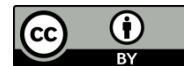


Оригинальная статья / Original article

УДК 631.811

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-421-429>



Получение наноразмерного кремнегуминового препарата и его первичная апробация

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

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

Резюме: В последние десятилетия отмечается развитие и внедрение нанотехнологий, в том числе и в различных областях сельского хозяйства. Идет активный поиск способов получения препаратов для растениеводства с наночастицами, которые быстрее включаются в метаболические процессы растений. Целью данной работы являлось получение наноразмерного кремнегуминового препарата и его апробация на растениях картофеля. В качестве источника гуминовых веществ был использован жидкий гуминовый препарат БоГум (разработка Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель), источника кремния – метасиликат натрия. Для достижения наноразмерности образцов применяли метод ультразвукового диспергирования. Получение осуществляли путем введения источника кремния в количестве 0,1% (по SiO_2) в БоГум, после чего применяли ультразвуковое воздействие в течение 5, 10, 15 и 20 мин. Анализ полученных образцов на анализаторе размера частиц 90 Plus/MAS показал, что с увеличением времени диспергирования эффективный диаметр частиц изменялся незначительно. В то же время отмечено перераспределение частиц: при воздействии на образцы в течение 20 мин увеличивалось количество частиц меньшего размера. После 5 мин обработки диапазон распределения частиц составил 115 ± 13 – 830 ± 23 нм, после 20 мин воздействия диаметр частиц приходился на две области – 81 ± 8 – 120 ± 10 и 280 ± 4 – 470 ± 18 нм. Применение ультразвука способствовало сохранению стабильного агрегатного состояния полученного препарата, большей микробиологической активности и большего содержания гуминовых кислот по сравнению с кремнегуминовым препаратом, полученным без применения ультразвука. Апробацию нового наноразмерного кремнегуминового препарата проводили на растениях картофеля. Обработка клубней перед посадкой с последующим некорневым опрыскиванием вегетирующих растений способствовала повышению урожайности картофеля на 18,7%. Отмечали изменения в содержании монокремниевых и поликремниевых кислот в почве, а также накопление кремния в ботве картофеля при применении кремнегуминовых препаратов в среднем на 0,96% абс.

Ключевые слова: гуминовые кислоты, кремний, картофель, ультразвук, наноразмерность частиц, урожайность

Для цитирования: Смирнова Ю.Д., Рабинович Г.Ю., Фомичева Н.В. Получение наноразмерного кремнегуминового препарата и его первичная апробация. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. N 3. С. 421–429. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-421-429>

Obtaining a nanosized silica-humic preparation and its initial approbation

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

FRC V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russian Federation

Abstract: The recent decades have witnessed a significant development and implementation of nanotechnology, including in various branches of agriculture. There is an active search for ways to obtain preparations for plant growing with nanoparticles that can be more rapidly involved in the metabolic processes of plants. This article aims to obtain a nanosized silica-humic preparation and its approbation on potato plants. As a source of humic substances, a liquid humic preparation BoGum (developed by the All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands) was used, as a source of silicon – sodium metasilicate. Ultrasonic dispersion method was used for achieving the nanoscale of the samples. A silicon source was introduced in an amount of 0.1% (of SiO_2) into BoGum, followed by the application of ultrasonic action for 5, 10, 15 and 20 minutes. The analysis of the obtained samples using a 90 Plus/MAS particle size analyzer has shown that with increasing dispersion time, the effective particle diameter changed insignificantly. At the same time, a redistribution of particles was noted: when the samples were exposed for 20 minutes, the number of smaller particles increased. After 5 minutes of treatment, the range of particle distribution was 115 ± 13 – 830 ± 23 nm, after 20 minutes of exposure, the particle diameter fell into two regions: 81 ± 8 – 120 ± 10 and 280 ± 4 – 470 ± 18 nm.

Ultrasonic action contributed to the retention of the stable state of aggregation of the obtained preparation, larger microbiological activity and larger content of humic acid in comparison with the silica-humic preparation, obtained without the application of an ultrasound. The new nanosized silica-humic preparation has been tested on potato plants. Treatment of tubers before planting, followed by foliar spraying of vegetative plants, has contributed to an increase in potato yield by 18.7%. Changes were noted in the content of mono- and polysilicic acids in the soil, as well as the accumulation of silicon in the tops of potatoes when using silica-humic preparations by 0.96% of absolute dry mass on average.

Keywords: humic acids, silicon, potatoes, ultrasound, nanosize of particles, yield

For citation: Smirnova YuD, Rabinovich GYu, Fomicheva NV. Obtaining a nanosized silica-humic preparation and its initial approbation. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(3):421–429. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-421-429>

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение нанотехнологий наблюдается во всех сферах, не исключение и агропромышленный комплекс [1]. Одно из направлений наноиндустрии в сельском хозяйстве – это разработка препаратов для растениеводства, содержащих наночастицы различных металлов, гуминовых веществ, кремния и др. [2–5]. Наноразмерность частиц достигается применением химических, биологических и физических методов [6].

