

5. Vorobev, A. N. Biologicheskaya effektivnost dovskhodovykh gerbitsidov v posevakh soi na fone predposevnoy obrabotki pochvy / A. N. Vorobev, E. B. Zakharova // Agropromyshlennyy kompleks: problemy i perspektivy razvitiya: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Blagoveshchensk, 20–21 aprelya 2023 goda. T. 1. – Blagoveshchensk: Dalnevostochnyy GAU, 2023. – S. 9-14. – DOI 10.22450/9785964205385_1_9.

6. Denisova, D. A. Vliyaniye sorta i usloviy vzdelyvaniya na urozhaynost soi v Biysko-Chumyshskoy zone Altayskogo kraya / D. A. Denisova, S. V. Zharkova // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2025. –

No. 1 (243). – S. 5-10. – DOI 10.53083/1996-4277-2025-243-1-5-10.

7. Dospekhov, B.A. Praktikum po zemledeliyu / B.A. Dospekhov, I.P. Vasilev, A.M. Tulikov. Moskva: Agropromizdat, 1987. – 383 s.

8. Vadyunina, A.F. Metody issledovaniy fizicheskikh svoystv pochv i gruntov / A. F. Vadyunina, Z. A. Korchagina. Moskva: Agropromizdat, 1986. 416 s

9. Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur / pod red. V.I. Golovocheva, E.V. Kirilovskoy. Moskva: Kalininskaya oblastnaya tipografiya, 1989. Vyp. 2. 197 s.



УДК 632.15

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-262-8-24-30

**А.С. Яковлев, Е.А. Бочарникова,
В.В. Матыченков, И.А. Косачев
A.S. Yakovlev, E.A. Bocharnikova,
V.V. Matychenkov, I.A. Kosachev**

ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КРЕМНИЯ НА ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВЫ: МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

EFFECT OF ACTIVE FORMS OF SILICON ON SOIL FERTILITY: A MODEL EXPERIMENT

Ключевые слова: аморфный диоксид кремния, монокремниевая кислота, микробная активность, элементы питания, сорбция, плодородие почв.

Плодородие почв – ключевой параметр продуктивности агроэкосистем и урожайности культур. Ежегодно в мире из-за деградации теряется 12 млн га почв. Внесение мелиорантов, грамотный подбор удобрений и оптимальные технологии возделывания культур способствуют сохранению почвенного плодородия. Известно, что применение кремнийсодержащих мелиорантов обеспечивает улучшение ряда почвенных характеристик, контролирующих качество сельскохозяйственных земель, однако исследований их действия на разных типах почв по-прежнему недостаточно. Цель работы – изучить влияние аморфного кремнезёма (SiO_2) на сорбцию питательных элементов и микробную активность дерново-подзолистой, серой лесной почв и чернозёма южного в модельном эксперименте. В образцы пахотных горизонтов почв добавляли тонкодисперсный диоксид кремния в дозах 200, 500 и 1000 кг/га. После инкубации в течение 2 мес. в почвах определяли pH, содержание органического вещества, ёмкость катионного обмена, содержание доступных форм фосфора и калия, а также активность каталазы. Во всех

3 почвах внесение SiO_2 улучшило сорбционную способность, микробную активность и содержание доступных форм К и Р при снижении их выноса, а также снизило вынос аммиачного азота. В дерново-подзолистой почве отмечено увеличение содержания органического вещества, что, вероятно, связано с усилением микробиологической активности. Предположено, что действие кремнезёма обусловлено повышением концентрации мономеров и полимеров кремниевой кислоты благодаря его высокой растворимости. Монокремниевая кислота влияет на химические и биологические процессы, включая микробную активность, а полимерные формы кремниевой кислоты – на агрегацию почвенных частиц. Таким образом, внесение активных форм кремния запускает прямые и опосредованные процессы, обеспечивающие повышение плодородия разных типов почв.

