

Оригинальная статья / Original article

УДК 631.81

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-284-293>

Получение новых кремнийорганических удобрений и их апробация при моделировании водных стрессов

© Г.Ю. Рабинович, Ю.Д. Смирнова, Н.В. Фомичева

ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Москва, Российская Федерация

Резюме: Зачастую растения подвергаются воздействию резкого изменения климатических условий, которые пагубно отражаются на урожае. Перспективным направлением для снижения негативного воздействия абиотических факторов на растения является применение препаратов кремния. Целью данной работы являлось получение кремнийорганических удобрений и их апробация при моделировании абиотических стрессов для растений яровой пшеницы. За основу получения новых кремнийорганических удобрений с защитными свойствами были взяты органические удобрения, разработанные во Всероссийском научно-исследовательском институте мелиорированных земель: компост многоцелевого назначения (КМН) и продукт ферментации (ПФ). Новые кремнийорганические удобрения получали путем добавления метасиликата натрия в КМН и ПФ на стадии их дозревания в количестве 3 и 5 % масс. по SiO_2 . Растворение метасиликата сопровождалось активными процессами щелочного гидролиза, аммонификации и нитрификации, в результате которых повышалось содержание нитратов, гуминовых кислот и соединений кремния в готовых кремнийорганических удобрениях. Апробация новых кремнийорганических удобрений проводилась в лабораторном эксперименте путем моделирования водных стрессов (острый недостаток влаги и избыточная увлажненность почвы) для растений яровой пшеницы сорта Иргина. В целом наибольшая положительная реакция растений отмечена при использовании удобрений, содержащих 3 % SiO_2 . В вариантах с внесением новых удобрений имитирование острого недостатка влаги привело к развитию более мощных растений, характеризующихся незначительным изменением длины проростков на фоне достоверного увеличения их массы (в среднем на 7–10 % относительно исходных ПФ и КМН, не обогащенных кремнием). Моделирование условий избыточной влажности почвы в этих вариантах способствовало увеличению всех биометрических показателей в среднем на 6–11 % относительно исходных ПФ и КМН. Полученные кремнийорганические удобрения призваны уменьшать негативные абиотические воздействия на растения.

Ключевые слова: кремнийорганические удобрения, гуминовые кислоты, нитраты, водный стресс, проростки яровой пшеницы, сырая и сухая масса

Информация о статье: Дата поступления 27 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 29 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

Для цитирования: Рабинович Г.Ю., Смирнова Ю.Д., Фомичева Н.В. Получение новых кремнийорганических удобрений и их апробация при моделировании водных стрессов. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2020. Т. 10. N 2. С. 284–293. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-284-293>

Obtaining of new organosilicon fertilisers and their testing via water stress modelling

Galina Yu. Rabinovich, Yulia D. Smirnova, Natalia V. Fomicheva

Federal Research Center V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
Moscow, Russian Federation

Abstract: Under adverse climatic conditions, plants are often exposed to abrupt changes that negatively impact on crop yields. In this connection, a promising direction for reducing the negative impact of abiotic factors on plants consists in the use of silicon preparations. The present study is aimed at the synthesis of organosilicon fertilisers for spring wheat plants and their testing by means of abiotic stress modelling. As the basis for the synthesis of new organosilicon fertilisers with protective properties, the multipurpose compost

(KMN) and fermentation product (PF) developed at the All-Russia Research Institute of Reclaimed Lands were selected. New organosilicon fertilisers were obtained by adding sodium metasilicate in KMN and PF at the aging stage in amounts of 3 and 5 % mass. SiO_2 respectively. The dissolution of metasilicate was accompanied by active processes of alkaline hydrolysis, ammonification and nitrification, resulting in the increased content of nitrates, humic acids and silicon compounds in the finished organosilicon fertilisers. The testing of the obtained fertilisers was carried out in a laboratory experiment by modelling water stresses (acute lack of moisture and excessive soil moisture) for spring wheat plants of the Irgina breed. In general, the most significant positive reaction of plants was observed for fertilisers containing 3 % mass. of SiO_2 . In the cases of treatment with new fertilisers, imitation of an acute lack of moisture led to the development of more powerful plants characterised by a slight change in the length of the seedlings against the background of a significant increase in their mass (on average, by 7–10 % relative to the initial PF and KMN not enriched in silicon). Modelling of excess soil moisture in these cases contributed to an increase in all biometric indicators by an average of 6–11 % relative to the initial PF and KMN. Consequently, the obtained organosilicon fertilisers were experimentally shown to reduce negative abiotic effects on plants.

Keywords: organosilicon fertilisers, humic acids, nitrates, water stress, spring wheat seedlings, wet and dry mass

Information about the article: Received December 27, 2019; accepted for publication May 29, 2020; available online June 30, 2020.

For citation: Rabinovich GYu, Smirnova YuD, Fomicheva NV. Obtaining of new organosilicon fertilisers and their testing via water stress modelling. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2020;10(2):284–293. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-284-293>

ВВЕДЕНИЕ

Нестабильные погодные условия, связанные с резким похолоданием, засухой, проливными дождями, малоснежными зимами являются стрессовыми факторами для растений, которые отрицательно влияют на их рост, развитие и в конечном итоге пагубно сказываются на урожае. В связи с этим актуальное значение приобретает усиление компенсаторной способности сельскохозяйственных культур с целью повышения адаптации растений к внешним условиям. Одним из перспективных решений в данном направлении является применение антидепрессантов и иммуномодулирующих препаратов, к которым относятся различные синтетические и природные препараты, в том числе содержащие кремний. Потенциал кремния привлекает внимание ученых всего мира [1–3].

