

5. Obukhova I. V. Produktivnost kartofelya pri gosudarstvennom sortoispytanii v razlichnykh zemledelcheskikh zonakh Gornogo Altaya / I. V. Obukhova, T. A. Streltsova, A. A. Opleukhin, S. V. Zharkova // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – No. 2 (100). – S. 5-7.
6. Streltsova T.A. Ekologicheskaya izmenchivost produktivnosti sortov kartofelya pri introduksii v razlichnye zemledelcheskie zony Gornogo Altaya/ T.A. Streltsova, A.A. Opleukhin, S.V. Zharkova // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – No. 8 (118). – S. 12-18.
7. Rogozina E.V. Mezhvidovyе gibridy kak roditeльskie formy dlya uprezhdayushchey selektsii kartofelya na ustoychivost k boleznyam i vreditelyam / E.V. Rogozina, V.A. Biryukova, E.A. Simakov, V.A. Zharova, N.A. Chalaya, M.A. Kuznetsova, A.N. Rogozhin, M.P. Beketova, O.A. Fadina, E.E. Khavkin // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2018. T. 32. No. 1. S. 26-31.
8. Sherstyukova T. P. Otsenka iskhodnogo materiala kartofelya po khozyaystvenno tsennym priznakam (Kamchatskiy kray) / T. P. Sherstyukova, Ivashchenko A. D. // Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk. 2022. No. 2 (222). S. 131–136. DOI: 10.37102/0869-7698_2022_222_02_12.
9. Okasheva N. A. Izuchenie perspektivnosti vozdelyvaniya mezhvidovykh gibrider kartofelya v usloviyakh vysokogorya i nizkogorya Respubliki Altay / N. A. Okasheva, E. V. Rogozina, T. A. Streltsova [i dr.] // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023. No. 7 (225). S. 9–16. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-225-7-9-16.
10. Katalog mirovoy kollektii VIR / E. V. Rogozina, N. A. Chalaya, M. P. Beketova [i dr.]; Min. obr. nauki, FITS VIGRR im. N.I. Vavilova; Vyp. 866. – Sankt-Peterburg: FGBNU FITS VIGRR im. N.I. Vavilova, 2018. – 35 s. – DOI 10.30901/978-5-905954-75-7.
11. Metodicheskie ukazaniya po ekologicheskому sortoispytaniyu kartofelya. – Moskva: Izd-vo VASKhNIL, 1982. – 14 s.
12. Metodika issledovaniy po zashchite kartofelya ot bolezney, vrediteley, sornyakov i imunitetu. – Moskva, 1995. – 106 s.
13. Dospekhov, B. A. Metodika polevogo opыта (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy) / B. A. Dospekhov. – Moskva: Agropromizdat, 1985. – 351 s.
14. Snedekor D.U. Statisticheskie metody v primenenii k issledovaniyam v selskom khozyaystve i biologii. – Moskva: Selkhozgiz, 1961. – 503 s.

♦ ♦ ♦

УДК 632.15

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-255-1-38-43

В.В. Матыченков, Е.А. Бочарникова, И.А. Косачев

V.V. Matychenkov, E.A. Bocharnikova, I.A. Kosachev

ФИКСАЦИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА РАПСОМ И СОЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИМИ ПРЕПАРАТАМИ В УСЛОВИЯХ ВОДНОГО ДЕФИЦИТА, ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

CARBON SEQUESTRATION BY RAPE AND SOYBEAN UNDER APPLICATION OF SILICON-BASED BIOSTIMULANTS AND WATER DEFICIENCY: GREENHOUSE EXPERIMENT

Ключевые слова: фиксация диоксида углерода, рапс, соя, биомасса, кремнезем, монокремниевая кислота, биостимулятор, хлорофилл, каротиноиды, дефицит воды.

Keywords: carbon sequestration, rape, soybean, biomass, silica, monosilicic acid, biostimulant, chlorophyll, carotenoids, water deficiency.