Keywords: amorphous silicon dioxide, monosilicic acid, microbial activity, nutrients, sorption, soil fertility.

Soil fertility is a key parameter of agroecosystem productivity and crop yields. Every year, 12 million hectares of soil are lost due to degradation globally. The application of soil ameliorants, proper fertilization, and optimal crop growing techniques help maintain soil ferti-

ty. The use of silicon-containing ameliorants is known to improve a number of soil characteristics that control the quality of agricultural land; however, their effects on different soil types are understudied. The research goal was to study the effect of amorphous silica (SiO_2) on the sorption of nutrients and microbial activity in soddy-podzolic soil, gray forest soil, and southern chernozem in a model experiment. Finely dispersed silica was added to samples of arable horizons of these soils at 200, 500, and 1000 kg ha. After a two-month incubation period, the soils were analyzed for pH, organic matter content, cation exchange capacity, plant-available phosphorus and potassium, and catalase activity. In all three soils, the application of SiO_2 improved sorption capacity,

microbial activity, and the content of plant-available K and P while reducing their leaching, and also reduced the leaching of ammonium ions. In the soddy-podzolic soil, an increase of organic matter was observed which was likely associated with enhanced microbial activity. It is assumed that the effect of silica is due to increasing concentration of monomers and polymers of silicic acid as a result of its high solubility. Monosilicic acid influences chemical and biological processes, including microbial activity, while polymeric forms of silicic acid affect the aggregation of soil particles. Thus, the application of active forms of silicon initiates direct and indirect processes that enhance the fertility of different soil types.

Яковлев Александр Сергеевич, аспирант, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», г. Пушкино, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: novocheboksarec@yandex.ru.

Бочарникова Елена Афанасьевна, к.б.н., ст. науч. сотр., Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», г. Пушкино, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: mswk@rambler.ru.

Матыченков Владимир Викторович, д.б.н., гл. науч. сотр., Институт фундаментальных проблем биологии РАН, ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», г. Пушкино, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: vvmatichenkov@yandex.ru.

Косачев Иван Алексеевич, к.с.-х.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ivankosachov@mail.ru.

Yakovlev Aleksandr Sergeevich, post-graduate student, Institute of Fundamental Problems of Biology of Russian Academy of Sciences, Pushchino Scientific Center for Biological Research of Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: novocheboksarec@yandex.ru.

Bocharnikova Elena Afanasevna, Cand. Bio. Sci., Senior Researcher, Institute of Fundamental Problems of Biology of Russian Academy of Sciences, Pushchino Scientific Center for Biological Research of Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: mswk@rambler.ru.

Matychenkov Vladimir Viktorovich, Dr. Bio. Sci., Chief Researcher, Institute of Fundamental Problems of Biology of Russian Academy of Sciences, Pushchino Scientific Center for Biological Research of Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: vvmatichenkov@yandex.ru.

Kosachev Ivan Alekseevich, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ivankosachov@mail.ru.

Введение

Плодородие почв является одним из ключевых параметров, определяющих продуктивность агроэкосистем и урожайность сельскохозяйственных культур [1]. Согласно данным GLASOD, ежегодно в мире в результате деградации теряется 12 млн га почв [2]. Деградация почв – процессы, приводящие к ухудшению почвенного плодородия, что обусловлено многочисленными природными и антропогенными факторами, а их совместное действие значительно усиливает снижение качества почв.

Внесение почвенных мелиорантов, правильный подбор удобрений и оптимальных технологий выращивания растений способствуют сохранению и повышению плодородия почв [3]. В последнее время всё большее внимание уделяют кремнийсодержащим почвенным мелиорантам

[4]. К ним относятся как природные материалы (цеолиты, трепел, диатомиты), так и промышленные и синтетические продукты (шлаки, силикагели и др.) [4, 5].