В качестве кремниевых удобрений используют некоторые горные породы (диатомиты и цеолиты), кремниевую кислоту и ее соль (метасиликат натрия), а также аморфный диоксид кремния [4–8]. Природные источники кремния вносят при предпосевной обработке почвы как отдельно, так и в смеси с органическим носителем (торф, навоз, помет, сапропель). Такие органоминеральные удобрения обеспечивают растения полноценным набором макро- и микроэлементов, способствуя повышению адаптации растений к изменяющимся условиям среды, что выражается в существенной прибавке урожая сельскохозяйственных культур [9–11].

Синтетический кремний используют чаще всего для обработки семян перед посевом и

некорневой обработки растений, что оказывает существенное влияние на содержание азота и фотосинтетических пигментов в растениях и способствует поддержанию продуктивности растений в стрессовых условиях на высоком уровне [12–14]. Существует ряд коммерческих жидких препаратов, содержащих в своем составе кремний, – Силиплант, Мивал-Агро, ЭкСи и др., положительный эффект от применения которых довольно высок [15–17].

Изучено, что, участвуя в физиологии растений, кремний способствует укреплению стенок эпидермальных клеток, обеспечивая жесткость различных органов растения и предотвращая тем самым полегание культуры [1, 14, 15]. Оптимизация кремниевого питания растений приводит к развитию более мощной корневой системы, увеличению площади листьев, усилению фотосинтетических и ферментативных процессов в листьях [3, 12, 14, 18].

Таким образом, оценивая имеющиеся научные наработки, следует подчеркнуть, что применение кремния в технологиях возделывания сельскохозяйственных растений позволяет повысить их устойчивость к стрессовым условиям, результатом чего являются высокие урожаи культур.

Целью данной работы являлось получение новых кремнийорганических удобрений и их апробация при моделировании абиотических стрессов для растений яровой пшеницы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

За основу получения новых кремнийорганических удобрений с защитными свойствами были взяты два органических удобрения, раз-

работанные во Всероссийском научно-исследовательском институте мелиорированных земель (ВНИИМЗ): компост многоцелевого назначения (КМН) и продукт ферментации (ПФ). КМН получают аэробной твердофазной ферментацией органического сырья (птичьего помета, навоза КРС и торфа, патент РФ 2598041), ПФ – аэробно-анаэробной твердофазной ферментацией навоза КРС и торфа (патент РФ 2365568). Оба удобрения имеют рассыпчатую структуру, в своем составе содержат различную микрофлору, элементы питания, физиологически активные вещества и характеризуются санитарно-эпидемиологической чистотой.

Исходная характеристика удобрений КМН и ПФ, применяемых в данном исследовании:

КМН:

- влажность – 60 %;
- $N_{\text{общ}}$ – $1,97 \pm 0,07$ % а.с.в.;
- P_2O_5 – $2,26 \pm 0,11$ % а.с.в.;
- K_2O – $1,93 \pm 0,08$ % а.с.в.;
- С – $21,5 \pm 1,3$ %;
- pH_{KCl} – $6,08 \pm 0,03$;
- общее микробное число (ОМЧ) –

$5-6 \cdot 10^8$ КОЕ/г;

ПФ:

- влажность – 63 %;
- $N_{\text{общ}}$ – $1,13 \pm 0,04$ % а.с.в.;
- P_2O_5 – $1,70 \pm 0,09$ % а.с.в.;
- K_2O – $1,4 \pm 0,08$ % а.с.в.;
- С – $29,0 \pm 1,6$ %;
- pH_{KCl} – $6,77 \pm 0,05$;
- ОМЧ – $7-8 \cdot 10^8$ КОЕ/г.

В качестве источника кремния использовали водорастворимую соль кремния – метасиликат натрия ($Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$), с содержанием оксида кремния (SiO_2) 28 %.

Получение новых кремнийорганических удобрений осуществляли путем добавления метасиликата натрия в КМН и ПФ на стадии их дозревания: в удобрения вносили метасиликат натрия, тщательно перемешивали и оставляли до полного растворения последнего, затем снова тщательно перемешивали. Дозы вносимого метасиликата натрия определяли, опираясь на литературные данные, с учетом выноса кремния (в виде SiO_2) растениями из почвенного раствора. Исследовали по два образца кремнийорганических удобрений на основе КМН и ПФ – с содержанием 3 и 5 % масс. SiO_2 , что соответствовало соотношению КМН или ПФ к метасиликату натрия 1:0,11 и 1:0,18 (масс.). Образцы новых кремнийорганических удобрений получали дважды. Каждая полученная партия анализировалась на ряд агрохимических и биохимических показателей в трехкратной аналитической повторности: pH_{KCl} (ГОСТ 27979-88); содержание общего

азота (ГОСТ 26715-85), нитратов (ГОСТ 27753.7-88) и гуминовых кислот (ГОСТ 9517-94); величину дегидрогеназной активности (Методы почвенной микробиологии и биохимии, под ред. Д.Г. Звягинцева, 1991). Статистическую обработку полученных данных проводили, используя элементы вариационной статистики: среднеарифметические значения и стандартные отклонения конкретных показателей (объем выборки $n = 6$).

