica Boost, EcoSil), Польше (Optysil), Индии (Liquid Silicon, SiSili, Lquisil), России (Ревиталант кремний, Ek-Si). Обычно концентрация растворенного кремния в этих препаратах составляет от 5 до 15% Si, и препаративной формой этих препаратов является монокремниевая кислота.

Монокремниевая кислота содержит 1 атом кремния. Часто встречающаяся форма монокремниевой кислоты — ортокремниевая кислота ( $H_4SiO_4$ ),  $pK = -9.85$  и ее анион —  $H_3SiO_4^-$ . Мета-кремниевая кислота ( $H_2SiO_3$ ) встречается в природе редко [42] (рис. 1).

В ряде экспериментов было показано, что монокремниевая кислота стабильна при pH 7.0 при концентрации до 100 мг Si/л [43, 44]. При дальнейшем увеличении концентрации монокремниевой кислоты в нейтральном растворе происходит процесс полимеризации кремниевой кислоты. Для растворов с низким pH процесс полимеризации кремниевой кислоты происходит при более низких концентрациях монокремниевой кислоты, а для растворов с высоким pH полимеризация может вообще не происходить [44]. Скорость процесса полимеризации зависит от нескольких факторов, включая исходную концентрацию мономеров кремниевой кислоты. Поэтому для жидких препаратов можно стабилизировать высокую концентрацию монокремниевой кислоты. В основном для этого используют щелочь (например, Quick-Sol, Eco-Sil, Эк-Си). Однако в препарате Optusil используют азотные соединения для стабилизации концентрированного раствора монокремниевой кислоты.

Эффекту жидких кремнийсодержащих препаратов посвящено много работ [45–50]. Эти препараты обычно вносят в виде некорневой (листовой) подкормки выращиваемых растений. В исследованиях охвачено большое количество культур: картофель, сахарная свекла, люпин, пшеница, лук, рис, рапс и др.

В литературе описаны различные эффекты жидких кремнийсодержащих биостимуляторов, прежде всего на урожайность и качество выращиваемой продукции. Многие работы посвящены специальным эффектам, таким как снижение токсичности тяжелых металлов [51, 52], устойчивость к абиотическим и биотическим стрессам [41, 53].

Нами в предыдущих исследованиях было сделано предположение, что защита растений при внесении Si-содержащих соединений может быть определена: 1 – влиянием на передачу внутри- и внеклеточных сигналов, что может приводить к ответным реакциям клетки или всего организма на внешнее воздействие, либо 2 – оказывать прямое влияние на синтез соединений, участвующих в снижении активности АФК.

*Препараты на основе твердых кремнийсодержащих соединений.* Твердых кремнийсодержащих биостимуляторов, которые бы использовали на практике или в научных исследованиях значительно меньше. В 2023 г. был зарегистрирован как биостимулятор препарат АпаСил (ФосАгро), который является твердым и представляет собой твердый материал с содержанием 31.5% SiO<sub>2</sub>. Он рекомендован для обработки семян и некорневой (листовой) подкормки растений. Наши исследования показали, что применение этого препарата повышало устойчивость пшеницы и сахарной свеклы к низким температурам [41]. Было показано, что кроме влияния на ростовые параметры, внесение твердого кремний-содержащего биостимулятора повышало содержание фотосинтетических пигментов и повышало активность таких антиоксидантов как аскорбат пероксидаза, гуакоилпероксидаза. Также было отмечено уменьшение количества продуктов, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой [41].

Тонкодисперсный аморфный диоксид кремния или микросилика применяют в некоторых исследованиях с использованием низких доз, что позволило использовать эти препараты как биостимуляторы [52, 54].

В последнее время появились работы, где применяют кремниевые препараты, имеющие наноразмеры частиц [55, 56]. В этих работах показано, что нанокремний положительно влиял на растения при обработке семян [57, 58] и при обработке листьев растений [59]. При этом также отмечено увеличение активности стресс-ферментов, что позволило культивируемым растениям снизить негативный эффект от действия стресс-факторов [60]. Часто нанокремний используют совместно с

другими неорганическими веществами, что усиливает положительный эффект [61, 62].

Однако при использовании твердых форм кремнийсодержащих биостимуляторов сложно определить сам механизм воздействия. Обычно эти препараты перед применением смешивают с водой или водным раствором. Так как скорость растворения кремнезема очень высокая [43], то можно предположить, что действующим веществом является образовавшаяся монокремниевая кислота. С другой стороны, вода быстро испаряется, и кремнийсодержащие частицы, особенно наноразмеров могут оказывать прямое влияние на сигнальную систему растений. Но это предположение необходимо доказать.

Однако подтверждение участия активных форм кремния в работе сигнальной системы растений трудно доказать при использовании существующих методов исследования, но некоторые работы указывают на такую возможность [63].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературы свидетельствует, что кремнийсодержащие препараты как в жидкой, так и твердой форме, использованные в низких дозах (до 10 кг/га), могут оказывать положительное воздействие на выращиваемые культуры и быть классифицированы как эффективные биостимуляторы.

Использование кремнийсодержащих биостимуляторов имеет высокую эффективность, и их применение позволяет снизить негативное влияние многих стресс-факторов, включая климатические, атаки насекомых-вредителей, болезней, повысить эффективность традиционных агрохимикатов, что позволит снизить дозы их применения и повысить уровень плодородия почв.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Farswan K.* Effects of chemical fertilizer pesticides on human health // *Asia. J. Res. Social Sci. Human.* 2021. V. 11. № 12. P. 77–80.
2. *Sharma N., Singhvi R.* Effects of chemical fertilizers and pesticides on human health and environment: A review // *Inter. J. Agric. Environ. Biotechnol.* 2017. № 1. P. 675–679.
3. *Malik A., Mor V.S., Tokas J., Punia H., Malik S., Malik K., Karwasra A.* Biostimulant-treated seedlings under sustainable agriculture: A global perspective facing climate change // *Agronomy.* 2020. V. 11. № 1. P. 14.
4. *Shukla P.S., Mantin E.G., Adil M., Bajpai S., Critchley A.T., Prithiviraj B.* Ascophyllum nodosum-based biostimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and

- disease management // *Front. Plant Sci.* 2019 № 10. P. 655.
5. *Fusco G.M., Nicastro R., Roupheal Y., Carillo P.* The Effects of the microbial biostimulants approved by EU Regulation 2019/1009 on yield and quality of vegetable crops // *Foods.* 2022 V. 11. № 17. P. 2656.
  6. *Mannino G., Campobenedetto C., Vigliante I., Contartese V., Gentile C., Bertea C.M.* The application of a plant biostimulant based on seaweed and yeast extract improved tomato fruit development and quality // *Biomolecules.* 2020. V. 10. № 12. P. 1662.
  7. *Hansen J.* EU must get serious about promoting the circular economy // *The Parliament Magazine.* 2018. [Электр. ресурс]. Режим доступа: [https://www.theparliamentmagazine.eu/articles/partner\\_article/fertilizers-europe-eu-must-get-serious-about-promoting-circular-economy](https://www.theparliamentmagazine.eu/articles/partner_article/fertilizers-europe-eu-must-get-serious-about-promoting-circular-economy) (21.10.2021)
  8. *Mashamaite C.V., Ngcobo B.L., Manyevere A., Bertling I., Fawole O.A.* Assessing the usefulness of *Moringa oleifera* leaf extract as a biostimulant to supplement synthetic fertilizers: A Review // *Plants.* 2022. V 11. № 17. P. 2214.
  9. *Ginter A., Zarzecka K., Gugala M.* Effect of herbicide and biostimulants on production and economic results of edible potato // *Agronomy.* 2022. V. 12. № 6. P. 1409.
  10. *Posmyk M.M., Szafranska K.* Biostimulators: a new trend towards solving an old problem // *Front. Plant Sci.* 2016. № 7. P. 748.
  11. *Abdel Megeed T.M., Gharib H.S., Hafez E.M., El-Sayed A.* Effect of some plant growth regulators and biostimulants on the productivity of Sakha108 rice plant (*Oryza sativa* L.) under different water stress conditions // *Appl. Ecol. Environ.* 2021. № 19. P. 2859–2878.
  12. *Пятыгин С.С.* Стресс у растений: физиологический подход // *Журн. общ. биол.* 2008. Т. 69. № 4. С. 294–298.
  13. *Веселовский В.А., Веселова Т.В., Чернавски Д.С.* Стресс растения. Биофизический подход // *Физиология растений.* 1993. Т. 40. № 4. С. 553–557.
  14. *Пахомова В.М.* Основные положения современной теории стресса и неспецифический адаптационный синдром у растений // *Цитология.* 1995. Т. 37. № 1–2. С. 66–91.
  15. *Ториков В.Е.* Производство продукции растениеводства: учебное пособие / В.Е. Ториков, О.В. Мельникова. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2017. 512 с.
  16. *Kour D., Rana K.L., Yadav N., Yadav A.N., Singh J., Rastegari A.A., Saxena A.K.* Agriculturally and industrially important fungi: Current developments and potential biotechnological applications // *Recent Advancement in White Biotechnology through Fungi.* Cham, Switzerland: Springer Inter. Publish., 2019. V. 2. P. 1–64.
  17. *Li J., Van Gerrewey T., Geelen D.* A meta-analysis of biostimulant yield effectiveness in field trials // *Front. Plant Sci.* 2022. № 13. P. 45.
  18. *Franzoni G., Cocetta G., Prinsi B., Ferrante A., Espen L.* Biostimulants on crops: Their impact under abiotic stress conditions // *Horticulturae.* 2022. V. 8. № 3. P. 189.
  19. *Castiglione A.M., Mannino G., Contartese V., Bertea C.M., Ertani A.* Microbial biostimulants as response to modern agriculture needs: Composition, role and application of these innovative products // *Plants.* 2021. № 10. P. 1533.
  20. *Colla G., Roupheal Y., Di Mattia E., El-Nakhel C., Cardarelli M.* Co-Inoculation of glomus intraradices and trichoderma atroviride acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of vegetable crops // *J. Sci. Food Agric.* 2015. № 95. P. 1706–1715.
  21. *Shahrajabian M.H., Chaski C., Polyzos N., Tzortzakis N., Petropoulos S.A.* Sustainable agriculture systems in vegetable production using chitin and chitosan as plant biostimulants // *Biomolecules.* 2021. V. 11. № 6. P. 819.
  22. *Canellas L.P., Olivares F.L., Aguiar N.O., Jones D.L., Nebbioso A., Mazzei P., Piccolo A.* Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture // *Sci. Hortic.* 2015. № 196. P. 15–27.
  23. *Colla G., Nardi S., Cardarelli M., Ertani A., Lucini L., Canaguier R., Roupheal Y.* Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture // *Sci. Hortic.* 2015. № 196. P. 28–38.
  24. *Khan W., Rayirath U.P., Subramanian S., Jithesh M.N., Rayorath P., Hodges D.M., Critchley A.T., Craigie J.S., Norrie J., Prithiviraj B.* Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development // *J. Plant Growth Regul.* 2009. № 28. P. 386–399.
  25. *Gómez-Merino F.C., Gómez-Trejo L.F., Ruvalcaba-Ramírez R., Trejo-Téllez L.I.* Application of phosphite as a biostimulant in agriculture. // *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering.* Elsevier, 2022. P. 135–153.
  26. *Zellner W., Datnoff L.* Silicon as a biostimulant in agriculture // *Biostimulants for sustainable crop production.* Burleigh Dodds Sci. Publish., 2020. P. 149–196.
  27. *Medrano-Macías J., Narvaéz-Ortiz W. A.* Selenium and nano-selenium as a new frontier of plant biostimulant // *Selenium and nano-selenium in environmental stress management and crop quality improvement.* Cham: Springer, 2022. P. 41–54.
  28. *Гильдииков Д.И.* Окислительный стресс у животных: взгляд патолофизиолога // *Рос. ветеринар. журн.* 2020. № 4. С. 10–18.
  29. *Фурман Ю.В., Артюшкова Е.Б., Аниканов А.В.* Окислительный стресс и антиоксиданты // *Актуал. пробл. социал.-гуманит. и научн.-техн. знания.* 2019. Т. 1. С. 1–3.
  30. *Sies H., Belousov V.V., Chandel N.S., Davies M.J., Jones D.P., Mann G.E., Winterbourn C.* Defining roles of specific reactive oxygen species (ROS) in cell biology and physiology // *Nat.Rev. Mol. Cell Biol.* 2022. P. 1–17.
  31. *Ahmad P., Jaleel C.A., Salem M.A., Nabi G., Sharma S.* Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress // *Critic. Rev. Biotechnol.* 2010. V. 30. № 3. P. 161–175.
  32. *Karuppanapandian T., Moon J.C., Kim C., Manoharan K., Kim W.* Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms // *Austral. J. Crop Sci.* 2011. V. 5. P. 709–725.
  33. *Sharma P., Jha A.B., Dubey R.S., Pessarakli M.* Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidant

- tive defense mechanism in plants under stressful conditions // *J. Bot.* 2012. V. 9. P. 26.
34. Meitha K., Pramesti Y., Suhandono S. Reactive oxygen species and antioxidants in postharvest vegetables and fruits // *Inter. J. Food Sci.* 2020. P. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/8817778>
  35. Kim Y.H., Khan A.L., Waqas M., Lee I.J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review // *Front. Plant Sci.* 2017. № 8. P. 510.
  36. Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system // *3 Biotech.* 2019. V. 9. № 3. P. 73.
  37. Vivancos J., Labbé C., Menzies J.G., Bélanger R.R. Silicon-mediated resistance of *Arabidopsis* against powdery mildew involves mechanisms other than the salicylic acid (SA)-dependent defense pathway // *Mol. Plant Pathol.* 2015. V. 16. № 6. P. 572–582.
  38. Frazão J.J., de Mello Prado R., de Souza Júnior J.P., Rossatto D.R. Silicon changes C : N : P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 1–10.
  39. Ji X., Liu S., Huang, J., Bocharnikova E., Matichenkov V. Monosilicic acid potential in phytoremediation of the contaminated areas // *Chemosphere.* 2016. V. 157. P. 132–136.
  40. Souri Z., Khanna K., Karimi N., Ahmad P. Silicon and plants: current knowledge and future prospects // *J. Plant Growth Regul.* 2021. V. 40. № 3. P. 906–925.
  41. Гранкина А.О., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В. Влияние кремнийсодержащих биостимуляторов на холодостойкость пшеницы и сахарной свеклы // *Агрохимия.* 2022. № 8. С. 22–28.
  42. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П. Термодинамика силикатов. М.: Недра, 1972. 145 с.
  43. Iler R.K. The Chemistry of silica // N.Y.: Wiley, 1979. 896 p.
  44. Матыченков В.В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва–растение: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пушино, 2008. 40 с.
  45. Матыченков В.В., Кособрюхов А.А., Шабнова Н.И., Бочарникова Е.А. Кремниевые удобрения как фактор повышения засухоустойчивости растений // *Агрохимия.* 2007. № 5. С. 63–67.
  46. Artyszak A., Klarzynska E., Litwinczuk-Bis M., Siuda A. Profitability of sugar beet foliar nutrition with silicon // *Ann. Polish Associat. Agricult. Agrob. Econom.* 2019. V. 21. № 1. P. 17.
  47. Corozo Liliana, Arteaga Alcívar Francisco, Cuenca Edisson, Salas Carlos, Delgado María, Montes Escobar Karime, Monteros-Altamirano Alvaro, Ponce Macías. Effect of organic and chemical fertilization on the onion crop (*Allium cepa* L.) // *J. Centr. Europ. Agricult.* 2020. V. 21. P. 522–530.
  48. Kowalska J., Tyburski J., Jakubowska M., Krzywińska J. Effect of different forms of silicon on growth of spring wheat cultivated in organic farming system // *Silicon.* 2021. V. 13. № 1. P. 211–217.
  49. Niewiadomska A., Sulewska H., Wolna-Maruwka A., Ratajczak K., Waraczewska Z., Budka A. The influence of bio-stimulants and foliar fertilizers on yield, plant features, and the level of soil biochemical activity in white lupine (*Lupinus albus* L.) cultivation // *Agronomy.* 2020. V. 10. № 1. P. 150.
  50. Wadas W. Possibility of increasing early potato yield with foliar application of silicon // *Agron. Sci.* 2022. V. 77. № 2. P. 949–954.
  51. Gao M., Zhou J., Liu H., Zhang W., Hu Y., Liang J., Zhou J. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 631–632. P. 1100–1108.
  52. Wei X., Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A., Zhan Q., Matichenkov I.V. Reduction of Cd, Cu, Ni and Pb mobility by active Si // *Agricult. Sci. Technol.* 2015. V. 16. № 1. P. 182.
  53. Grankina A., Bocharnikova E., Matichenkov V. Silicon-based biostimulators // *Biostimulants for crop production and sustainable agriculture.* CAB International, 2022. P. 85.
  54. Abd-Elalil E.H., Hussein M. Foliar application of micro silica, potassium chloride and calcium chloride enhances yield and fruit quality of Balady orange tree // *Alexandria Sci. Exchange J.* 2018. V. 39. P. 387–393.
  55. Sabaghnia N., Janmohammadi M. Effect of nano-silicon particles application on salinity tolerance in early growth of some lentil genotypes // *Ann. Univer. Mariae Curie-Sklodowska. Sectio C; Biol.* 2015. V. 69. № 2. P. 39.
  56. Siddiqui M.H., Al-Wahaibi M.H., Faisal M., Al Sah.li A.A. Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. // *Environ. Toxicol. Chem.* 2014. V. 33. № 11. P. 2429–2437.
  57. Hussain A., Rizwan M., Ali Q., Ali S. Seed priming with silicon nanoparticles improved the biomass and yield while reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat grains // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019. V. 26. № 8. P. 7579–7588.
  58. Karunakaran G., Suriyaprabha R., Manivasakan P., Yuvakkumar R., Rajendran V., Prabu P., Kannan N. Effect of nanosilica and silicon sources on plant growth promoting rhizobacteria, soil nutrients and maize seed germination // *IET Nanobiotechnol.* 2013. V. 7. № 3. P. 70–77.
  59. Wang S., Wang F., Gao S. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. V. 22. № 4. P. 2837–2845.
  60. Dhakate P., Kandhol N., Raturi G., Ray P., Bhardwaj A., Srivastava A., Tripathi D.K. Silicon nanoforms in crop improvement and stress management // *Chemosphere.* 2022. V. 305. P. 135–165.

61. Golubkina N., Logvinenko L., Konovalov D., Garsiya E., Fedotov M., Alpatov A., Caruso G. Foliar application of selenium under nano silicon on *Artemisia Annuua*: Effects on yield, antioxidant status, essential oil, artemisinin content and mineral composition // *Horticulturae*. 2022. V. 8. № 7. P. 597.
62. Park H.J., Kim S.H., Kim H.J., Choi S.H. A new composition of nanosized silica-silver for control of various plant diseases // *Plant Pathol. J.* 2006. V. 22. № 3. P. 295–302.
63. Johnson S.N., Hartley S.E., Ryalls J.M., Frew A., Hall C.R. Targeted plant defense: silicon conserves hormonal defense signaling impacting chewing but not fluid-feeding herbivores // *Ecology*. 2021. V. 102. № 3. e03250.

## Si-Based Biostimulators

A. O. Grankina

*Institute Basic Biological Problems RAS  
Institutskaya ul. 2, Moscow region, Serpukhov district, Pushchino 142290, Russia,  
E-mail: 9265260049@bk.ru*

Biostimulants are a new type of agrochemicals that are highly effective when applying low doses (up to 10 kg/ha). The interest in the use of biostimulants is confirmed by the appearance of not only scientific papers, but also the formation in various countries of legislative bases regulating the use and classification of this type of substances in agriculture. Thanks to the influence of silicon-containing compounds as biostimulators of plant growth, several tasks of modern agriculture can be comprehensively solved: to minimize the effects of stress factors, to reduce the use of pesticides and fertilizer doses, to improve the quality of products, to stop soil degradation. The range of global manufacturers of silicon biostimulants is represented by liquid (monosilicon acid) or solid (amorphous silica or silica gel) forms. There are several silicon-mediated mechanisms that provide plant protection in conditions of biotic and abiotic stress. There is a hypothesis of the influence of silicon on the signaling system of plants, which requires additional research.

*Keywords:* biostimulants, silicon.

УДК: 631.811.93

## КРЕМНИЕВЫЕ ПРЕПАРАТЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ<sup>1</sup>

© 2023 г. Е. А. Бочарникова<sup>1,2,\*</sup>, В. В. Матыченков<sup>1,2</sup>, И. В. Матыченков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт фундаментальных проблем биологии РАН  
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии  
ул. Институт, влад. 5, р.п. Большие Вяземы, Одинцовский р-н, Московская обл. 143050, Россия

<sup>3</sup>ООО “СтройПартнер”  
109542 Москва, просп. Рязанский, 86/1, стр. 3, Россия

\*E-mail: msvk@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Показана более чем 200-летняя история изучения роли и функций кремния в системе почва–растение. Приведены основные направления исследований, посвященных кремнию, включая изучение влияния кремниевых препаратов на подвижность тяжелых металлов и на устойчивость растений к климатическим изменениям. Обобщены кремнийопосредованные механизмы детоксикации загрязненных кадмием почв и снижения аккумуляции кадмия растениями. Выделены 3 группы кремниевых агрохимикатов: кремнийсодержащие почвенные мелиоранты, кремниевые удобрения и биостимуляторы. Описаны принципы воздействия этих групп агрохимикатов на систему почва–растение.