Современное сельское хозяйство является одним из основных источников выбросов парниковых газов на фоне потери запасов почвенного углерода. В результате сельскохозяйственной деятельности выбросы парниковых газов в мире составляют порядка 10,7 млрд т CO₂-экв. в год, что занимает около 20% в структуре глобальных объемов выбросов. Выбросы парниковых газов от сельского хозяйства в России в 2019 г. составили 114,2 млн т CO₂-экв. Удельный вес выбросов от сельского хозяйства в совокупном объеме выбросов составил 5,4%. Применение кремнийсодержащих биостимуляторов может способствовать сокращению выбросов и усилию секвестрации углерода. Целью данного исследования была оценка влияния 2 препаратов – аморфного диоксида кремния и монокремниевой кислоты – на рост рапса и сои, их устойчивость к водному дефициту и фиксацию CO₂. Эксперимент проводили в фитотроне с моделированием оптимального и стрессового (50% от нормы) режимов полива. Результаты показали, что обработка биостимуляторами достоверно увеличивала биомассу обеих культур как в нормальных условиях, так и при стрессе. В случае рапса более эффективным был аморфный диоксид кремния, в случае сои – монокремниевая кислота. В условиях недостаточного полива препараты существенно увеличили содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов), что свидетельствует о повышении устойчивости растений. Теоретические расчёты показали, что при применении используемых в вегетационных испытаниях кремнийсодержащих биостимуляторов в полевых условиях могло бы увеличить связывание углерода корневой системой: для рапса – до 189 кг CO₂/га в норме и 315,6 кг/га при стрессе, для сои – до 85,2 и 94,7 кг/га соответственно. Таким образом, можно предположить, что используемые кремнийсодержащие биостимуляторы могут повысить устойчивость и продуктивность сельскохозяйственных культур, а также уменьшить антропогенное воздействие на атмосферу за счёт усиления секвестрации углерода.

Modern agriculture is a major source of greenhouse gas emissions leading to the loss of soil carbon storage. Globally, agricultural activities account for approximately 10.7 billion t CO₂eq of greenhouse gas emissions annually making about 20% of global emissions. In 2019, agricultural greenhouse gas emissions in Russia totaled 114.2 million t CO₂eq. Agricultural emissions accounted for 5.4% of total emissions. The application of silicon-containing biostimulants may help reduce emissions and enhance carbon sequestration. The research goal was to evaluate the effects of two products - amorphous silicon dioxide and monosilicic acid - on rape plant and soybean growth, their tolerance to water stress, and CO₂ fixation. The experiment was conducted in the phytotron that simulated the optimal and stress (50% of normal) irrigation regimes. The results showed that treatment with biostimulants significantly increased the biomass of both crops under both normal and stressed conditions. Amorphous silicon dioxide was more effective for rape plants while monosilicic acid was more effective for soybean. Under conditions of insufficient irrigation, the products significantly increased the content of photosynthetic pigments (chlorophylls and carotenoids) being indicative of increased plant resistance. Theoretical calculations showed that applying the silicon-containing biostimulants used in pot trials under field conditions could increase carbon sequestration by the root system: for rape plants, up to 189 kg CO₂/ha under normal conditions and 315.6 kg/ha under stress; and for soybean, up to 85.2 kg/ha and 94.7 kg/ha, respectively. Thus, it may be assumed that the tested silicon-containing biostimulants may increase the resilience and productivity of crops as well as reduce the anthropogenic impact on the atmosphere by enhancing carbon sequestration.

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

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

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

Matyuchenkov Vladimir Viktorovich, Dr. Bio. Sci., Leading 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.

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.

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

Введение

Современное интенсивное сельское хозяйство является значимым источником антропогенных выбросов парниковых газов. Его развитие сопряжено с ростом эмиссии диоксида углерода, метана и оксида азота, а также с сокращением запасов углерода в пахотных почвах [1]. Вклад агросфера в глобальные выбросы существенен: по данным 2019 г. на сельскохозяйственную деятельность во всем мире пришлось около 20% от общего объема парниковых газов, что составило 10,7 млрд т в CO₂-экв. [2]. В России выбросы от сельского хозяйства в тот же период достигли 114,2 млн т CO₂-экв., или 5,4% от национального объема выбросов [2].

Применение кремнийсодержащих агрохимикатов (мелиорантов, кремниевых удобрений и кремнийсодержащих биостимуляторов) может значительно сократить выбросы парниковых газов (от 10 до 90%) и ускорить секвестрацию углерода в почве за счёт формирования более развитой корневой системы растений и увеличения популяции почвенных микроорганизмов [3, 4]. К Si-содержащим биостимуляторам относятся жидкие или твёрдые соединения, у которых основным действующим веществом является (Si(OH)₄), часто называемая монокремниевой кислотой [5]. Лабораторные, тепличные и полевые испытания с различными кремнийсодержащими препаратами свидетельствуют, что их использование может значительно снизить негативное воздействие сельского хозяйства на состав атмосферы [6]. Однако процессы, обусловливающие влияние кремниевых агрохимикатов на эмиссию парниковых газов, нуждаются в детальном изучении.