Каждую из двух партий новых кремнийорганических удобрений апробировали в лабораторном эксперименте по выращиванию растений яровой пшеницы сорта Иргина в условиях моделирования стрессовых факторов. Для этого подготовленную дерново-подзолистую почву, имеющую агрохимическую характеристику – pH_{KCl} – $4,36 \pm 0,03$; P_2O_5 – 222 ± 13 мг/кг; K_2O – 145 ± 9 мг/кг; Нлг. – 58 ± 3 мг/кг; гумус – $3,0 \pm 0,2$ %, раскладывали в пластиковые контейнеры по 150 г и увлажняли до оптимальной влажности – 70 % от НВ. В почву вносили новые кремнийорганические удобрения, а также исходные КМН и ПФ из расчета 12 т/га (согласно указаниям по применению КМН для данной культуры по ТУ 9841-003-00668732-2011). В каждый контейнер сеяли по 21 шт. семян яровой пшеницы (3 рядка по 7 семян), дезинфицированных 1%-м раствором марганцевокислого калия. В качестве препарата сравнения использовали метасиликат натрия в количестве, равном его внесению с соответствующими новыми удобрениями. Контролем служил вариант без удобрения. Выращивание растений яровой пшеницы проводили в течение 2 недель. Для каждой партии новых кремнийорганических удобрений эксперимент закладывали в трехкратной повторности.

Моделировали следующие стрессовые факторы:

- острый недостаток влаги (засуха), который имитировали путем прекращения полива растений на 5-е сутки после посева; стресс продолжали до начала увядания растений, затем почву увлажняли до 70 % от НВ;

- избыточное увлажнение в фазу всходов (на 5-е сутки после посева) путем дополнительного полива; стресс имитировали до образования неисчезающего слоя воды на поверхности почвы.

Был предусмотрен блок вариантов выращивания яровой пшеницы без водного стресса, в котором поддерживали заданный уровень влажности почвы.

Оценку эффективности новых кремнийорганических удобрений проводили путем определения длин проростков, сырой и сухой массы растений.

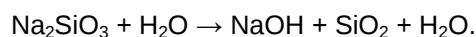
Статистическая обработка полученных результатов (объем выборки $n = 126$) включала

определение среднеарифметических значений показателей, проведение однофакторного дисперсионного анализа с вычислением НСР при 5 %-м уровне значимости и ошибки опыта Р.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью пакета программ Microsoft Excel 2003 и STATGRAPHICS Centurion XVI.II.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основу получения новых кремнийорганических удобрений составляло взаимодействие органических удобрений КМН и ПФ на стадии дозревания с метасиликатом натрия, что сопровождалось растворением последнего с образованием оксида кремния и щелочи:



В результате происходило ощелачивание получаемых кремнийорганических удобрений: уже через сутки наблюдалось повышение водородного показателя до 12, а спустя месяц произошла стабилизация продукта, и значение

pH установилось на уровне 10 (табл. 1).

Резкое изменение уровня pH приводило к щелочному гидролизу, в результате которого произошло значительное увеличение содержания гуминовых кислот в кремнийорганических удобрениях. На рис. 1 представлено содержание гуминовых кислот в удобрениях в виде среднеарифметических значений со стандартным отклонением, $n = 6$.

Известно, что гуминовые кислоты способны снижать влияние на растения абиотических стрессов, в частности, засухи, заморозков [19, 20]. В данном случае они выступают как транспортный насос, связываясь с необходимыми элементами питания и облегчая их проникновение в растения.

С увеличением дозы введенного метасиликата натрия количество гуминовых кислот возрастало, целом их содержание было больше в новых удобрениях на основе ПФ, максимальное содержание отмечали при внесении 5 % SiO_2 – 13,38 %.

Таблица 1

Агрохимическая характеристика удобрений

Table 1

Agrochemical characteristics of fertilizers

Вариант удобрения	pH		N _{общ} , %		NO ₃ , мг/кг в пересчете на с.в.	
	1 сут.	1 мес.	1 сут.	1 мес.	1 сут.	1 мес.
КМН	6,08±0,03	6,13±0,02	1,97±0,07	2,25±0,11	1842±124	2083±129
КМН + 3 % SiO_2	12,12±0,03	10,08±0,02	1,64±0,06	1,73±0,04	2218±146	2612±96
КМН + 5 % SiO_2	12,69±0,05	10,16±0,03	1,49±0,06	1,95±0,07	2512±106	2712±118
ПФ	6,77±0,05	6,53±0,03	1,13±0,04	1,23±0,07	545±41	629±50
ПФ + 3 % SiO_2	12,07±0,04	9,93±0,05	1,04±0,04	1,07±0,03	1163±79	1273±112
ПФ + 5 % SiO_2	12,76±0,03	10,24±0,04	0,88±0,02	1,11±0,03	1395±75	1485±107

Примечание. Представлены среднеарифметические значения показателей со стандартным отклонением, $n = 6$.