**Ключевые слова:** кремнийсодержащие почвенные мелиоранты, кремниевые удобрения, кремниевые биостимуляторы.

**DOI:** 10.31857/S0002188123120049, **EDN:** SWVICB

### ВВЕДЕНИЕ

Зола растений является самым первым минеральным удобрением, применяемым человеком и по своему химическому составу и воздействию является кремниевым препаратом. Древние земледельцы, расчищая землю, сжигали лес и золу смешивали с почвой. В древнеримском государстве золу растений использовали для повышения плодородия истощенных земель. Об этом писал в своих трудах Вергилий: “Лишь бы ты почву сырым удобрил щедро навозом или нечистой золой утомленное поле посыпал” [1].

Более 2000 лет назад китайцы удобряли почву золой рисовой соломы, для которой характерно высокое содержание SiO<sub>2</sub>, называя ее “огненным навозом” [2]. Специальный указ императора обязывал китайских земледельцев оставлять часть рисовой соломы в почве. В настоящее время китайские фермеры продолжают пользоваться агро-

химическими приемами, включающими применение рисовой соломы и золы.

Применение кремниевых препаратов в сельском хозяйстве имеет более чем 150-летнюю историю, а исследования роли этого элемента в развитии растений были начаты более 200 лет назад. Еще в конце 18 века ученые (французский химик Л. Воклен, немецкий географ и натуралист А. Гумбольдт, британский химик и агрохимик Г. Дэви) указали на присутствие кремния в растениях. В 1814 г. Г. Дэви написал о кремнии как об элементе питания растений [3]. Он первым начал изучение форм кремния в растениях и предположил, что кремний, аккумулированный в эпидермальных тканях, обеспечивает механическую защиту растения от болезней и атак насекомых. Впоследствии на основании данных об элементном составе растений Ю. фон Либих пришел к выводу о потенциальной важности кремниевых удобрений [4]. Он впервые в тепличном эксперименте исследовал влияние силиката натрия на растения сахарной свеклы. Помимо увеличения урожайности, Ю. Либих отметил повышенное со-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103-6.

держание сахара в свекле. Работы Либиха послужили толчком для проведения полевых испытаний силиката натрия в качестве кремниевого удобрения. В 1856 J. V. Lawes организовал микрополевой эксперимент “Grass Park” на Ротамстедской опытной станции в Англии [5]. Данный эксперимент продолжается до сих пор, его результаты свидетельствуют о положительном влиянии силиката натрия на продуктивность трав [6]. Эти работы послужили началом исследований влияния кремниевых препаратов на фосфатное состояние почв [5].

В 1870 г. великий русский химик Д. И. Менделеев предложил использовать аморфный диоксид кремния в качестве удобрения, основываясь на его высокой растворимости [7]. В 1881 г. американская фирма “Zippicottes” впервые запатентовала применение силиката кальцийсодержащего отхода в качестве удобрения [8]. В 1898 г. профессор W. Maxwell, изучая почвенный покров Гавайских островов в поиске участков для выращивания сахарного тростника, впервые проанализировал почву на содержание доступного для растений кремния [9].

Среди первых работ, посвященных роли кремния, в физиологии растений следует отметить работы французских и немецких ученых: Pierre (1866 г.), Jodin (1883 г.), Kreuzhage и Wilf (1884 г.); Sommer, 1926 г.) [10, 11]. A. Grob (1896 г.) исследовал формы и структуру кремния в растительных клетках. Полученные им результаты подкрепили гипотезу Г. Дэви об усилении прочности эпидермальных тканей и участии Si в механической защите растений от насекомых и болезней [12].

В 1915–1917 гг. японский ученый I. Onodera после работы в Кенигсбергском и Кембриджском университетах инициировал изучение кремниевых удобрений в Японии [13]. Его работы послужили началом исследования роли кремния в растениях риса. В дальнейшем организованные единой программой многочисленные эксперименты подтвердили эффективность внесения кремниевых удобрений под рис [14–16]. В 1955 г. Министерство сельского хозяйства, лесоводства и рыболовства Японии официально рекомендовало внесение силиката кальция под культуру риса [17]. Среди основных причин, обусловивших решение министерства, были следующие: рис — основная сельскохозяйственная культура Японии — характеризуется высокой аккумуляцией кремния; в Японии распространена интенсивная система выращивания риса, включающая применение высоких доз азотных удобрений, что приводит к снижению устойчивости растений к болезням и насекомым-вредителям; рисовые

почвы обычно обеднены биодоступным кремнием; в качестве источника кремния можно использовать дешевые шлаки (силикат кальция), являющиеся отходами металлургической промышленности; практикуемое восполнение дефицита биодоступного кремния путем внесения рисовой соломы ограничено в основном из-за недостатка рабочей силы.

В США в первой четверти XX века возник интерес к кремниевым почвенным мелиорантам как альтернативе извести на кислых почвах. В качестве кремниевых мелиорантов было предложено использовать отходы металлургической промышленности и золу [18, 19]. В 1936 г. A. S. Auger организовал первые полевые испытания силиката кальция в качестве удобрения на латеритных почвах Гавайских островов [20]. В дальнейшем его исследования были продолжены во Флориде, где в настоящее время кремниевые удобрения успешно применяют при выращивании риса, сахарного тростника и газонной травы [21, 22].

В начале XX века в России кремний как биодоступный элемент привлек внимание почвоведов И. В. Тюрина, К. Гедройца, А. Н. Сабанина, А. Крылова [2, 23]. Темой магистерской работы А. Н. Сабанина была “О кремнеземе в зерне проса: (*Panicum miliaceum* L.)” (1901 г.) [24]. Повышенный интерес вызывали вопросы взаимовлияния соединений Si, P и Al [25]. В 1930-е годы в СССР проблемой взаимодействия фосфора и кремния занимались такие ученые как А. И. Литкевич и К. Л. Аскинази [26, 27].

Исключительного внимания заслуживают труды В. И. Вернадского, который отнес кремний к циклическим химическим элементам, подверженным постоянным изменениям и превращениям [28]. Исследование биогеохимического круговорота Si в биосфере было продолжено А. П. Виногорадовым [29].

Во второй половине XX века исследования роли и функций кремния были продолжены в СССР, США и Западной Европе. В то время основное внимание уделяли изучению теоретических аспектов функций кремния в системе почва—растение. Неоспоримым лидером в этом научном направлении являлся СССР. Миграцию кремния в грунтах и почвах изучали И. И. Плюснина (1980 г.), А. Г. Назаров (1976 г.), Я. М. Аммосова и В. Е. Приходько (1979 г.) [30–33]. Среди присутствующих в природных водах подвижных кремниевых соединений были выделены мономерные и димерные кремниевые кислоты, поликремниевые кислоты, кремнийорганические формы кремниевой кислоты [34]. Анализируя

многочисленные работы о накоплении кремнезема, В.А. Ковда пришел к выводу, что процесс миграции и аккумуляции соединений кремния в почвах – явление универсальное [35]. Несмотря на развитие фундаментальных знаний в нашей стране, в практике сельского хозяйства кремниевые соединения, в том числе шлаки металлургических комбинатов, более широкое применение нашли для улучшения почвенного плодородия (Япония) и для мелиорации кислых почв (Западная Европа).

Невозможно не упомянуть Р. Айлера, великого химика, опубликовавшего в 1979 г. классический труд “Химия кремнезема” [36]. Его работа до сих пор является основной для понимания физико-химической активности аморфного тонкодисперсного кремнезема. Другим выдающимся ученым в области кремнийорганической химии является академик М.Г. Воронков, создавший первый в мире биологически активный кремнийорганический препарат Мивал и обосновавший возможность замещения части фосфора в молекулах ДНК и РНК на атомы кремния [37, 38]. М.Г. Воронков совместно с Г.И. Зелчан и А.Ю. Лукевиц написал книгу “Кремний и жизнь”, где перечень литературы, посвященной роли кремния в жизни растений, животных, микроорганизмов и человека, насчитывает более 4000 наименований [39]. В это же время работали такие исследователи кремния, как Е.М. Карлиле, показавший высокую эффективность кремниевых препаратов для животных [40], и английский профессор Д. Бирчалл, изучавший влияние активных форм кремния на здоровье людей. За свои работы в данной области Д. Бирчалл удостоился звания рыцаря от королевы Великобритании Елизаветы Второй [41].

По-видимому, вершиной исследования роли кремния в живых организмах стал специальный нобелевский симпозиум, посвященный кремнию [42]. Многие статьи из сборника симпозиума до сих пор являются актуальными и непревзойденными.

Развитие химии и дешевизна агрохимикатов в конце XX и начале XXI века сильно затормозили исследование и практическое применение кремнийсодержащих препаратов. Во многом это было связано с незрелостью экологического мировоззрения. Например, на западе почву рассматривали исключительно как субстрат для выращивания сельскохозяйственных растений, очень часто игнорируя понятие о плодородии почв и его значение. Пестициды и гербициды преподносили как достижения, не имеющие альтернативы, при этом экологически чистые способы повышения

устойчивости растений к различным стресс-факторам расценивали как умышленную диверсию по отношению к успехам тогдашней химии. В результате финансирование работ по изучению кремниевых соединений в системе почва–растение резко сократилось.

В 1999 г. группа энтузиастов, занимавшихся исследованием кремния в сельском хозяйстве, организовала первую международную конференцию “Si in Agriculture”, которая прошла в городе Форт-Лодердейл (штат Флорида, США) [43]. Было принято решение о создании научного сообщества для координации исследований в данной области и о поддержке бизнеса, включая разработку стандартов и помощь в сертификации кремниевых препаратов для сельского хозяйства. С этого времени международные конференции “Si in Agriculture” проходили раз в 3 года: в Японии (2002 г.), Бразилии (2005 г.), Южной Африке (2008 г.), Пекине (2011 г.), Стокгольме (2014 г.), Индии (2017 г.) и США (2022 г.). Было предложено при изучении кремнийсодержащих соединений в вегетационных экспериментах симулировать какой-либо стресс, т.к. действие кремния на растения наиболее значимо при неблагоприятных условиях роста [44]. Были найдены участки генов, отвечающих за активный транспорт кремния в растениях [45]. Впервые были представлены теоретические и практические основы использования кремниевых соединений в качестве биостимуляторов [46]. Однако до сих пор остаются нерешенными такие проблемы, как унификация методов исследования кремниевых соединений в системе почва–растение и сертификация агрохимикатов на основе кремния. Исключением может служить Индия, где кремний классифицирован в качестве важнейшего питательного элемента, регламентировано ценообразование, качество и количество кремнийсодержащих продуктов [47].