Целью исследования было изучение на фитотроне влияния кремнийсодержащих биостимуляторов на рост и развитие рапса и сои в условиях дефицита воды и на фиксацию диоксида углерода.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны следующие химически чистые кремнийсодержащие препараты:

1) аморфный диоксид кремния с размером частиц D₅₀ 13 μm, удельной поверхностью 800±25 м²/г;

2) раствор монокремниевой кислоты, стабилизованный NaOH, с концентрацией 15±2% Si.

Оба препарата применяли по листу в дозах 250 и 500 г на 1 га в пересчёте на SiO₂ в виде суспензии (для аморфного диоксида кремния) и раствора (для монокремниевой кислоты) с использованием ручного пульверизатора.

Вегетационные исследования проводили на базе ИФПБ РАН (Институт фундаментальных проблем биологии Российской академии наук) в 2025 г. на культурах сои (*Glycine max*) сорт Вилана и рапса (*Brassica napus*) сорт Герос. В качестве субстрата использовали очищенный речной песок с содержанием железа менее 1%. Семена пшеницы перед посевом стерилизовали в 3%-ном растворе перекиси водорода (H₂O₂), промывали дистиллированной водой и затем выдерживали в течение 24 ч в темноте при температуре 20°C для проращивания. В литровые сосуды высевали по 5 семян сои или рапса. Для чистоты эксперимента и устранения добавочного фактора влияния на рост растений в вегетационном эксперименте, а также учитывая, что временной период выращивания составлял всего 4 недели, то никакие добавочные питательные элементы не применялись. В предварительных экспериментах был установлен оптимальный режим орошения путем культивирования растений в течение 3 недель при различных уровнях полива и определения биомассы. Оптимальный уровень полива составил 50 мл воды на литровый сосуд в сутки.

В первые две недели эксперимента поддерживали оптимальный режим полива. Затем растения опрыскивали в дозах 0,25 и 0,50 кг/га исследуемыми препаратами, которые смешивались с водой в пропорции 1:1000. Растения продолжали выращивать ещё в течение 3 дней при поливе 50 мл воды на литровый сосуд в сутки.

После этого опытные растения были разделены на две группы (по три повторности в каждой). В первой группе сохраняли оптимальный режим орошения (контроль), во второй норму полива поддерживали на 50% от оптимального уровня. Растения выращивали в данных условиях ещё две недели.

В фитотронной теплице поддерживали следующие показатели: температура воздуха 26±2°C днём и 24±2°C ночью, фотoperиод – 12 ч, интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) – 950 мкмоль фотонов·м⁻²·с⁻¹, относительная влажность воздуха – 85±5% днём и 75±5% ночью.

Свежесорванные листья растений анализировали на содержание пигментов (хлорофилла а (Хл а) и хлорофилла б (Хл б)) по методу Лихтентальера [7].

Статистическую обработку данных проводили с использованием дисперсионного анализа (ANOVA). Достоверность различий между средними значениями оценивали по критерию Дунканя при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Опрыскивание растений Si-содержащими препаратами имело положительное влияние на надземную и подземную биомассу рапса и сои как при оптимальных условиях увлажнения, так и в условиях водного дефицита (табл. 1). Максимальный эффект при выращивании рапса был получен при обработке аморфным диоксидом кремния при оптимальном поливе и монокремниевой кислотой при дефиците воды. Для сои максимальный эффект, независимо от режима полива, был получен при обработке монокремниевой кислотой.

Обработка растений рапса кремнийсодержащими препаратами обеспечила увеличение содержания хлорофилла а и каротиноидов на 2-5% и 1-4% соответственно. Максимальный эффект наблюдался при использовании аморфного кремнезема. В оптимальных условиях обработка кремнийсодержащими препаратами не оказала заметного влияния на содержание хлорофилла в в листьях рапса и на содержание всех тестируемых пигментов в листьях сои.

В условиях недостаточного полива влияние кремнийсодержащих биостимуляторов на содержание пигментов в листьях рапса и сои было более значимым. Так, в листьях рапса наблюдалось увеличение содержания хлорофилла а на 8-11%, хлорофилла б – на 5-10% и каротиноидов – на 10-28%. В листьях сои увеличение содержания хлорофилла а составило 1-7%, хлорофилла б – 10-23 и каротиноидов – 10-20%. Максимальный эффект был получен при обработке растений монокремниевой кислотой.