Было показано, что применение кремнийсодержащих мелиорантов позволяет увеличить содержание доступного для растений фосфора [6], а также улучшить сорбционные свойства почв, тем самым снижая вынос питательных элементов [7]. Важным аспектом улучшения почвенного плодородия с помощью активных форм кремния является воздействие на микробную активность почв как одного из ключевых показателей уровня плодородия [8].

Целью работы было изучение влияния аморфного кремнезёма на сорбционные свойства по отношению к основным питательным элементам и на микробную активность дерново-

подзолистой, серой лесной почв и чернозёма южного в условиях модельного эксперимента.

Материалы и методы

Модельный эксперимент был проведён на базе Института фундаментальных проблем биологии РАН в 2025 г.

В качестве объектов исследования были выбраны пахотные (0-20 см) горизонты почв, различающиеся по генезису, гранулометрическому составу и содержанию органического вещества:

1) дерново-подзолистая почва (ДП) – север Московской области, гранулометрический состав: фракция > 0,25 мм 58%, фракция 0,25-0,01 мм 32%, фракция < 0,01 мм 10%; Сорг 1,2%; pH_{KCl} 6,5; ЕКО 11,5 мг-экв/100 г; подвижный фосфор (P_2O_5) 6,5 мг/100 г почвы; подвижный калий (K_2O) 5,7 мг/100 г почвы;

2) серая лесная почва (СЛ) – юг Московской области, гранулометрический состав: фракция > 0,25 мм 22%, фракция 0,25-0,01 мм 68%, фракция < 0,01 мм 10%; Сорг 2,8%; pH_{KCl} 6,1; ЕКО 22,3 мг-экв/100 г; подвижный фосфор (P_2O_5) 12,3 мг/100 г почвы; подвижный калий (K_2O) 14,3 мг/100 г почвы;

3) чернозем южный (ЧЮ) – республика Хакасия, гранулометрический состав: фракция > 0,25 мм 18%, фракция 0,25-0,01 мм 5%, фракция < 0,01 мм 47%; Сорг 3,2%; pH_{KCl} 7,3; ЕКО 35,8 мг-экв/100 г; подвижный фосфор (P_2O_5) 3,8 мг/100 г почвы; подвижный калий (K_2O) 48,3 мг/100 г почвы.

В эксперименте использовали химически чистый тонкодисперсный диоксид кремния (SiO_2) (средний размер частиц 20-25 нм, удельная поверхность 300 м²/г, содержание SiO_2 99,9%, содержание водорастворимого Si 245±15 мг/л, содержание кислоторастворимого Si 385±20 мг/л). Диоксид кремния вносили в количестве 0,2; 0,5 и 1 г/кг почвы, что соответствует дозам 200, 500 и 1000 кг/га. Почвы инкубировали в течение 2 мес. при температуре +20...+24°C и влажности 15-20%, которую поддерживали, добавляя дистиллированную воду. В течение этого периода почву регулярно (1 раз в 2-3 дня) перемешивали для обеспечения доступа воздуха. После 2 мес. инкубации в почвах определяли содержание активных форм кремния, pH_{KCl} , содержание органического вещества, емкость катионного обмена и активность каталазы.

Содержание активных форм кремния в почве измеряли по разработанной методике [9]. Образцы почв после инкубации помещали в пластиковые колонки (высота 10 см, диаметр 5 см). Через колонки пропускали по 200 мл раствора, содержащего NH_4^+ в виде мочевины, 20 мг/л; PO_4^{3-} в виде Na_3PO_4 , 20 мг/л и K^+ в виде KCl , 20 мг/л. Прошедший через колонку фильтрат собирали и измеряли содержание NH_4^+ , фосфора и калия.

Полученные результаты анализировали с помощью критерия Дункана. Для всех данных определяли наименьшую существенную разницу при 95%-ном уровне вероятности (HCp_{05}).