В первом десятилетии XXI века остро встала проблема загрязнения сельскохозяйственных угодий тяжелыми металлами в результате неконтролируемого внесения удобрений, в частности, фосфорных. Особое внимание было уделено кадмию – элементу с небольшим токсическим действием на растения, но сильным токсическим действием на человека. Было установлено, что практически все сельскохозяйственные почвы Западной Европы, обеих Америк, Азии (кроме России и среднеазиатских республик) и Австралии загрязнены кадмием. Были выделены огромные суммы на решение этой проблемы, особенно в Китае. В результате была выявлена эффективность кремниевых соединений для детоксикации

кадмия и других тяжелых металлов и мышьяка в почве и предотвращения их аккумуляции в плодах растений [48]. Интенсивные исследования в этой области позволили выявить ряд не известных ранее кремний-индуцированных механизмов. В настоящее время число работ, посвященных взаимодействию кремния и кадмия, неуклонно растет. Результаты исследований были обобщены в ряде обзоров, в которых описаны прямые и опосредованные механизмы действия различных форм кремния на подвижность и транспорт кадмия в системе почва–растение [49].

В почве были выявлены следующие механизмы: адсорбция соединений кадмия кремнийсодержащими препаратами [48]; усиление сорбционной способности почв посредством изменения поверхностных свойств почвенных частиц под действием монокремниевой кислоты [50]; направленность взаимодействия кадмия и монокремниевой кислоты в почвенном растворе определяется концентрацией последней. Низкие концентрации монокремниевой кислоты (5–20 мг/кг Si) способны увеличивать подвижность кадмия в почве. Высокие концентрации монокремниевой кислоты (50 мг/кг Si и выше) обеспечивают иммобилизацию кадмия [50, 51]; некоторые кремниевые соединения увеличивают показатель pH почвы, тем самым снижая подвижность кадмия [52].

Для растений были определены следующие кремний-индуцированные механизмы: аккумуляция и осаждение (нейтрализация) кадмия в корнях [53]; снижение транспорта кадмия по симпласту и апопласту растений [54, 55]; усиление синтеза ферментов-антиоксидантов, снижающих негативное воздействие кадмия [56, 57]; образование защитного барьера путем суберинизации клеточных стенок корней [58]; ослабление токсического действия кадмия благодаря усилению стабильности генов [59]; соосаждение кадмия и кремния в растительных тканях [60]; связывание кадмия в клеточных стенках [61]; усиление синтеза и стабильности фотосинтетических пигментов [62]; сорбция и капсулирование органических и неорганических молекул, включая кадмий, полимерами кремниевой кислоты [55].

В ряде исследований отмечено усиление положительного влияния кремниевых соединений при совместном внесении с другими веществами. Например, была показана высокая эффективность совместного применения кремниевых удобрений и извести для снижения аккумуляции растениями кадмия [63, 64]. Синергетический эффект извести и кремнийсодержащих препаратов обусловлен снижением подвижности металла

в почве в результате повышения pH под действием Ca и снижением поглощения и транспорта кадмия в растении под действием кремния.

Одной из причин растущего в настоящее время интереса к кремнию являются изменяющиеся условия климата, приведшие к учащению засух и нехватке поливной воды [65]. Сотни исследований, проведенных за последние 2 десятилетия, позволили выявить участие Si в обеспечении защиты сельскохозяйственных культур в условиях стресса посредством: образования двойного Si-эпидермального слоя, препятствующего атакам насекомых-вредителей и развитию грибковых заболеваний [45]; развитию корневой системы и увеличение количества пигментов [17, 43]; нейтрализация токсичных соединений в тканях растений благодаря воздействию монокремниевой кислоты [51, 55]; оптимизации миграции и транспорта микро- и макроэлементов [66]; снижения уровня вызванных стресс-фактором окислительных деструктивных процессов путем активации синтеза стресс-ферментов, включая аскорбатпероксидазу, глутатионредуктазу, гваяколпероксидазу и др. [56].

Наши расчеты показали, что сейчас в мире ежегодно вносят  $\approx 4.5$  млн т кремниевых агрохимикатов. В настоящее время можно выделить 3 группы кремниевых препаратов, используемых в сельском хозяйстве, которые отличаются нормами внесения и принципом воздействия на почву и растения.

*Кремниевые почвенные мелиоранты.* Их действие в основном направлено на улучшение свойств почвы, таких как pH, структура, сорбционная способность и других. Обычно дозы внесения составляют 500 кг/га и больше. Благодаря высоким дозам данные препараты отчасти обеспечивают питание растений кремнием. К ним относятся силикат кальция (в основном промышленные отходы), цеолиты, диатомиты, перлиты, вермикулиты и другие [67, 68]. Среди используемых в сельском хозяйстве кремниевых мелиорантов преобладают промышленные отходы (<http://www.slg.jp/e/slag/product/hiryo.html>; <http://www.euroslag.org/products/statistics/>). Однако в связи с тем, что зачастую шлаки могут представлять определенную экологическую угрозу из-за присутствия тяжелых металлов и других неорганических загрязнителей, их использование в последнее время сокращается. Сейчас в России стали активно применять препараты на основе

цеолитов и диатомитов, например, производства компаний Диамикс, Татарские цеолиты, РусЭко-Органикс, Сибресурс и др.

*Кремниевые удобрения.* Их применяют с целью обеспечения питания растений кремнием и вносят в дозах от 40 до 501 кг/га. К данной группе можно отнести аморфный диоксид кремния (микросилика, пирогенная двуокись кремния), кремниевый гель, силикаты натрия и калия [17]. В настоящее время именно этот класс кремнийсодержащих агрохимикатов является самым востребованным.

В ряде стран Восточной и Юго-Восточной Азии в качестве кремниевого удобрения вносят рисовую солому, содержание диоксида кремния в которой может достигать 20% [69, 70]. Во Флориде при выращивании риса в ротации с сахарным тростником на торфяниках стерню риса запахивают в почву [71, 72]. В странах Азии рисовую солому ограничено используют как удобрение почв, т.к. в основном ее расходуют на корм животных и в строительстве [73]. Кроме этого, существует опасность распространения с соломой насекомых-вредителей [74].

*Кремниевые биостимуляторы.* Это новый класс кремниевых агрохимикатов, использовать которые начали в последние 2 десятилетия, а механизмы воздействия на растения стали изучать только в последние 10–15 лет. Кремнийсодержащие биопрепараты применяют для опрыскивания растений в дозах <10 кг/га и для обработки семян, а также вносят в почву вместе с поливной водой [75, 76].

В настоящий момент в продаже присутствует ряд синтетических кремнийсодержащих биостимуляторов: RBS (Нидерланды), АпаСил (Россия), Zumsil (США), Эк-Si (Россия), Biosil (Европа).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщение современных знаний позволяет выделить основные направления воздействия кремниевых препаратов на продуктивность системы почва–растение.

1. Увеличение урожайности и качества продукции растениеводства. Кремниевые препараты увеличивают урожайность в среднем на 5–30%. Доказано, что кремний существенно повышает содержание сахара в растениях и их плодах, в частности, во фруктах и ягодах.

2. Восстановление плодородия деградированных почв. Активные формы кремния влияют на состав вторичных минералов в почве и контролируют такие свойства, как водоудерживающая и сорбционная способности почв.

3. Повышение устойчивости почв к ветровой и водной эрозии.

4. Снижение токсичности алюминия в кислых почвах. Монокремниевая кислота прочно связывает подвижный алюминий, образуя алюмосиликаты. По своей эффективности кремниевые мелиоранты превосходят известковые материалы.

5. Снижение выноса питательных элементов (N, P, K) и сохранение их в доступной для растений форме. Многие кремниевые препараты способны физически сорбировать минеральные удобрения. Монокремниевая кислота обеспечивает освобождение фиксированного в почве фосфора в результате реакции замещения фосфат-аниона силикат-анионом в фосфатах кальция, железа и алюминия.

6. Усиление защиты растений от насекомых-вредителей, грибковых и инфекционных заболеваний без негативного влияния на окружающую среду, свойственного пестицидам и фунгицидам.

7. Повышение засухоустойчивости растений на фоне снижения расхода поливной воды на 30–40% и повышение устойчивости к другим абиотическим стресс-факторам.

8. Усиление устойчивости растений к солевой токсикации.

9. Детоксикация тяжелых металлов в почве.

10. Ускорение созревания плодов растений на 1–2 нед и улучшение их качественных характеристик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вергилий П.М.* Буколики. Георгики. Энеида. М.: Худ. лит-ра, 1971. 418 с.
2. *Крупеников И.А.* История почвоведения. М.: Наука, 1981. 327 с.
3. *Davy H.* The elements of chemical philosophy. London: J. Johnson and Co., 1812. 564 p.
4. *Leibigh J.* Organic chemistry in its application to agriculture and plant physiology. London: Taylor and Walton, 1840. 414 p.
5. *Hall A.D., Morrison C.G.T.* On the function of silica in the nutrition of cereals // Proc. R. Soc. Lond. 1906. Ser. B. V. LXXVII. P. 455–477.
6. Rothamsted experimental station guide to the classical experiment. Norfolk: Rapide Printing, 1991. P. 23–27.