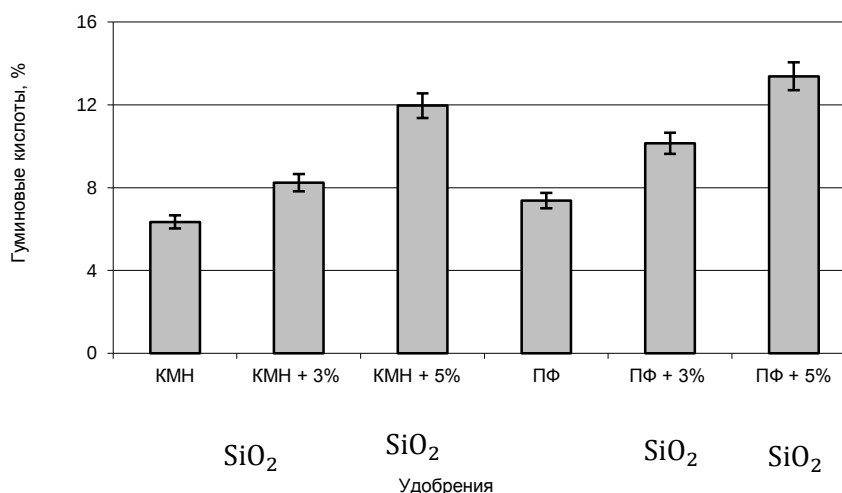


Рис. 1. Содержание гуминовых кислот в удобрениях

Fig. 1. Humic acid content in fertilizers

Помимо этого взаимодействие исходных КМН и ПФ (здесь и далее под исходными КМН и ПФ подразумеваются органические удобрения КМН и ПФ, необогащенные кремнием) с метасиликатом натрия сопровождалось резким запахом аммиака, что свидетельствовало об активно идущих процессах аммонификации. Проведенный на следующий день после смешивания агрохимический анализ показал, что в новых удобрениях снизилось содержание общего азота по сравнению с исходными КМН и ПФ, но при этом возросло количество нитратов (см. табл. 1). Это свидетельствовало о том, что часть аммонийного азота, образовавшаяся в процессе аммонификации, участвовала в процессе нитрификации, а часть – улетучивалась.

Известно, что в основе нитрификации лежит дегидрирование аммиака, осуществляемое ферментом дегидрогеназой¹. Активность указанного фермента в исследуемых удобрениях резко увеличивалась. В новых удобрениях на основе КМН дегидрогеназная активность возрастала с $3,5 \pm 0,2$ до $33,2 \pm 1,4$ мг ТФФ/г/24 ч и $38,1 \pm 1,6$ мг ТФФ/г/24 ч (для 3 и 5 масс. % соответственно), а в удобрениях на основе ПФ – с $5,6 \pm 0,3$ до $33,6 \pm 1,3$ мг ТФФ/г/24 ч при добавлении 3 % масс. SiO_2 и до $44,2 \pm 1,5$ мг ТФФ/г/24 ч при добавлении 5 % масс. SiO_2 .

В результате происходящих в удобрениях процессов трансформации снижение содержания общего азота обратно пропорционально зависело от количества добавленного оксида кремния – от 5 % масс. снижение было больше, чем от 3 %, и наоборот, количество нитратов увеличивалось с возрастанием дозы метасиликата (см. табл. 1).

Поскольку технологии производства КМН и ПФ несколько отличаются, и изначально при получении КМН использовался куриный помет, содержание общего азота и, в частности, нитратов, в КМН было существенно выше, чем в ПФ. При этом в кремнийорганических удобрениях на основе ПФ отмечали более значительное увеличение (~ в 2,0–2,5 раза) содержания нитратов по сравнению с 30 %-м их приростом при получении новых удобрений на основе КМН. Повышение содержания нитратов усиливает защитные свойства получаемых удобрений, поскольку нитраты являются важнейшим компонентом питания культур и позволяют растениям легче перенести негативное воздействие стрессовых факторов.

Корреляционный анализ подтвердил, что при получении кремнийорганических удобрений как на основе КМН, так и на основе ПФ содержание нитратов находилось в линейной зависимости от дегидрогеназной активности, коэффициент корреляции составлял

$r = 0,99$ (при $p < 0,05$).

Таким образом, введение в исходные органические удобрения КМН и ПФ метасиликата натрия усиливало процессы аммонификации и нитрификации, способствовало ошелачиванию удобрений. В результате были получены кремнийорганические удобрения с повышенным содержанием нитратов, гуминовых кислот и соединений кремния. При стрессе у растений запускается ряд биохимических реакций, направленных на снижение негативных воздействий, требующих дополнительных затрат на питание и энергию, которые и призваны компенсировать полученные удобрения.

Эффективность воздействия на растения новых кремнийорганических удобрений целесообразно оценивать, сравнивая варианты их применения с соответствующими вариантами внесения исходных КМН и ПФ. Предваряя детальный анализ полученных результатов, необходимо отметить, что применение КМН и новых удобрений на его основе способствовало более высоким значениям всех исследуемых биометрических показателей яровой пшеницы, что, вероятнее всего, связано с повышенным содержанием нитратов в указанных удобрениях.