Результаты исследований и их обсуждение

Исследуемые ДП и СЛ почвы характеризуются низким содержанием активных форм кремния, тогда как в ЧЮ их содержание высокое (табл. 1). Добавление аморфного кремнезёма положительно повлияло на содержание активных форм кремния во всех изученных почвах. При внесении аморфного кремнезёма в дозе 1000 кг/га обеспеченность растений доступным кремнием дерново-подзолистой почвы выросла до уровня «хорошая», а серой лесной почвы и чернозёма – до уровня «высокая» [9]. Внесение аморфного кремнезёма также положительно влияло на содержание полимеров кремниевой кислоты в почвах.

Внесение аморфного кремнезёма не оказало значимого влияния на содержание органического вещества и pH в СЛ и ЧЮ (табл. 2). Можно отметить некоторое увеличение содержания общего углерода в ДП почве. Внесение кремнезёма привело к значительному повышению ЕКО, содержания доступных форм фосфора и калия, а также микробной активности. Увеличение дозы SiO_2 способствовало более значимому увеличению этих параметров. Особо следует отметить повышение содержания доступного фосфора в ЧЮ. В исходном чернозёме было отмечено высокое содержание кальция и низкое содержание биодоступного фосфора, так как кальций образует труднорастворимые соединения с анионами фосфора. Однако при увеличении концентрации монокремниевой кислоты – продукта растворения кремнезёма – происходит реакция замещения фосфат-аниона на силикат-анион, сопровождающаяся высвобождением фосфора в почвенный раствор [6].

Таблица 1

Влияние аморфного тонкодисперсного кремнезёма на кремниевое состояние почв, мг/кг

Вариант	Мономеры кремниевой кислоты (актуальный Si)	Кислоторастворимый Si (потенциальный Si)	Активный Si*	Полимеры кремниевой кислоты
Дерново-подзолистая почва				
Контроль	6,8	185	253	4,5
SiO ₂ 0,2 г/кг	15,8	203	361	5,6
SiO ₂ 0,5 г/кг	19,5	225	420	5,9
SiO ₂ 1 г/кг	22,5	286	511	6,3
Серая лесная почва				
Контроль	15,2	225	377	2,8
SiO ₂ 0,2 г/кг	20,2	268	470	3,5
SiO ₂ 0,5 г/кг	29,8	295	593	3,8
SiO ₂ 1 г/кг	32,6	316	642	4,5
Чернозем южный				
Контроль	35,6	358	714	12,5
SiO ₂ 0,2 г/кг	39,6	398	794	15,6
SiO ₂ 0,5 г/кг	42,5	412	837	18,8
SiO ₂ 1 г/кг	45,8	456	914	19,4
HCP ₀₅	1,5	15		1,5

Примечание. *Активный Si = актуальный Si x 10 + потенциальный Si.

Во всех исследованных почвах при внесении кремнезёма наблюдалось повышение микробной активности. Дерново-подзолистая почва характеризовалась наименьшей микробной активностью по сравнению с серой лесной и черноземом. Внесение кремнезёма резко (в 1,7 раза) повысило каталазную активность в ДП почве. Скорее всего, именно с повышением микробной активности связано некоторое увеличение содержания углерода в этой почве. Можно предположить, что усиление интенсивности биологических процессов обусловлено увеличением концентрации монокремниевой кислоты в почве, которая стимулирует рост биомассы и активность многих микроорганизмов [10].

Результаты колоночного эксперимента позволили оценить возможные потери основных элементов питания растений в результате вымывания из почв (табл. 3). Среди контрольных почв ДП характеризовалась наибольшей подвижностью азота, фосфора и калия. Наименьшей подвижностью данных элементов отличался ЧЮ, особенно по отношению к фосфору. Во всех типах почв внесение аморфного диоксида кремния существенно снизило вынос питательных элементов: на 11-48% аммония, 13-57% фосфора и 20-54% калия. Такое снижение выноса питательных элементов может быть обу-

словлено действием ряда механизмов. Обладая хорошими сорбционными свойствами, аморфный диоксид кремния способен увеличивать сорбционную способность почв [7]. Увеличение содержания мономерных и полимерных форм кремниевой кислоты также положительно влияет на данный показатель, так как монокремниевая кислота способна модифицировать поверхность почвенных частиц, тем самым улучшая их сорбционные свойства [11], а поликремниевые кислоты формируют силоксановые мостики между почвенными частицами, обеспечивая улучшение их агрегированности [12].