7. Менделеев Д.И. Основы химии. СПб.: Типография тов-ва "Общественная польза", 1870. № 3. 92 с.
8. Zippicotte J., Zippicotte J. Fertilizer: Pat. 238240 USA // Anted Staes Patent Office. 1881. V. 19. № 9. P. 496.
9. Maxwell W. Lavas and soils of the Hawaiian Islands // The American Naturalist. 1898. V. 32. № 378. P. 537–539.
10. Epstein E. Silicon // Ann. Rev. Plant Biol. 1999. V. 50. № 1. С. 641–664.
11. Sommer A.L. Studies concerning the essential nature of aluminum and silicon for plant growth // Agric. Sci. Univ. Calif. Pub. 1926. № 5. P. 57–81.
12. Grob A. Beitrage zur anatomie der epidermis der gramineenblätter // Bibl. Bot. Bd. Ht. 1896. V. 36. P. 1–96.
13. Onodera I. Chemical studies on rice blast // J. Sci. Agric. Soc. 1917. № 180. P. 606–617.
14. Miyake K., Adachi M. Chemische untersuchungen uber die widerstands fahigkeit der reisarten gegen die "Imochi krankheit" // Biochemistry. 1922. V. 1. № 2. P. 223–229.
15. Suzuki H. Studies on the Influence of some environmental factors on the susceptibility of the rice plant to blast and hemlminthosporim diseases, and on the anatomical characters of the plant // J. Coll. Agric. 1934. V. 13. № 1. P. 45–108.
16. Yoshida S. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant // Bull. Nat. Inst. Agric. Sci. 1965. Ser. B. № 15. P. 1–58.
17. Ma J.F., Takahashi E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Amsterdam: Elsevier, 2002. 294 p.
18. Davis D.E., MacIntire W.H., Comar C.L., Shaw W.M., Winterberg S.H., Harris H.C. Use of <sup>45</sup>Ca labeled quenched calcium silicate slag in determination of proportions of native and additive calcium in lysimeter leachings and in plant uptake // Soil Sci. 1953. V. 76. № 2. P. 153–164.
19. Schollenberger C.J. Silica and silicates in relation to plant growth and composition // Soil Sci. 1922. V. 14. № 5. P. 347–362.
20. Ayres A.S. Calcium silicate slag as a growth stimulator for sugarcane on low silicon soils // Soil Sci. 1966. V. 101. № 3. P. 216–227.
21. Anderson D.L., Snyder G.H., Martin F.G. Muti-year response of sugarcane to calcium silicate slag on Everglades Histosols // Agron. J. 1991. V. 83. P. 870–874.
22. Savant N.K., Snyder G.H., Datnoff L.E. Silicon management and sustainable rice production // Adv. Agron. San Diego, USA: Acad. Press, 1997. V. 58. P. 151–199.
23. Аммосова Я.М., Дьяков В.М., Матыченков В.В., Чернышев Е.А. Использование соединений кремния в сельском хозяйстве. М.: Минхимпром, 1990. 136 с.
24. Сабанин А.Н. О кремнеземе в зерне проса (*Panicum miliaceum* L.). Санкт-Петербург: типо-лит. Альгшулера, 1901.
25. Аммосова Я.М., Матыченков В.В. Кремний и подвижные фосфаты почвы // Химизация сел. хоз-ва. 1990. № 1. С. 47–50.
26. Аскинази Д.Л. Фосфатный режим почвы и известкование почв с кислой реакцией. М., Л.: изд-во АН СССР, 1949. 216 с.
27. Литкевич С.В. Влияние кремнекислоты на развитие растений. Сообщ. 2. По вопросам фосфатных и калийных удобрений и известкования. Л., 1936. С. 29–53.
28. Вернадский В.И. Биогеохимическая роль алюминия и кремния в почвах // Докл. АН СССР. 1938. № 21 (3). С. 127–130.
29. Виноградов А.П. Химический элементарный состав организмов моря. М.: Наука, 2001. 620 с.
30. Назаров А.Г. Биогеохимический цикл кремнезема // Биогеохимические циклы в биосфере. М.: Наука, 1976. С. 199–257.
31. Плюснина И.И. Метаморфические реакции низкотемпературного кремнезема в земной коре. М.: Изд-во МГУ, 1980. 225 с.
32. Приходько В.Е. Формы соединений кремния в почвах элювиального ряда (на примере Восточно-Европейской фации): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 1979. 20 с.
33. Приходько В.Е., Аммосова Я.М. К вопросу определения кремния в различных почвенных вытяжках // Вестн. МГУ. Сер. 17: Почвоведение. 1977. № 3. С. 76–78.
34. Варшал Г.М., Драчева Л.А., Ксензенко В.И., Замкина М.С. Количественное определение различных форм кремнекислоты в поверхностных водах // Мат-лы XXV гидрохимического совещ. Новочеркасск: Гидрометеоиздат, 1972. С. 33.
35. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 262 с.
36. Пер Р.К. The chemistry of silica. N.Y.: Wiley, 1979. 866 p.
37. Воронков М.Г., Скоробогатова В.И., Вугмейстер Е.К., Макаровский В.В. Кремний в нуклеиновых кислотах // ДАН СССР. 1975. № 220 (3). С. 723–725.
38. Воронков М.Г., Кузнецов И.Г., Дьяков В.М. Новый биостимулятор – Мивал в сельском хозяйстве // Результаты научных исследований в практику сельского хозяйства. М.: Наука, 1982. С. 87–89.
39. Воронков М.Г., Зелчан Г.И., Лукевиц А.Ю. Кремний и жизнь. Рига: Зинатне, 1978. 587 с.
40. Carlisle E.M. Silicon // Biochemistry of the essential ultratrace elements. Boston: Springer, 1984. V. 3. P. 257–291.
41. Birchall J.D. The essentiality of silicon in biology // Chem. Soc. Rev. 1995. V. 24. № 5. P. 351–357.
42. Bendz G. Biochemistry of silicon and related problems // Proc. 40<sup>th</sup> Nobel Symposium. Lidingo, Sweden, 1978. 591 p.
43. Datnoff L.E., Snyder G., Korndorfer G. Silicon in agriculture. Studies in plant science. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403 p.
44. Liang Y., Nikolic M., Bélanger R., Gong H., Song A. Silicon-mediated tolerance to salt stress // Silicon in agriculture. Dordrecht: Springer, 2015. P. 123–142.

45. *Ma J.F.* Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2004. V. 50. № 1. P. 11–18.
46. *Ma J.F., Tamai K., Yamaji N., Mitani M., Konishi S., Katsuhara M., Ishiguro M., Murata Y., Yano M.* Silicon transporter in rice // *Nature.* 2006. V. 440. P. 688–691.
47. *Tewatia R.K.* Silicon in Indian agriculture: Policy and promotional issues // *Proc. 7<sup>th</sup> Inter. Silicon in Agricul Conf. Bengaluru, India, 2017.* P. 155.
48. *Li L., Li Y., Wang Y., Tang M., Ai S.* Si-rich amendment combined with irrigation management to reduce Cd accumulation in brown rice // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2021. V. 21. P. 3221–3231.
49. *Khan I., Awan S.A., Rizwan M., Ali S., Hassan M.J., Brestic M.* Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil–plant interphase: A review // *Ecotox. Environ. Saf.* 2021. V. 222. 112510.
50. *Peng H., Ji X., Wei W., Bocharnikova E., Matichenkov V.* As and Cd sorption on selected Si-rich substances // *Water Air Soil Poll.* 2017. V. 228 (8). P. 1–11.
51. *Ji X., Liu S., Huang J., Bocharnikova E., Matichenkov V.* Monosilicic acid potential in phytoremediation of the contaminated areas // *Chemosphere.* 2016. V. 157. P. 132–136.
52. *Haynes R.J., Zhou Y.F.* Effect of pH and added slag on the extractability of Si in two Si-deficient sugarcane soils // *Chemosphere.* 2018. V. 193. P. 431–437.
53. *Cai Y., Zhang S., Cai K., Huang F., Pan B., Wang W.* Cd accumulation, biomass and yield of rice are varied with silicon application at different growth phases under high concentration cadmium-contaminated soil // *Chemosphere.* 2020. V. 242. P. 125–128.
54. *Wang Y., Liu J., Tang Y.* Inhibition effect of silicon on cadmium accumulation and transport in rice // *Ecol. Environ. Sci.* 2016. V. 25. № 11. P. 1822–1827.
55. *Wei W., Ji X., Saihua L., Bocharnikova E., Matichenkov V.* Effect of monosilicic and polysilicic acids on Cd transport in rice, a laboratory test // *J. Plant Growth Regul.* 2022. V. 41. № 2. P. 818–829.
56. *Balakhnina T.I., Bulak P., Matichenkov V.V., Kosobryukhov A.A., Włodarczyk T.M.* The influence of Si-rich mineral zeolite on the growth processes and adaptive potential of barley plants under cadmium stress // *J. Plant Growth Regul.* 2015. V. 75. № 2. P. 557–565.
57. *Huang H.L., Li M., Rizwan M., Dai Z., Yuan Y., Hossain M.M., Cao M., Xiong S., Tu S.* Synergistic effect of silicon and selenium on the alleviation of cadmium toxicity in rice plants // *J. Haz. Mater.* 2021. V. 401. 123393.
58. *Kreszies T., Kreszies V., Ly F., Thangamani P.D., Shellaikkutti N., Schreiber L.* Suberized transport barriers in plant roots: the effect of silicon // *J. Exp. Bot.* 2020. V. 71. № 21. P. 6799–6806.
59. *Kim Y.-H., Khan A., Waqas M., Shahzad R., Lee I.-J.* Silicon-mediated mitigation of wounding stress acts by up-regulating the rice antioxidant system // *Cereal Res. Commun.* 2016. V. 44. № 1. P. 111–121.
60. *Bhat J.A., Shivaraj S.M., Singh P., Navadagi D.B., Tripathi D.K., Dash P.K., Deshmukh R.* Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants // *Plants.* 2019. V. 8. № 3. P. 71.
61. *Guerriero G., Hausman J.F., Legay S.* Silicon and the plant extracellular matrix // *Front Plant Sci.* 2016. V. 7. P. 463.
62. *Emamverdian A., Ding Y., Xie Y.* Silicon mechanisms to ameliorate heavy metal stress in plants // *Biomed. Res. Inter.* 2018. 8492898.
63. *Li X.Y., Long J., Peng P.Q., Chen Q., Dong X., Jiang K.* Evaluation of calcium oxide of quicklime and Si–Ca–Mg fertilizer for remediation of Cd uptake in rice plants and Cd mobilization in two typical Cd-polluted paddy soils // *Inter. J. Environ. Res.* 2018. V. 12. № 6. P. 877–885.
64. *Wei X., Zhang P., Zhan Q., Hong L., Bocharnikova E., Matichenkov V.* Regulation of As and Cd accumulation in rice by simultaneous application of lime or gypsum with Si-rich materials // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021. V. 28. № 6. P. 7271–7280.
65. *Coskun D., Britto D.T., Huynh W.Q., Kronzucker H.J.* The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress // *Front. Plant Sci.* 2016. № 7. P. 1072.
66. *Hernandez-Apaolaza L.* Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review // *Planta.* 2014. V. 240. № 3. P. 447–458.
67. *Матыченков И.В.* Взаимное влияние кремниевых, фосфорных и азотных удобрений в системе почва–растение: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2014. 136 с.
68. *Куликова А.Х.* Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: УлГАУ, 2013. 176 с.
69. *DeDatta S.K.* Principles and practices of rice production. N.Y.: Wiley & Sons, 1981. 618 p.
70. *Yoshida S.* The availability of silicon in paddy soil // *Paddy soil science.* Kodansha, Tokyo, Japan, 1978. P. 293–299.
71. *Dean J.L., Todd E.H.* Sugarcane rust in Florida // *Sugar J.* 1979. V. 42. P. 10.
72. *Deren C.W., Datnoff L.E., Snyder G.H.* Variable silicon content of rice cultivars grown on everglades histosols // *J. Plant Nutr.* 1992. V. 15. № 11. P. 2363–2368.
73. *Amarasiri S.L., Wickramasingke K.* Use of rice straw as a fertilizer material // *Tropical Agriculturist.* 1977. V. 133. P. 39–49.
74. *Boe H.D., McAllister T.A., Kokko E.G., Leggett F.L., Yankee L.J., Jakober K.D., Ha J.K., Shin H.T., Cheng K.J.* Effect of silica on colonization of rice straw by ruminal bacteria // *Anim. Feed Sci. Technol.* 1997. V. 65. № 1–4. P. 165–182.
75. *Artyszak A., Gozdowski D., Siuda A.* Effect of the application date of fertilizer containing silicon and potassium on the yield and technological quality of sugar beet roots // *Plants.* 2021. V. 10. № 2. P. 370.
76. *Гранкина А.О.* Влияние кремнийсодержащих биостимуляторов на морозоустойчивость пшеницы // Кремний и жизнь. Кремнистые породы в сельском хозяйстве. Ульяновск: УлГАУ, 2021. P. 41–46.