Без моделирования стрессовых воздействий внесение кремнийорганических удобрений привело к улучшению биометрических показателей пшеницы, особенно сырой массы проростков. Новые удобрения на основе ПФ показали наиболее существенное увеличение данного показателя – 9–10 %, по отношению к исходному ПФ. В соответствующих вариантах наблюдалось увеличение и сухой массы проростков, но достоверной разницы между новыми удобрениями и исходными не отмечали. Значительные приросты сырой массы по сравнению с сухой можно объяснить тем, что в растительной клетке кремний образует гидрофильные силикатно-галактозные комплексы, связывающие свободную воду и тем самым повышающие водоудерживающую способность клетки и растения в целом [1, 3]. Исследованные биометрические показатели проростков пшеницы представлены в табл. 2, где приняты сокращения: оптим. влажн. (оптимальная влажность) – выращивание растений при оптимальной влажности почвы; недост. влажн. (недостаточная влажность) – выращивание растений при остром недостатке почвенной влаги; избыт. влажн. (избыточная влажность) – выращивание растений при избыточной почвенной влажности.

Имитирование острого недостатка влаги визуально заметно отразилось на растениях пшеницы и во всех вариантах привело к

¹ Агрохимия / Б.А. Ягодин, П.М. Смирнов, А.В. Петербургский, Х.К. Асаров, В.А. Демин, В.Н. Решетникова: учебник для студентов вузов; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1989. 639 с.

Таблица 2

Биометрические показатели проростков яровой пшеницы

Table 2

Biometric indicators of spring wheat seedlings

Вариант	Средняя длина 1-го проростка, см			Средняя сырая масса 1-го проростка, $\times 10^{-3}$ г			Средняя сухая масса 1-го проростка, $\times 10^{-3}$ г		
	оптим. влажн.	недост. влажн.	избыт. влажн.	оптим. влажн.	недост. влажн.	избыт. влажн.	оптим. влажн.	недост. влажн.	избыт. влажн.
Без удобрений	21,7	19,7	22,0	106,7	97,6	118,1	12,1	10,3	13,5
КМН исходный	23,7	22,1	23,6	139,0	124,8	160,0	14,2	12,7	16,1
КМН + 3 % SiO ₂	23,6	21,8	25,4	142,9	137,6	176,7	14,5	13,6	16,8
КМН + 5 % SiO ₂	23,0	21,0	24,8	141,4	124,1	164,8	14,3	12,6	16,5
ПФ исходный	22,1	20,3	22,1	120,5	106,7	131,1	13,7	11,8	14,5
ПФ + 3 % SiO ₂	22,3	20,5	23,8	131,4	114,3	144,6	13,9	12,5	16,1
ПФ + 5 % SiO ₂	22,5	20,6	23,3	132,9	115,7	140,8	14,1	12,7	15,4
Метасиликат натрия экв. 3 % SiO ₂ *	21,9	20,7	22,0	116,2	112,9	133,3	13,1	12,0	14,7
Метасиликат натрия экв. 5 % SiO ₂ **	22,0	20,6	22,7	117,1	111,4	131,4	13,5	12,0	14,0
P, %	2,37	2,14	2,33	2,84	2,56	2,82	3,02	2,87	3,25
НСР ₀₅	1,23	1,11	1,30	8,76	7,24	9,57	0,68	0,57	0,75

Примечание. Представлены среднеарифметические значения показателей, $n = 126$;

* – доза метасиликата натрия, эквивалентная его внесению с новыми удобрениями, содержащими 3 % SiO₂;

** – доза метасиликата натрия, эквивалентная его внесению с новыми удобрениями, содержащими 5 % SiO₂.

снижению ее биометрических показателей в сравнении с соответствующими вариантами выращивания культуры при оптимальной влажности почвы. В условиях засухи действие новых кремнийорганических удобрений было более выраженным, разницу в значениях отмечали как по сырой, так и по сухой массе проростков (см. табл. 2). Прирост сырой массы в варианте с содержанием 3 % SiO₂ в КМН составил 10,3 % по сравнению с вариантом КМН, применение удобрения с 3 % SiO₂ на основе ПФ способствовало увеличению на 7,1 %, с 5 % SiO₂ – на 8,4 % по сравнению с вариантом ПФ. Прирост сухой массы проростков составил соответственно: 7,1, 6,0 и 7,6 %. Увеличение сухой массы проростков свидетельствовало о накоплении органических соединений и минеральных элементов растениями, в том числе и кремния, а также наращивании волокнистой части (остова) растений. Незначительные изменения длины проростков на фоне достоверного увеличения их массы свидетельствуют о развитии более мощных, соответственно,

стрессоустойчивых растений, сформированных под влиянием кремнийорганических удобрений.

В проведенном лабораторном эксперименте создание условий избыточной влажности не сопровождалось понижением температуры, вследствие чего биометрические показатели яровой пшеницы в данных вариантах несколько превышали определяемые значения проростков, выращенных без моделирования водных стрессов. Внесение кремнийорганических удобрений способствовало увеличению длины проростков пшеницы относительно соответствующих вариантов применения исходных удобрений. При этом наибольшее увеличение данного биометрического показателя наблюдали в вариантах с внесением удобрений, содержащих 3 % SiO₂: на основе КМН – 7,6 %, на основе ПФ – 6,7 % (см. табл. 2).