Важно отметить, что несмотря на повышение содержания доступного фосфора в ЧЮ при внесении аморфного кремнезёма усиления выноса фосфора из этой почвы в колоночном эксперименте не зафиксировано. Согласно литературным данным и нашим предыдущим исследованиям, данный факт объясняется тем, что фосфат-анион, образующийся в результате реакции замещения на силикат-анион в соединениях с кальцием, может физически сорбироваться как на внесенном аморфном диоксиде кремния, так и на новообразованном силикате кальция [4, 12]. Таким образом, происходит повышение содержания доступного фосфора в почве на фоне снижения его выноса.

Таблица 2

**Влияние аморфного тонкодисперсного кремнезёма
на физико-химические и биологические свойства почв**

Вариант	Сорг, %	pH	ЕКО, мг-экв/100 г	P ₂ O ₅ , мг/100 г	K ₂ O, мг/100 г	Активность каталазы, мкмоль H ₂ O ₂ /г/мин.
Дерново-подзолистая почва						
Контроль	1,22	6,5	11,5	6,5	5,7	2,8
SiO ₂ 0,2 г/кг	1,24	6,5	12,5	7,4	5,9	3,5
SiO ₂ 0,5 г/кг	1,25	6,5	14,5	8,5	6,2	4,1
SiO ₂ 1 г/кг	1,28	6,5	18,9	8,9	6,5	4,8
Серая лесная почва						
Контроль	2,82	6,1	22,3	12,3	14,3	4,5
SiO ₂ 0,2 г/кг	2,82	6,1	22,4	13,5	14,5	5,5
SiO ₂ 0,5 г/кг	2,83	6,1	23,8	14,8	14,8	6,3
SiO ₂ 1 г/кг	2,83	6,1	25,6	15,9	15,2	6,8
Чернозем южный						
Контроль	3,21	7,3	35,8	3,8	48,3	10,2
SiO ₂ 0,2 г/кг	3,22	7,3	36,4	10,5	48,6	11,4
SiO ₂ 0,5 г/кг	3,22	7,3	36,8	15,2	49,2	13,5
SiO ₂ 1 г/кг	3,24	7,3	37,5	18,9	49,6	14,8
HCP ₀₅	0,25	0,5	1,2	1,1	3,5	0,5

Таблица 3

Влияние аморфного тонкодисперсного кремнезёма на вынос азота, фосфора и калия из почв

Вариант	NH ₄		P		K	
	мг/л	%	мг/л	%	мг/л	%
Дерново-подзолистая почва						
Контроль	17,2	100,0	43,24	100,0	23,4	100,0
SiO ₂ 0,2 г/кг	15,3	89,0	37,49	86,7	18,72	80,0
SiO ₂ 0,5 г/кг	11,4	66,3	28,52	66,0	14,76	63,1
SiO ₂ 1 г/кг	10,6	61,6	23,69	54,8	10,68	45,6
Серая лесная почва						
Контроль	16,3	100,0	34,5	100,0	20,04	100,0
SiO ₂ 0,2 г/кг	12,3	75,5	19,09	55,3	14,76	73,7
SiO ₂ 0,5 г/кг	10,3	63,2	16,56	48,0	11,4	56,9
SiO ₂ 1 г/кг	8,4	51,5	14,72	42,7	9,96	49,7
Чернозем южный						
Контроль	10,3	100,0	5,75	100,0	16,2	100,0
SiO ₂ 0,2 г/кг	7,5	72,8	4,83	84,0	11,04	68,1
SiO ₂ 0,5 г/кг	6,8	66,0	4,14	72,0	9,84	60,7
SiO ₂ 1 г/кг	5,3	51,5	3,45	60,0	8,52	52,6
HCP ₀₅	1,2		0,2		0,4	