## Silicon-Based Materials in Agriculture

**E. A. Bocharnikova<sup>a,#</sup>, V. V. Matichenkov<sup>a</sup>, and I. V. Matichenkov<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Institute Basic Biological Problems RAS  
Institutskaya ul. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia,*

<sup>b</sup>*LLC “StroyPartner”  
prosp. Ryazanskiy 86/1, p. 3, Moscow 109542, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: msvk@rambler.ru*

The more than 200-year history of studying the role and functions of silicon in the soil–plant system is shown. The main directions of research on silicon are given, including the study of the effect of silicon preparations on the mobility of heavy metals and on the resistance of plants to climatic changes. The silicon-mediated mechanisms of detoxification of cadmium-contaminated soils and reduction of cadmium accumulation by plants are generalized. There are 3 groups of silicon agrochemicals: silicon-containing soil meliorants, silicon fertilizers and biostimulators. The principles of the effect of these groups of agrochemicals on the soil–plant system are described.

*Keywords:* silicon-containing soil ameliorants, silicon fertilizers, silicon biostimulators.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ К ЖУРНАЛУ “АГРОХИМИЯ” ЗА 2023 г.

DOI: 10.31857/S0002188123120128, EDN: ILZTDA

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Возможности интенсификации технологии выращивания яровой пшеницы в лесостепи Западной Сибири

*И. Н. Шарков, С. А. Колбин, Н. В. Васильева.* № 6. С. 3–11.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

#### Плодородие почв

Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы и продуктивности зернотравяного севооборота в зависимости от баланса питательных веществ

*А. Н. Налиухин, А. В. Ерегин, Д. В. Демидов, Ю. Е. Гусева, А. А. Хрунов.* № 1. С. 3–12.

Изменение содержания подвижных форм азота в серых лесных почвах ополья под влиянием ландшафтных особенностей агротехнологий

*В. В. Окорков, И. М. Шукин, Л. А. Окоркова, В. И. Шукина, А. А. Козлов.* № 1. С. 13–24.

Агрохимические параметры плодородия пахотных луговых дифференцированных почв приморского края в условиях длительного сельскохозяйственного использования

*Е. А. Жарикова, М. Л. Бурдуковский, О. М. Голдная.* № 2. С. 3–9.

Эффективность приемов биоконверсии питательных веществ удобрений в зеленые корма на торфянике

*Т. Ю. Анисимова.* № 2. С. 10–14.

Фиксация калия и магния почвой агроценоза

*В. Н. Якименко.* № 3. С. 3–11.

Влияние бинарных сидеральных смесей с гречихой на активность целлюлозоразрушающих бактерий и качество пахотных черноземов

*А. М. Гребенников.* № 3. С. 12–19.

Сера в неорошаемых и орошаемых каштановых почвах и оценка применения возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под картофель

*М. Г. Меркушева, Л. Л. Убугунов, Л. Н. Болонева, И. Н. Лаврентьева.* № 3. С. 20–28.

Влияние содержания подвижного калия в почвах на урожайность зерновых культур и затраты калийных удобрений на ее формирование

*С. А. Шафран.* № 4. С. 3–10.

Физико-химические свойства чернозема выщелоченного при различной обработке почвы и применении удобрений в севообороте ЦЧР

*О. А. Минакова, Д. С. Мерзликина, П. А. Косякин, Е. Н. Манаенкова, О. К. Борнатов.* № 4. С. 11–18.

Мониторинг плодородия и экотоксикологического состояния реперных участков дерново-подзолистых почв Ивановской области

*А. А. Уткин.* № 4. С. 19–31.

Влияние гречишных сидеральных агрообъектов на агрофизические свойства почвенных ресурсов Черноземной зоны

*А. М. Гребенников.* № 4. С. 32–38.

Влияние технологий основной обработки почвы на трансформацию азотсодержащих органических соединений в агрочерноземе и активность ферментов азотного цикла

*Е. Н. Белоусова, А. А. Белоусов.* № 5. С. 3–12.

Изменение плодородия аллювиальной луговой почвы при разных системах удобрения в овощном севообороте

*И. Ю. Васючков, В. А. Борисов, О. Н. Успенская.* № 5. С. 13–19.

Влияние химических мелиорантов на микробиологическую активность черноземно-луговых почв

*Ю. И. Чевердин, Т. В. Титова.* № 6. С. 12–21.

Восполнение гумуса за счет пожнивно-корневых остатков в льняных севооборотах

*Н. Н. Кузьменко.* № 7. С. 3–8.

Показатели плодородия агросерой почвы вишневого сада при применении азотных и калийных удобрений

*Т. А. Роева, Е. В. Леоничева, Л. И. Леонтьева.* № 7. С. 9–18.

Динамика содержания и распределения микроэлементов в дерново-подзолистых почвах и растениях агроценозов

*А. А. Уткин, Н. И. Аканова, И. Б. Нода.* № 8. С. 3–15.

Изменение показателей эффективного плодородия почв каменной степи под влиянием лесных полос различной ландшафтной принадлежности

*Ю. И. Чевердин, В. А. Беспалов, Т. В. Титова.* № 9. С. 3–13.

Плодородие выщелоченного чернозема как результат 85-летнего применения удобрений в зерносвекловичном севообороте в условиях ЦЧР

*О. А. Минакова, Л. В. Александрова, Т. Н. Подвигина.* № 9. С. 14–21.

Влияние способов обработки лугово-черноземной почвы на содержание органического вещества и ее структурное состояние

*Н. Ф. Балабанова, Н. А. Воронкова, Л. В. Юшкевич.* № 10. С. 3–8.

Урожайность и качество сельскохозяйственных культур в зависимости от плодородия дерново-подзолистой почвы

*И. В. Лыскова, Т. В. Лыскова.* № 10. С. 9–19.

Динамика содержания элементов питания в агрочерноземе при возделывании рыжика посевного

*Н. Л. Кураченко, О. А. Ульянова, О. А. Власенко, В. В. Казанов, Е. Ю. Казанова.* № 10. С. 20–25.

Калийное состояние почвы и продуктивность культур при внесении минеральных удобрений и растительных остатков

*В. М. Назарюк, Ф. Р. Калимуллина.* № 11. С. 3–10.

Физико-химические характеристики органо-глинистых комплексов агрочерноземов разной локализации на склоне

*Е. В. Цомаева, З. С. Артемьева, Е. С. Засухина.* № 11. С. 11–22.

Влияние активных форм кремния на фосфатное состояние дерново-подзолистой почвы

*Е. А. Бочарникова, В. В. Матыченков, Г. В. Пироговская.* № 12. С. 3–10.

Влияние кремнистых пород на свойства почвы и урожайность сельскохозяйственных культур

*А. Х. Куликова.* № 12. С. 11–21.

Влияние диатомита, цеолита и бентонитовой глины на агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы и урожайность сельскохозяйственных культур

*А. В. Козлов, А. Х. Куликова, И. П. Уромова.* № 12. С. 22–30.

Оценка показателей кислотности-основности буферности и направления трансформации соединений кремния в дерново-подзолистой почве при применении различных кремнистых пород

*А. В. Козлов, А. Х. Куликова.* № 12. С. 31–46.

Запасы почвенного органического углерода при нулевой обработке почвы в условиях Среднего Поволжья

*К. В. Иващенко, С. В. Сушко, Ю. А. Дворников, Л. А. Мирный, Л. В. Орлова, Н. Д. Ананьева, С. В. Неприимерова, А. В. Юдина, Н. М. Троц.* № 12. С. 47–56.

## Удобрения

Повышение окупаемости азотных подкормок озимой пшеницы при применении оригинальных методов расчета их оптимальных доз

*Ю. Ф. Осипов, А. А. Новикова.* № 1. С. 25–32.

Методика оценки отзывчивости гибридов кукурузы на азотное удобрение

*И. Н. Ивашенко, В. Н. Багринцева.* № 1. С. 33–38.

Изучение длительного действия минеральных удобрений в стационарном опыте в степном Поволжье

*В. В. Пронько, Д. Ю. Журавлев, Т. М. Ярошенко, Н. Ф. Климова.* № 2. С. 15–28.

Эффективность новых форм НРК-удобрений с замедленным и регулируемым высвобождением питательных веществ при выращивании яровой пшеницы на дерново-подзолистой почве

*В. М. Лапушкин, Ф. Г. Игралиев, А. А. Лапушкина, С. П. Торшин, А. М. Норов, Д. А. Пагалешкин, П. С. Федотов, В. В. Соколов, И. М. Кочетова, Е. А. Рыбин.* № 2. С. 29–35.

Эффективность применения навоза, биокомпостов и сидератов под овощные культуры

*В. А. Борисов, О. Н. Успенская, А. А. Коломиец, И. Ю. Васючков.* № 2. С. 36–40.

Эффективность применения различных систем удобрения на дерново-подзолистой тяжело-суглинистой почве в условиях Предуралья

*М. Т. Васбиева, В. Р. Ямалдинова.* № 3. С. 29–42.

Влияние возрастающих уровней минерального питания на качество различных фракций зерна озимой ржи

*А. В. Пасынков, Е. Н. Пасынкова.* № 3. С. 43–52.

Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и про-

дуктивность однолетних трав в кормовом севообороте Европейского Севера

*Н. Т. Чеботарев, О. В. Броварова.* № 3. С. 53–59.