Если принять массу проростков, выращенных с применением исходных КМН и ПФ, за 100 %, то диаграмма на рис. 2, а наглядно демонстрирует, что при ошибке опыта 2,82 %

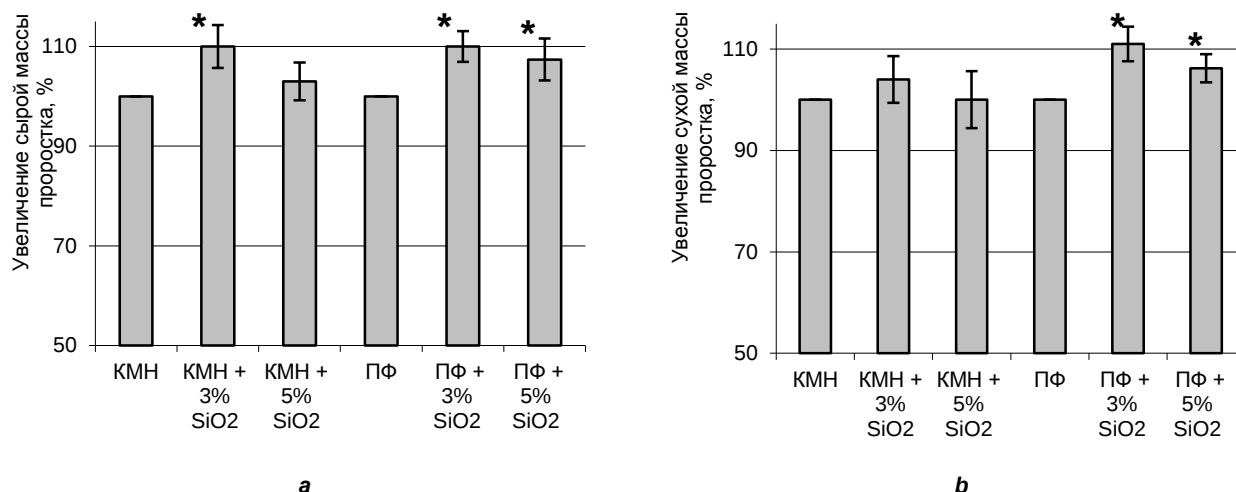


Рис. 2. Влияние кремнийорганических удобрений на массу проростков пшеницы при моделировании избыточного увлажнения почвы:
 а – сырая масса проростков; б – сухая масса проростков
 (* – достоверное увеличение массы проростков относительно исходных КМН и ПФ)

Fig. 2. Effect of organosilicon fertilizers on the mass of wheat seedlings when modeling excess soil moisture: a – wet weight of seedlings; b – dry weight of seedlings
 (* – significant increase in the mass of seedlings relative to the initial KMN and PF)

наибольшее увеличение сырой массы проростков наблюдалось при использовании кремнийорганических удобрений с меньшей дозой метасиликата натрия. Достоверное увеличение сухой массы ($P = 3,25\%$) отмечали в вариантах с применением кремнийорганических удобрений только на основе ПФ (рис. 2, б).

Биометрические показатели яровой пшеницы в вариантах с внесением новых удобрений превосходят соответствующие показатели контрольного варианта без удобрений, причем наибольшая разница отмечена по массе проростков, свидетельствуя о более крепких растениях. Так, при использовании удобрения на основе КМН с содержанием 3 % SiO₂ при оптимальной и стрессовой влажности почвы средняя сырая масса проростков увеличивалась на 33–49 %, сухая масса – на 19–32 %; при внесении нового удобрения на основе ПФ – на 17–23 и 14–21 % соответственно (см. табл. 2).

Анализ биометрических показателей яровой пшеницы в вариантах с применением препарата сравнения метасиликата натрия показал, что как в случаях моделирования острого недостатка влаги и избыточного увлажнения почвы, так и в вариантах с выращиванием растений при оптимальной влажности значения исследуемых биометрических показателей пшеницы уступали вариантам с использованием новых кремнийорга-

нических удобрений (см. табл. 2). При этом по сравнению с вариантом без удобрения средний прирост сырой массы проростка пшеницы составил 9–15 %, сухой массы – 6–16 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены образцы кремнийорганических удобрений на основе компоста многоцелевого назначения и продукта ферментации с добавлением метасиликата натрия. Процесс получения новых удобрений сопровождался увеличением содержания кремния, нитратов и гуминовых кислот, призванных улучшать питание растений как в условиях оптимальной влажности почвы, так и при водных стрессах. Установлено, что применение кремнийорганических удобрений при выращивании яровой пшеницы сорта Иргина в трех водных режимах почвы (оптимальная влажность, острый недостаток влаги и избыточная увлажненность) способствовало увеличению биометрических показателей культуры. Наибольшая положительная реакция растений, выраженная в приросте сырой и сухой массы проростков (~10 % относительно исходных КМН и ПФ), отмечена в случае применения удобрений, содержащих 3 % SiO₂. Как видим, новые кремнийорганические удобрения способствуют формированию более крепких растений, способных легче переносить воздействие абиотических факторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов А.В., Куликова А.Х., Яшин Е.А. Роль и значение кремния и кремнийсодержащих веществ в агроэкосистемах // Вестник Мининского университета. 2015. N 2 (10). С. 23–32.