Выводы

1. Внесение аморфного тонкодисперсного кремнезёма в дерново-подзолистую, серую лесную почвы и чернозем южный обеспечило увеличение емкости катионного обмена, содержания доступного для растений фосфора и калия, а также активности каталазы.

2. Для почв с низким содержанием органического вещества, например, дерново-подзолистой

почвы, внесение SiO₂ позитивно влияло на содержание органического углерода, предположительно, благодаря усилению активности микроорганизмов.

3. Внесение аморфного тонкодисперсного кремнезёма снизило вынос аммонийного азота, фосфора и калия из пахотных горизонтов исследованных почв, что связано с хорошими сорбционными свойствами самого кремнезёма,

а также с увеличением концентрации мономерных и полимерных форм кремниевой кислоты, которые улучшают сорбционные свойства и агрегированность почвенных частиц.

Библиографический список

1. Lal, R. (2009). Soils and food sufficiency. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 29. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2008044>.

2. Shokri, N., Robinson, D. A., Afshar, M., Alewell, C., Aminzadeh, M., Arthur, E., et al. (2025). Rethinking global soil degradation: Drivers, impacts, and solutions. *Reviews of Geophysics*, 63, e2025RG000883. <https://doi.org/10.1029/2025RG000883>.

3. Якушев, В. П. Химическая мелиорация почв – вчера, сегодня, завтра / В. П. Якушев, А. И. Осипов. – Текст: непосредственный // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2013. – № 30. – С. 68-72.

4. Liang, Y., Liao, M., Fang, Z., et al. (2021). How silicon fertilizer improves nitrogen and phosphorus nutrient availability in paddy soil? *Journal of Zhejiang University. Science. B*, 22(7), 521–532. <https://doi.org/10.1631/jzus.B2000708>.

5. Куликова, А. Х. Влияние цеолита и удобрений на его основе на свойства чернозема выщелоченного и урожайность кукурузы / А. Х. Куликова, В. А. Исачев, Е. А. Яшин, М. С. Черкасов. – Текст: непосредственный // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 3 (67). – С. 89-95.

6. Bocharnikova, E. A. Soil fertility Effect of Active Si on Phosphate State in Sod-Podzolic Soils / E. A. Bocharnikova, V. V. Matichenkov, G. V. Pirogovskaya // *Russian Agricultural Sciences*. – 2025. – Vol. 51, No. 1. – P. 98-104. – DOI 10.3103/S106836742570065X.

7. Matichenkov, V., Bocharnikova, E., Campbell, J. (2020). Reduction in nutrient leaching from sandy soils by Si-rich materials: Laboratory, greenhouse and field studies. *Soil and Tillage Research*. 196. 104450. DOI: 10.1016/j.still.2019.104450.

8. Zhu, P., Chen, S., Shi, Y. (2024). Assessment of nano silicon fertilizer effects on soil nutrients, enzyme activities, and microbial communities. *Environmental Science: Nano*. 11. DOI: 10.1039/D4EN00223G.

9. Бочарникова, Е. А. Методы исследования активных форм кремния в природных водах,

почвах, растениях и агрохимикатах / Е. А. Бочарникова, В. В. Матыченков. – Текст: непосредственный // Агрохимия. – 2023. – № 12. – С. 92-97.

10. Verma, K. K., Song, X. P., Li, D. M., et al. (2022). Silicon and soil microorganisms improve rhizospheric soil health with bacterial community, plant growth, performance and yield. *Plant Signaling & Behavior*, 17(1), 2104004. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2104004>.