Влияние последействия извести и систематического применения удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и урожайность зерновых культур

*Н. А. Кирпичников, С. П. Бижан.* № 4. С. 39–43.

Длительность последействия минеральных удобрений в опыте Курганского НИИСХ

*О. В. Волюнкина.* № 4. С. 44–50.

Влияние минеральных удобрений на динамику накопления биомассы и роста растений озимой ржи

*С. Е. Витковская, К. Ф. Шаврина.* № 5. С. 20–26.

Влияние применения фосфорного удобрения на варьирование прибавок урожайности сельскохозяйственных культур в условиях Зауралья

*О. В. Волюнкина.* № 5. С. 27–33.

Реакция гороха на азотное удобрение и инокуляцию семян риторфином на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности

*М. А. Алёшин, А. А. Завалин.* № 6. С. 22–38.

Влияние совместного применения фосфорных и магниевых удобрений на фоне азотно-калийных на урожайность, качество и вынос элементов питания яровым ячменем в зависимости от кислотности дерново-подзолистой почвы

*С. П. Бижан.* № 6. С. 39–46.

Влияние минеральных удобрений и подсева трав на трансформацию ботанического состава травостоя на выработанном торфянике

*Т. Ю. Анисимова.* № 7. С. 19–26.

Влияние длительного применения удобрений на почвообитающие микромицеты луговой черноземовидной почвы в посевах пшеницы

*Л. П. Шумилова, Е. В. Банецкая.* № 7. С. 27–36.

Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и продуктивность многолетних трав в кормовом севообороте Европейского Севера

*Н. Т. Чеботарев, О. В. Броварова.* № 8. С. 16–22.

Аминокислотный состав и биологическая ценность клубней орошаемого картофеля на каштановой почве при внесении возрастающих доз серных удобрений на фоне применения НРК

*М. Г. Меркушева, Л. Л. Убугунов, Л. Н. Болонева, И. Н. Лаврентьева.* № 8. С. 23–28.

Эффективность применения удобрений с микроэлементами в посевах ярового ячменя в условиях Курской области

*Ж. Н. Минченко, В. И. Лазарев.* № 8. С. 29–37.

Влияние длительного применения соломы и сидератов на серой лесной почве на продуктивность агроценозов

*И. Б. Сорокин, С. П. Кулижский, О. А. Пасько, О. Э. Мерзляков.* № 9. С. 22–27.

Удобрение однолетних трав на серых лесных почвах Владимирского ополья

*В. В. Окорков, Л. А. Окоркова, А. Е. Лебедева.* № 10. С. 26–37.

Влияние зеленого и минеральных удобрений на агрохимические показатели почвы и урожайность льнопродукции в севооборотах с короткой ротацией

*Т. П. Сухопалова.* № 10. С. 38–44.

Окупаемость фосфорных удобрений с учетом их длительного последействия

*О. В. Волюнкина.* № 11. С. 23–28.

Влияние бактериальных удобрений на микробиологическую активность чернозема сегрегационного в посевах ярового ячменя

*А. Ю. Чевердин, Ю. И. Чевердин, М. Ю. Сауткина.* № 11. С. 29–35.

Влияние кремнийсодержащей агроруды (диатомита) на урожайность сельскохозяйственных культур и качество растениеводческой продукции

*Е. Н. Кузин, А. Н. Арефьев, Е. Е. Кузина.* № 12. С. 57–66.

Влияние длительного применения минеральных удобрений на засоренность зернотравяно-пропашного севооборота

*А. М. Шпанев, В. В. Смур, М. А. Фесенко.* № 12. С. 67–75.

### Регуляторы роста растений

Влияние салициловой и янтарной кислот на показатели роста и фотосинтеза и содержание хлорофилла в растениях пшеницы, выращенных в условиях водного дефицита

*А. В. Якунина, Ю. В. Сеницына.* № 1. С. 39–48.

Действие штаммов бактерий с разной способностью к синтезу ауксинов и цитокининов на рост и водный обмен растений пшеницы

*Е. В. Мартыненко, Т. Н. Архипова, З. А. Ахтямова, Л. Ю. Кузьмина.* № 1. С. 49–56.

Роль и эффективность применения ретардантов в технологии выращивания табака

Т. В. Плотникова, С. В. Гвоздецкая. № 1. С. 57–65.

Использование синтетических цитокининовых регуляторов роста как антистрессовых препаратов при выращивании огурца в защищенном грунте

А. С. Лукаткин. № 2. С. 41–47.

Влияние состава питательной среды для культивирования бактерий и дозы препарата *Bacillus subtilis* 10-4 на ростовые показатели и продуктивность растений пшеницы

С. Р. Гарипова, Л. И. Пусенкова, О. В. Ласточкина, К. А. Федорова, М. А. Дедова, О. В. Маркова, В. Д. Матюнина, Р. А. Юлдашев. № 3. С. 60–69.

Влияние предпосевной обработки семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) органическими кислотами природного происхождения в разреженной среде на рост и развитие растений

Н. В. Верховцева, Е. Н. Кубарев, Г. Р. Балашов, А. Э. Роберт. № 4. С. 51–61.

Действие композиции биостимулятора с микроэлементами для ускорения роста и повышения продуктивности тыквы

Н. К. Хидирова, М. Р. Баратова, Ш. Косимова, Р. П. Закирова. № 4. С. 62–66.

Эффективность композиции на основе регулятора роста флороксан с глицирризиновой кислотой при выращивании хлопчатника и баклажана

Р. П. Закирова, С. С. Халиков, С. М. Тураева, Э. Р. Курбанова, Н. Д. Чкаников. № 5. С. 34–40.

Эффективность использования комплексного биопрепарата на посевах озимой пшеницы в полевых условиях Республики Мордовия

А. С. Пронин, Т. С. Колмыкова, А. С. Лукаткин. № 8. С. 38–44.

Совместное воздействие штамма PGPB *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D и гуминовых веществ на рост, содержание фотосинтетических пигментов и фитогормонов в растениях пшеницы в условиях засухи

А. В. Феоктистова, М. Д. Тимергалин, Т. В. Рамеев, С. П. Четвериков. № 9. С. 28–36.

Чемерица Лобеля – перспективный биопроцент биологически активных веществ для разработки биоцидного препарата в защите растений от вредных членистоногих

Т. А. Рябчинская, Л. Л. Яковлева, И. Ю. Бобрешова. № 11. С. 36–46.

Экстракт бадьяна в качестве регулятора роста растений

В. В. Тараненко, И. Г. Дмитриева, В. С. Муравьев. № 11. С. 47–52.

## Пестициды

Методические рекомендации по контролю за резистентностью обыкновенной полевки (*Microtus arvalis* Pall) к антикоагулянтным родентицидам

А. А. Яковлев. № 1. С. 66–72.

Новые комбинированные препараты для защиты картофеля от колорадского жука

М. Н. Шорохов, О. А. Кривченко, О. В. Долженко. № 2. С. 48–53.

Эффективность гербицидов в борьбе с сорняками и их фитотоксичность для сахарной свеклы в зависимости от возраста обрабатываемых растений и нормы расхода препаратов

Е. А. Дворянkin. № 3. С. 70–81.

Влияние диоксида серы, входящего в состав летучих органических соединений грибов рода *Lecanicillium*, на фитофагов западного цветочного трипса и персиковую тлю

Г. В. Митина, Е. А. Степаньчева, Ю. А. Титов, А. А. Чоголова, М. А. Черепанова, А. Г. Кузьмин. № 3. С. 82–86.

Монтмориллонит как эффективный стимулятор развития растений в почве, загрязненной метсульфурон-метилом

Н. Д. Чкаников, А. В. Пастухов, В. А. Абубикеров, Г. С. Босак, А. П. Глинушкин. № 5. С. 41–44.

Композиции фунгицидов с регуляторами роста для уменьшения ретардантного действия протравителей зерновых культур

О. В. Зорькина, Е. А. Сухова, О. О. Агапова, Е. Э. Нефедьева, И. Р. Грибуст, О. В. Колотова. № 7. С. 37–43.

Особенности развития технологий защиты растений в агроэкосистемах в условиях рыночной экономики России

В. А. Захаренко. № 8. С. 45–57.

Динамика применения пестицидов в Российской Федерации

В. В. Михайликова, Н. С. Стребкова. № 9. С. 37–41.

Эффективность баковых смесей препаратов для защиты яровой пшеницы и их влияние на качество зерна

В. Г. Доронин, Е. Н. Ледовский, И. В. Пахотина, С. В. Кривошеева. № 9. С. 42–49.

Комбинированные триазольные протравители и их влияние на рост и развитие проростков яровой пшеницы

*А. Ю. Кекало, С. С. Халиков, М. М. Ильин, Н. Д. Чкаников, Н. Ю. Заргарян.* № 10. С. 45–52.

Влияние остаточных количеств гербицидов из класса сульфонилмочевин на развитие всходов люпина белого и маша по результатам биотестирования на дерново-подзолистой почве

*С. В. Железова, В. Н. Колупаева, Е. В. Степанова, А. В. Мельников, М. А. Воронов, А. Э. Степанова, В. Е. Веллер.* № 11. С. 53–62.

Эффективность и безопасность пестицидов в защите подсолнечника от вредных организмов

*А. Б. Лантнев, В. К. Мальцев.* № 11. С. 63–70.

Совершенствование технологии применения биопрепаратов для защиты растений

*А. К. Лысов, Т. В. Корнилов, И. Л. Краснобаева.* № 11. С. 71–77.

### Агроэкология

Химический состав растений яровой пшеницы на кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, известкованной кальцийсодержащими отходами промышленности. Эмпирические модели транслокации макро- и микроэлементов в вегетативные и генеративные органы растений

*А. В. Литвинович, А. В. Лаврищев, А. О. Ковлева, В. М. Буре.* № 1. С. 73–82.

Влияние различных мелиорантов на интенсивность дыхания и содержание органического углерода в почвах Ростовского зоопарка

*А. Н. Федоренко, А. А. Гобарова, К. Ш. Казеев.* № 2. С. 54–61.

Оценка влияния различных катализаторов на деструкцию пищевых отходов в процессе их переработки

*А. С. Баикин, Е. П. Севостьянова, Е. В. Гришина, М. А. Каплан, Е. О. Насакина, К. В. Сергиенко, С. В. Кошушкин, С. М. Севостьянов, С. Е. Нефедова, Д. В. Демин, А. П. Глинушкин, М. А. Севостьянов.* № 2. С. 62–68.