Таблица 1

Влияние кремнийсодержащих биостимуляторов на вес надземной и подземной частей рапса и сои при выращивании в оптимальных условиях полива и в условиях водного дефицита

Вариант	Листья и стебли		Корни	
	сырой вес	сухой вес	сырой вес	сухой вес
	одно растение, г			
Рапс				
Контроль (оптимальное увлажнение)	6,86	0,69	3,32	0,39
SiO ₂ , доза 0,25 кг/га	7,33	0,81	4,24	0,48
SiO ₂ , доза 0,50 кг/га	7,57	0,83	4,58	0,53
Монокремниевая к-та, 0,25 кг/га	7,12	0,67	3,86	0,43
Монокремниевая к-та, 0,50 кг/га	7,38	0,79	4,08	0,47
Контроль, 50% увлажнения (50% В)	4,98	0,47	2,78	0,33
50% В + SiO ₂ , 0,25 кг/га	6,46	0,69	4,41	0,51
50% В + SiO ₂ , 0,50 кг/га	6,84	0,72	4,82	0,57
50% В + Монокремниевая к-та, 0,25 кг/га	6,79	0,67	4,56	0,52
50% В + Монокремниевая к-та, 0,50 кг/га	7,18	0,76	4,84	0,57
HCP ₀₅	0,25	0,04	0,20	0,04
Соя				
Контроль (оптимальное увлажнение)	3,28	0,38	2,65	0,26
SiO ₂ , доза 0,25 кг/га	4,52	0,49	2,85	0,33
SiO ₂ , доза 0,50 кг/га	4,92	0,55	3,26	0,38
Монокремниевая к-та, 0,25 кг/га	4,63	0,52	3,47	0,39
Монокремниевая к-та, 0,50 кг/га	5,22	0,59	3,76	0,43
Контроль, 50% увлажнения (50% В)	2,87	0,24	1,88	0,19
50% В + SiO ₂ , 0,25 кг/га	3,38	0,33	2,45	0,28
50% В + SiO ₂ , 0,50 кг/га	3,99	0,42	2,62	0,32
50% В + Монокремниевая к-та, 0,25 кг/га	3,78	0,42	3,27	0,36
50% В + Монокремниевая к-та, 0,50 кг/га	4,33	0,45	3,38	0,38
HCP ₀₅	0,25	0,03	0,27	0,03

Полученные данные позволяют рассчитать связывание углерода исследуемыми культурами в течение месяца (табл. 2). Для расчёта использовали следующие нормы плотности и растений на 1 га: рапс – 800000, соя – 300000. Учитывая, что содержание углерода в сухих корнях составляет около 43%, можно оценить количество CO₂, которое дополнительно фиксируется корнями при применении кремнийсодержащих биостимуляторов. При нормальном увлажнении наибольшее количество фиксированного CO₂ было определено для рапса, обработанного аморфным кремнеземом.

Полученные данные показывают, что использование кремнийсодержащих биостимуляторов в вегетационном эксперименте способствовало усилению фиксации CO₂ из атмосферы, особенно в условиях водного стресса. Таким образом, на основании имеющихся в литературе и полученных нами данных можно предполагать, что использование тестируемых кремнийсодержащих биостимуляторов может снизить негативную нагрузку сельского хозяйства на газообмен между почвой и атмосферой и уменьшить негативное антропогенное влияние на состояние окружающей среды.

Таблица 2

**Дополнительная фиксация CO₂ корнями рапса и сои
при опрыскивании кремнийсодержащими биостимуляторами**

Вариант	Рапс	Соя
	кг/га	
Оптимальный полив		
SiO ₂ , 0,25 кг/га	126,2	37,9
SiO ₂ , 0,50 кг/га	189,4	61,5
Монокремниевая к-та, 0,25 кг/га	63,1	66,3
Монокремниевая к-та, 0,50 кг/га	113,6	85,2
Водный дефицит		
SiO ₂ , 0,25 кг/га	239,9	47,3
SiO ₂ , 0,50 кг/га	315,6	66,3
Монокремниевая к-та, 0,25 кг/га	252,5	85,2
Монокремниевая к-та, 0,50 кг/га	315,6	94,7

Выводы

Обработка по листу растений сои и рапса аморфным тонкодисперсным кремнезёмом и монокремниевой кислотой в условиях недостаточного полива обеспечила увеличение подземной и надземной биомассы, а также способствовала повышению эффективности фотосинтеза, что свидетельствует об адаптации растений к стрессовым условиям проводимого вегетационного краткосрочного эксперимента.