11. Babu, T., Tubana, B., Datnoff, L., et al. (2016). Release and Sorption Pattern of Monosilicic Acid from Silicon Fertilizers in Different Soils of Louisiana: A Laboratory Incubation Study. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. DOI: 10.1080/00103624.2016.1194995.

12. Zarebanadkouki, M., Al Hamwi, W., Abdalla, M., et al. (2024). The effect of amorphous silica on soil-plant-water relations in soils with contrasting textures. *Scientific Reports*, 14 (1), 10277. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60947-1>.

References

1. Lal, R. (2009). Soils and food sufficiency. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 29. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2008044>.

2. Shokri, N., Robinson, D. A., Afshar, M., Alewell, C., Aminzadeh, M., Arthur, E., et al. (2025). Rethinking global soil degradation: Drivers, impacts, and solutions. *Reviews of Geophysics*, 63, e2025RG000883. <https://doi.org/10.1029/2025RG000883>.

3. Yakushev, V. P. Khimicheskaya melioratsiya pochv – vchera, segodnya, zavtra / V. P. Yakushev, A. I. Osipov. // *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2013. – No. 30. – S. 68-72.

4. Liang, Y., Liao, M., Fang, Z., et al. (2021). How silicon fertilizer improves nitrogen and phosphorus nutrient availability in paddy soil? *Journal of Zhejiang University. Science. B*, 22(7), 521–532. <https://doi.org/10.1631/jzus.B2000708>.

5. Kulikova, A. Kh. Vliyanie tseolita i udobreniy na ego osnove na svoystva chernozema vyshchelochennogo i urozhaynost kukuruzy / A. Kh. Kulikova, V. A. Isaychev, E. A. Yashin, M. S. Cherkasov. – Текст: непосредственный // *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. – 2024. – No. 3 (67). – S. 89-95.

6. Bocharnikova, E. A. Soil fertility Effect of Active Si on Phosphate State in Sod-Podzolic Soils / E. A. Bocharnikova, V. V. Matichenkov, G. V. Pi-

rogovskaya // Russian Agricultural Sciences. – 2025. – Vol. 51, No. 1. – P. 98-104. – DOI 10.3103/S106836742570065X.

7. Matichenkov, V., Bocharnikova, E., Campbell, J. (2020). Reduction in nutrient leaching from sandy soils by Si-rich materials: Laboratory, greenhouse and field studies. *Soil and Tillage Research*. 196. 104450. DOI: 10.1016/j.still.2019.104450.

8. Zhu, P., Chen, S., Shi, Y. (2024). Assessment of nano silicon fertilizer effects on soil nutrients, enzyme activities, and microbial communities. *Environmental Science: Nano*. 11. DOI: 10.1039/D4EN00223G.

9. Bocharnikova, E. A. Metody issledovaniya aktivnykh form kremniya v prirodnykh vodakh, pochvakh, rasteniyakh i agrokhimikatakh / E. A. Bocharnikova, V. V. Matychenkov // *Agrokhiimiya*. – 2023. – No. 12. – S. 92-97.

10. Verma, K. K., Song, X. P., Li, D. M., et al. (2022). Silicon and soil microorganisms improve

rhizospheric soil health with bacterial community, plant growth, performance and yield. *Plant Signaling & Behavior*, 17(1), 2104004. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2104004>.

11. Babu, T., Tubana, B., Datnoff, L., et al. (2016). Release and Sorption Pattern of Monosilicic Acid from Silicon Fertilizers in Different Soils of Louisiana: A Laboratory Incubation Study. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. DOI: 10.1080/00103624.2016.1194995.

12. Zarebanadkouki, M., Al Hamwi, W., Abdalla, M., et al. (2024). The effect of amorphous silica on soil-plant-water relations in soils with contrasting textures. *Scientific Reports*, 14 (1), 10277. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60947-1>.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 125051305945-4 и 125051305914-0.