2. Sacala E. Role of silicon in plant resistance to water stress // Journal of Elementology. 2009. Vol. 14. Issue 3. P. 619–630. <https://doi.org/10.5601/jelem.2009.14.3.20>

3. Haynes R.J. Significance and role of Si in crop production // *Advances in Agronomy*. 2017. Vol. 146. P. 83–166. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.06.001>

4. Матыченков В.В., Кособрюхов А.А., Шабнова Н.И., Бочарникова Е.А. Кремниевые удобрения как фактор повышения засухоустойчивости // *Агрохимия*. 2007. N 5. С. 63–67.

5. Уромова И.П., Копосова Н.Н. Влияние кремнийсодержащей агроруды на продуктивность и качество злаковых культур // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. N 6-5. С. 908–911.

6. Дабахова Е.В., Забегалов Н.В. Изучение кремнийсодержащих препаратов // *Агрохимический вестник*. 2011. N 2. С. 26–28.

7. Toresano-Sánchez F., Díaz-Pérez M., Diáñez-Martínez F., Camacho-Ferre F. Effect of the application of monosilicic acid on the production and quality of triploid watermelon // *Journal of Plant Nutrition*. 2010. Vol. 33. Issue 10. P. 1411–1421. <https://doi.org/10.1080/01904167.2010.489980>

8. Merwad A.-R. Response of yield and nutrients uptake of pea plants to silicate under sandy soil conditions // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2018. Vol. 49. Issue 13. P. 1553–1562. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1474895>

9. Патент № 2227129, Российская Федерация. Способ приготовления органоминеральной удобрительной смеси / В.Л. Головин, В.Н. Дрыганов, А.В. Зверев; патентообладатель Дальневосточный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации; заявл. 06.12.2001; опубл. 20.04.2004.

10. Кирейчева Л.В., Яшин В.М. Эффективность применения органоминеральных удобрений на основе сапропеля // *Агрохимический вестник*. 2015. N 2. С. 37–40.

11. Патент № 2223250, Российская Федерация. Полное комплексное органо-минеральное удобрение (цеолитовое-3) / Г.В. Васильев; патентообладатель Васильев Геннадий Васильевич; заявл. 02.04.2002; опубл. 10.04.2004.

12. Осипова Л.В., Курносова Т.Л., Быковская И.А. Повышение адаптивного потенциала ячменя ярового (*Hordeum Vulgare* L.) при дей-

ствии абиотического стресса // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2016. N 3. С. 48–51.

13. Сластя И.В. Использование соединений кремния для повышения продуктивности сортов ярового ячменя в условиях водного стресса // *Сельскохозяйственная биология*. 2013. T. 48. N 2. С. 109–119.

14. Maghsoudi K., Emam Y., Pessarakli M. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions // *Journal of Plant Nutrition*. 2016. Vol. 39. Issue 7. P. 1001–1015. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1109108>

15. Самсонова Н.Е., Козлов Ю.В., Зайцева З.Ф., Шупинская И.А. Эффективность соединений кремния при обработке семян и растений кукурузы (*Zea mays* L.) // *Агрохимия*. 2017. N 1. С. 12–18.

16. Смывалов В.С., Захарова Д.А., Яшин А.Е. Влияние кремнийсодержащих материалов и минерального удобрения на биологическую активность чернозема выщелочного // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017. N 3 (39). С. 19–25. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2017-3-19-25>

17. Колмыкова Т.С., Лукаткин А.С., Духовскис П., Куликова Н.Н. Эффект препарата Силк в условиях комплексного воздействия температурного и водного стрессов на растения томата // *Сельскохозяйственная биология*. 2012. T. 47. N 1. С. 86–92.

18. 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. N 10. С. 66–74.

19. Бурмистрова Т.И., Алексеева Т.П., Трунова Н.М., Терещенко Н.Н. Оценка влияния гуминового препарата на урожайность и качество яровой пшеницы // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2016. N 10 (144). С. 20–24.

20. Чистяков А.В. Гуматы нового поколения // *Защита и карантин растений*. 2012. N 3. С. 5–6.

REFERENCES

1. Kozlov AV, Kulikova AH, Yashin EA. Role and value of silicon and siliceous substances in agroecosystems. *Vestnik Mininskogo universiteta* = *Vestnik of Minin University*. 2015;2:23–32. (In Russian)

2. Sacala E. Role of silicon in plant resistance to water stress. *Journal of Elementology*. 2009;14(3):619–630. <https://doi.org/10.5601/jelem.2009.14.3.20>

3. Haynes RJ. Significance and role of Si in crop production. *Advances in Agronomy*. 2017;146:83–166. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.06.001>

4. Matychenkov VV, Kosobryukhov AA, Shabnova NI, Bocharnikova EA. Silicon fertilizers as a factor in increasing drought resistance. *Agrokhimiya*. 2007;5:63–67. (In Russian)

5. Uromova IP, Kuposova NN. Influence of si-

liceous agricultural ore on efficiency and quality of cereal cultures. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2016; 6-5:908–911. (In Russian)