Результаты, полученные в искусственных условиях, нуждаются в подтверждении эффекта в полевых опытах как перспективный прием для снижения выбросов в атмосферу CO₂.

Использование тестируемых кремнийсодержащих биостимуляторов позволит снизить негативное антропогенное влияние сельского хозяйства в производственных условиях на атмосферу путём усиления фиксации углекислого газа корнями растений.

Библиографический список

1. Apoorva M. S., Kundlas, K. (2024). Negative impacts of intensive agricultural practices on environment and ecosystem: A review. *International Journal of Research in Agronomy*. 7. 285-289. DOI: 10.33545/2618060X.2024.v7.i12d.2146.
2. Ахметшина, Л. Г. Возможности российского сельского хозяйства в снижении выбросов парниковых газов и адаптации к климатическим изменениям / Л. Г. Ахметшина. – DOI 10.17513/vaael.2129. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2022. – № 4-1. – С. 5-14.
3. Jalali, M., Rad, K. V., & Etesami, H. (2024). The Use of Silicon-Based Fertilization in Agricultural Fields for Effective Management of Carbon Sequestration. In *Silicon Advances for Sustainable Agriculture and Human Health: Increased Nutrition and Disease Prevention* (pp. 113-144). Cham: Springer Nature Switzerland.
4. Rehman, I., Malik, M., Rashid, I., et al. (2022). Silicon Fertilization Increases Carbon Sequestration

by Augmenting PhytoOC Production in Wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition.* 23. DOI: 10.1007/s42729-022-01110-5.

5. Гранкина, А.О. Биостимуляторы на основе кремния / А.О. Гранкина. – Текст: непосредственный // Агрохимия. – 2023. – № 12. – С. 98-105.

6. Xu, L., Deng, X., Ying, J., et al. (2020). Silicate fertilizer application reduces soil greenhouse gas emissions in a Moso bamboo forest. *The Science of the Total Environment*, 747, 141380. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141380>.

7. Lichtenthaler, H.K. (1988). In Vivo Chlorophyll Fluorescence as a Tool for Stress Detection in Plants. In: Lichtenthaler, H.K. (eds) Applications of Chlorophyll Fluorescence in Photosynthesis Research, Stress Physiology, Hydrobiology and Remote Sensing. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2823-7_16.

References

1. Apoorva M. S, Kundlas, K. (2024). Negative impacts of intensive agricultural practices on environment and ecosystem: A review. *International Journal of Research in Agronomy.* 7. 285-289. DOI: 10.33545/2618060X.2024.v7.i12d.2146.
2. Akhmetshina, L. G. Vozmozhnosti rossiyskogo selskogo khozyaystva v snizhenii vybrosov parnikovykh gazov i adaptatsii k klimaticheskim izmeneniyam / L. G. Akhmetshina // Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava. – 2022. – No. 4-1. – S. 5-14. – DOI 10.17513/vaael.2129.

3. Jalali, M., Rad, K. V., & Etesami, H. (2024). The Use of Silicon-Based Fertilization in Agricultural Fields for Effective Management of Carbon Sequestration. In *Silicon Advances for Sustainable Agriculture and Human Health: Increased Nutrition and Disease Prevention* (pp. 113-144). Cham: Springer Nature Switzerland.

4. Rehman, I., Malik, M., Rashid, I., et al. (2022). Silicon Fertilization Increases Carbon Sequestration by Augmenting PhytoOC Production in Wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition.* 23. DOI: 10.1007/s42729-022-01110-5.

5. Grankina, A.O. Biostimulyatory na osnove kremniya / A.O. Grankina // Agrokhimiya. – 2023. – No. 12. – S. 98–105.

6. Xu, L., Deng, X., Ying, J., et al. (2020). Silicate fertilizer application reduces soil greenhouse gas emissions in a Moso bamboo forest. *The Science of the Total Environment*, 747, 141380. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141380>.

7. Lichtenthaler, H.K. (1988). In Vivo Chlorophyll Fluorescence as a Tool for Stress Detection in Plants. In: Lichtenthaler, H.K. (eds) Applications of Chlorophyll Fluorescence in Photosynthesis Research, Stress Physiology, Hydrobiology and Remote Sensing. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2823-7_16.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» в рамках научного проекта по договору № ЕП-109-3-25-223-2076.