Радиационная обработка семенного картофеля как метод подавления различных форм ризоктониоза на клубнях нового урожая

*Н. С. Чуликова, А. А. Малюга, У. А. Близнюк, П. Ю. Борщеговская, С. А. Золотов, Я. В. Зубрицкая, В. С. Ипатов, А. П. Черняев, И. А. Родин.* № 2. С. 69–78.

Валовое содержание и подвижные формы галогенов (фтора, брома и йода) в почвах Тывы

*Г. А. Конарбаева, Е. Н. Смоленцева, В. В. Демин.* № 3. С. 87–96.

Мониторинг агроэкологического состояния пахотных почв Центрально-Черноземного района России

*С. В. Лукин.* № 4. С. 67–77.

Изменение химических и биологических свойств пахотных почв при разной длительности периода промерзания

*В. Н. Пинской, Н. Н. Каширская, А. О. Алексеев, В. В. Малышев, А. В. Борисов.* № 4. С. 78–88.

Биологические приемы оптимизации возделывания многолетних злаковых трав в Нечерноземной зоне

*В. Н. Баринев.* № 4. С. 89–92.

Исследование почвенного биома молодого яблоневого сада интенсивного типа

*Е. В. Бондарева, Л. Г. Серая, Г. Е. Ларина.* № 5. С. 45–52.

Гуминовые почвомодификаторы из торфа и угля: влияние на химические и биологические свойства модельных почвосмесей

*А. А. Степанов, О. С. Якименко.* № 5. С. 53–59.

Аккумуляция атмосферного углерода культурами севооборота и влияние систем удобрения на накопление органического углерода пахотной дерново-подзолистой почвой

*Н. Е. Завьялова, М. Т. Васбиева, В. Р. Ямалтдинова, И. В. Казакова.* № 6. С. 47–56.

Применение аминовых солей глицирризиновой кислоты для предотвращения порчи винограда в период хранения

*М. И. Шатинова, Р. А. Асадуллаев, Ш. Ф. Нагиева.* № 6. С. 57–62.

Оценка эмиссии парниковых газов и запасов углерода при нулевой обработке чернозема в условиях лесостепной зоны Среднего Поволжья

*Л. В. Орлова, Н. М. Троц, В. И. Платонов, Е. В. Балашов, С. В. Сушко, И. Н. Колесниченко, С. В. Орлов, Е. В. Круглов.* № 7. С. 44–54.

Эндофитные штаммы *Bacillus thuringiensis* для разработки средств контроля численности колорадского жука на посадках картофеля

*А. В. Сорокань, Г. В. Беньковская, И. С. Марданшин, В. Ю. Алексеев, С. Д. Румянцев, И. В. Максимов.* № 7. С. 55–63.

Краевая обработка поля и полезащитных лесных насаждений от сорняков и вредителей

*И. М. Киреев, З. М. Коваль, М. В. Данилов.* № 7. С. 64–74.

Режим влажности чернозема выщелоченного, урожайность и качество корнеплодов сахарной свеклы при разных погодных и агротехнических условиях в ЦЧР

О. К. Боронтов, П. А. Косякин, Е. Н. Манаенкова. № 8. С. 58–67.

Микробиоценоз почв криоморфозов юга Витимского плоскогорья

Э. О. Чимитдоржиева, Ц. Д.-Ц. Корсунова, Г. Д. Чимитдоржиева. № 8. С. 68–74.

Эффективность применения биогуруса личинок мухи черная львинка (*Hermetia illucens*) при прорастании семян зернобобовых культур

К. А. Баитовенко, С. И. Лоскутов, Д. С. Рябухин. № 10. С. 53–60.

Влияние аморфного кремнезема на продуктивность и качество томатов

Е. А. Бочарникова, А. А. Касацкий, В. В. Матыченков. № 10. С. 61–65.

Применение водной суспензии пористых наночастиц SiO<sub>2</sub>, содержащих 9,10-дифенилантрацен, в агрофотонике

Б. М. Гареев, Г. Л. Шарипов, О. В. Ласточкина. № 10. С. 66–74.

Потери кальция из мелиорируемой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при разном уровне влагообеспеченности

А. В. Литвинович, А. В. Лаврищев, В. М. Буре, И. В. Салаев. № 10. С. 75–86.

Транслокация кальция в растения ярового рапса из дерново-подзолистой супесчаной почвы, мелиорированной конверсионным мелом в широком интервале доз. Сравнение методик подготовки данных для построения эмпирических моделей

А. В. Литвинович, А. В. Лаврищев, В. М. Буре. № 11. С. 78–85.

Плодородие и фитосанитарные качества перспективных сырьевых образцов для формирования искусственных почвенных смесей

Л. Л. Свиридова, М. А. Севостьянов, Е. В. Гришина, А. А. Свиридов, Д. Д. Поляков. № 11. С. 86–91.

Эффективность некорневой подкормки льна-долгунца препаратом Контролфит-Si на разных фонах минерального питания в условиях Центрального Нечерноземья

А. М. Конова, А. Ю. Гаврилова, Н. Е. Самсонова. № 12. С. 75–84.

Урожайность культур и баланс элементов питания в зернопаровом севообороте в условиях сухой степи Бурятии

А. С. Билтуев, Л.-З. В. Будажапов, А. К. Уланов. № 12. С. 85–91.

### Экотоксикология

Влияние длительного применения осадков сточных вод и извести на валовое содержание и концентрацию подвижных форм тяжелых металлов в супесчаной дерново-подзолистой почве

А. С. Фрид, В. А. Касатиков, Т. И. Борисочкина, К. А. Колчанова, Н. С. Никитина. № 1. С. 83–96.

Воздействие тяжелых металлов на обилие бактерий рода *Azotobacter* в серо-бурых почвах Апшеронского полуострова

С. И. Наджафова. № 4. С. 93–96.

Оценка фитотоксичности чернозема обыкновенного при применении *Vacillus* sp. и биочара для стимуляции разложения пожнивных остатков озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.)

Т. В. Минникова, Н. С. Минин, С. И. Колесников, А. В. Горюзов, В. А. Чистяков. № 5. С. 60–69.

Влияние хлоридного засоления на проростки ячменя

К. Б. Таскина, Н. М. Казнина, А. Ф. Титов. № 5. С. 70–76.

Содержание аминокислот в кормовых травах при возрастающем содержании свинца в почве

Г. Я. Елькина. № 6. С. 63–72.

Мониторинг <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr и <sup>40</sup>K в дерново-подзолистых почвах и растениях реперных участков Ивановской области

А. А. Уткин, Н. И. Аканова, И. Б. Нода. № 7. С. 75–85.

Анализ связи изоэнзимного полиморфизма ярового двурядного ячменя (*Hordeum vulgare* L.) с его сортовой устойчивостью к воздействию кадмия

А. В. Дикарев, В. Г. Дикарев, Н. С. Дикарева. № 8. С. 75–87.

Распределение редкоземельных элементов в профиле аллювиальной луговой почвы залива Куркуты оз. Байкал

О. В. Зарубина. № 8. С. 88–96.

Содержание токсичных элементов при внесении фосфогипса и помета в агрочернозем слабоэродированный

И. М. Габбасова, Т. Т. Гарипов, М. А. Комиссаров, О. А. Мелентьева. № 9. С. 50–55.

Влияние осадков сточных вод в сочетании с различными добавками на азотное состояние чернозема выщелоченного

*И. М. Габбасова, Т. Т. Гарипов, Е. С. Дорогая, М. А. Комиссаров, Ф. И. Назырова, А. С. Нигматзянов.* № 11. С. 92–96.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробоподготовка QuEChERS при определении пестицидов в яблоках хромато-масс-спектрометрическим методом

*А. З. Мухарлямова, М. В. Балымова, А. Г. Мухаметшина, К. Е. Буркин, Ф. А. Бекмуратова.* № 2. С. 79–86.

Способ получения, исследование структуры и механических свойств композиционного материала “хитозан-диоксид титан” сельскохозяйственного назначения

*А. С. Баикин, А. А. Мельникова, А. В. Михайлова, М. А. Каплан, Е. О. Насакина, К. В. Сергиенко, С. В. Конушкин, Е. П. Севостьянова, Е. В. Степанова, С. В. Железова, А. П. Глинушкин, М. А. Севостьянов.* № 5. С. 77–82.

Анализ гуминового вещества методом ОЭС-ИСП

*Р. П. Колмыков.* № 6. С. 73–80.

Адаптация метода аналитического контроля содержания  $\alpha$ -амилазы в зерне тритикале

*Е. К. Барнашова, А. Н. Покидышев, О. В. Слюзова, Ю. С. Гардина, С. В. Жилин, К. А. Тараскин.* № 9. С. 56–64.

Методы исследования активных форм кремния в природных водах, почвах, растениях и агрохимикатах

*Е. А. Бочарникова, В. В. Матыченков.* № 12. С. 92–97.

### ОБЗОРЫ

Негативные эффекты применения гербицидов группы имидазолинонов: проблемы и решения

*В. В. Бычкова, И. А. Сазонова, П. С. Пиденко, С. А. Пиденко, Н. А. Бурмистрова.* № 2. С. 87–96.

Роль бактерий рода *Pseudomonas* и их метаболитов в биоконтроле фитопатогенных микроорганизмов

*Т. М. Сидорова, В. В. Аллахвердян, А. М. Асатурова.* № 5. С. 83–93.

Агрогеохимические технологии управления потоками  $\text{CO}_2$  в агроэкосистемах. Сообщение 1. Факторы управления микробным звеном агрогеохимического круговорота

*В. Н. Башкин.* № 6. С. 81–96.

Агрогеохимические технологии управления потоками  $\text{CO}_2$  в агроэкосистемах. Сообщение 2. Восстановление микробного звена агрогеохимического круговорота

*В. Н. Башкин, Р. А. Галиулина.* № 7. С. 86–96.

Регуляторы роста и развития растений: классификация, природа и механизм действия

*С. С. Тарасов, Е. В. Михалёв, А. И. Речкин, Е. К. Крутова.* № 9. С. 65–80.

Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве и углеродный бюджет лесов

*Д. Г. Щепашенко, Л. В. Мухортова, О. В. Мартыненко, В. Н. Коротков, В. Н. Карминов.* № 9. С. 81–96.

Токсины почвенных микроскопических грибов: распространение, экологическая роль, биодegradация

*Ю. М. Поляк, В. И. Сухаревич.* № 10. С. 87–96.

Биостимуляторы на основе кремния

*А. О. Гранкина.* № 12. С. 98–105.

Кремниевые препараты в сельском хозяйстве

*Е. А. Бочарникова, В. В. Матыченков, И. В. Матыченков.* № 12. С. 106–113.

Правила для авторов. № 5. С. 106–96.

Предметный указатель к журналу “Агрохимия” за 2023 г. № 12. С. 114–120.