6. Dabakhova EV, Zabegalov NV. Study of silicon containing preparations. *Agrokhimicheskiy vestnik* = Agrochemical Herald. 2011;2:26–28. (In Russian)

7. Toresano-Sánchez F, Díaz-Pérez M, Diánez-Martínez F, Camacho-Ferre F. Effect of the application of monosilicic acid on the production and quality of triploid watermelon. *Journal of Plant Nutrition*. 2010;33(10):1411–1421. <https://doi.org/10.1080/01904167.2010.489980>

8. Merwad A-R. Response of yield and nutrients uptake of pea plants to silicate under sandy soil conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2018;49(13):1553–1562. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1474895>

9. Golovin VL, Dryganov VN, Zverev AV. *Method for preparing organomineral fertilizing mixture*. Patent RF, no. 2227129; 2001. (In Russian)

10. Kireychева LV, Yashin VM. Efficiency of organic-mineral fertilizers based on sapropel. *Agrokhimicheskiy vestnik* = Agrochemical Herald. 2015;2:37–40. (In Russian)

11. Vasil'ev GV. *Complete complex organomineral fertilizer (zeolite-3)*. Patent RF, no. 2223250; 2002. (In Russian)

12. Osipova LV, Kurnosova TL, Bykovskaya IA. Protective effect of selenium and silicon in barley plants (*Hordeum Vulgare* L.) in stressful conditions. *Problemy agrokhimii i ekologii*. 2016;3:48–51. (In Russian)

13. Slasya IV. Use of silicon compounds as a factor of raising spring barley cultivars productivity under water stress. *Sel'skokhozyaystvennaya Biologiya* = Agricultural Biology. 2013;48(2):109–119. (In Russian)

14. Maghsoudi K, Emam Y, Pessarakli M. Ef-

fect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*. 2016;39(7):1001–1015. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1109108>

15. Samsonova NE, Kozlov YuV, Zaitseva ZF, Shupinskaya IA. The efficiency of silicon compounds in treatment of Maize (*Zea mais* L.) seeds and plants. *Agrokhiimiya*. 2017;1:12–18. (In Russian)

16. Smyvalov VS, Zakharova DA, Yashin AE. Influence of silicon-containing materials and mineral fertilizers on biological activity of leached black soil. *Vestnik Ulyanovskoi gosudarstvennoi sel'skohozyaystvennoi akademii* = Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2017;3:19–25. (In Russian) <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2017-3-19-25>

17. Kolmykova TS, Lukatkin AS, Dukhovskis P, Kulikova NN. Effect of Silk preparation in the condition of complex action of temperature and water stress on tomato plants. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2012; 47(1):86–92. (In Russian)

18. Samsonova NE, Kapustina MV, Zaitseva ZF. Effect of silicon compounds and mineral fertilizers on the productivity of spring grain crops and their contents of antioxidant enzymes. *Agrokhiimiya*. 2013;10:66–74. (In Russian)

19. Burmistrova TI, Alekseyeva TP, Trunova NM, Tereshchenko NN. The evaluation of peat humic product effect on yield and quality of spring wheat. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2016;10:20–24. (In Russian)

20. Chistyakov AV. Humates of the next generation. *Zashchita i karantin rastenii*. 2012;3:5–6. (In Russian)

Критерии авторства

Рабинович Г.Ю., Смирнова Ю.Д., Фомичева Н.В. выполнили экспериментальную работу. Авторы совместно обобщили результаты, написали рукопись, имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Contribution

Galina Yu. Rabinovich, Yulia D. Smirnova, Natalia V. Fomicheva carried out the experimental work. The authors on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. All authors have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рабинович Галина Юрьевна,
д.б.н., профессор, директор
ВНИИМЗ – филиал ФИЦ «Почвенный
институт им. В.В. Докучаева»,
170530, Тверская обл., Калининский р-н,
п. Эммаус, 27,
Российская Федерация,
e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

Смирнова Юлия Дмитриевна,
к.б.н., старший научный сотрудник
ВНИИМЗ – филиал ФИЦ «Почвенный
институт им. В.В. Докучаева»,
170530, Тверская обл., Калининский р-н,
п. Эммаус, 27,
Российская Федерация,
e-mail: ulayad@yandex.ru

Фомичева Наталья Викторовна,
к.б.н., старший научный сотрудник,
ВНИИМЗ – филиал ФИЦ «Почвенный
институт им. В.В. Докучаева»,
170530, Тверская обл., Калининский р-н,
п. Эммаус, 27,
Российская Федерация,
e-mail: nvfomi@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galina Yu. Rabinovich,
Dr. Sci. (Biology), Professor,
Director of VNIIMZ – branch of FRC
V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
27, Emmauss Village, Kalininsky District,
170530, Tver Region,
Russian Federation,
e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

Yulia D. Smirnova,
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,
VNIIMZ – branch of FRC V.V. Dokuchaev Soil
Science Institute,
27, Emmauss Village, Kalininsky District,
170530, Tver Region,
Russian Federation,
e-mail: ulayad@yandex.ru

Natalia V. Fomicheva,
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,
VNIIMZ – branch of FRC V.V. Dokuchaev Soil
Science Institute,
27, Emmauss Village, Kalininsky District,
170530, Tver Region,
Russian Federation,
e-mail: nvfomi@mail.ru