Одним из эффективных методов получения ультрадисперсных наноразмерных частиц является ультразвук различной мощности. Например, ультразвуковое диспергирование верхового торфа в течение 30 мин на генераторе УЗГК-5-22-МС с выходной мощностью 5 кВт и магнито-стрикционным преобразователем ПМС-5-18 позволило получить монодисперсный препарат с наночастицами размером от 80 до 100 нм [7]. В других исследованиях показано, что ультразвуковая кавитационная обработка торфа в водной среде при высоком статическом давлении за счет тщательного выбора параметров позволяет добиться измельчения торфяных частиц до величин порядка 40–60 нм. Дальнейшее введение 3%-го торфогеля в почву эффективно повышало количество проросших семян и биометрические показатели проростков сельскохозяйственных культур (озимая пшеница, ячмень, овес, кукуруза) по сравнению с контролем [8]. Разрушенный до наноразмеров торф проявляет антиоксидантные свойства, что тормозит развитие окислительного стресса у культурных растений и в свою очередь оказывает благоприятное воздействие на их рост [9]. Применение ультразвука направлено на получение препаратов с высоким уровнем гуминовых и фульвокислот, повышенной физиологической активностью, которые эффективнее усваиваются мембранами клеточной структуры растений [10].

Также оказались перспективными и хорошо зарекомендовали себя в растениеводстве кремнийсодержащие нанопрепараты [11], получение которых осуществляется химическим синтезом и физическими методами, в частности, при воздействии ультразвуком [12–14]. Например, при

использовании ультразвукового диспергатора УЗДН (f – 35 кГц; N – 300 Вт; t – 30 мин)) получены наночастицы SiO_2 . Применение наночастиц, содержащих 0,03–0,21 г/кг кремния (Si), для обработки клубней картофеля способствовало достоверному увеличению содержания хлорофилла a в ростках – на 9,0–48,8%, каротиноидов – на 29,7% и обеспечивало накопление кремния в стеблях и листьях на 7,7–30,1 и 5,0–39,1% соответственно [15]. Установлено, что кремнийсодержащие нанопрепараты способны иммобилизовать питательные вещества в почве, быть носителями молекул и биологически активных веществ в растениях, усиливать метаболическую активность растений [11, 16, 17]. Использование раствора нанокремния для долговременного замачивания семян ряда сельскохозяйственных культур способствовало увеличению биометрических показателей их проростков [18]. Обработка семян перед посевом кремнийсодержащим препаратом с частицами размером до 100 нм позволила повысить урожайность зерна на 18% [19].

Наноразмерные препараты, применяемые в растениеводстве чаще всего в качестве основного действующего вещества, имеют один компонент. Разработка способов получения образцов комплексного состава с синергетическим эффектом представляет перспективное направление. Новые препараты способны быстрее включаться в биохимические процессы растений, что выражается в сокращении сроков прорастания семян, развитии более мощной корневой системы, эффективном метаболизме поступающих питательных элементов, тем самым увеличивая продукционные возможности сельскохозяйственных культур.

Целью данной работы являлось получение наноразмерного кремнегуминового препарата и его апробация на растениях картофеля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве источника гуминовых веществ использовали жидкий гуминовый препарат БоГум, разработанный во Всероссийском научно-исследовательском институте мелиорированных земель (ВНИИМЗ). Получение препарата осу-

ществляется путем щелочной экстракции на ферментационно-экстракционной линии, где исходным сырьем является торфяно-торфовая смесь [20]. Источник кремния – водорастворимая соль кремния (метасиликат натрия ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)) с содержанием 28% оксида кремния (SiO_2). Для достижения наноразмерности частиц применяли метод ультразвукового (УЗ) диспергирования, используя ультразвуковой гомогенизатор Sonopulse HD 3200 (Bandelin electronic, Германия) с системой управления Amplichran®. Гомогенизатор оборудован высокочастотным генератором GM 3200, ультразвуковым преобразователем UW 3200, бустером SH 213 G с титановым зондом ТТ диаметром 13 мм. В данной комплектации гомогенизатор позволяет проводить ультразвуковую обработку растворов, дисперсий и т.д. объемом от 20 до 900 мл с максимально разрешенной амплитудой 100% (амплитуда – 165 мкм). ВЧ-мощность – 200 Вт, рабочая частота – 20 кГц.

Получение наноразмерного кремнегуминового препарата осуществляли путем введения сухого метасиликата натрия в количестве 0,1% (по SiO_2) в гуминовый препарат БоГум непосредственно перед УЗ воздействием. Ультразвуковое воздействие осуществляли в течение 5, 10, 15 и 20 мин (соответственно кремнегуминовый образец 1, 2, 3 и 4). Температура смеси поддерживалась не выше 60 °С с помощью проточного охладителя. Проводили две серии обработок. Во всех полученных образцах определяли размер частиц методом фотон-корреляционной спектроскопии квазиупругого светорассеяния на анализаторе размера частиц 90 Plus/MAS с лавинным детектором (Brookhaven Instruments, США).

По размеру частиц исследуемых кремнегуминовых образцов был выбран препарат с наименьшими значениями диаметра частиц, обозначенный НаноБоГум-С, который анализировали на ряд агрохимических и микробиологических показателей в трехкратной аналитической повторности:

- pH_{KCl} – по ГОСТ 27979-88;
- содержание гуминовых кислот, Гк – по ГОСТ 9517-94;
- численность аммонифицирующих, амилотических микроорганизмов, энтеробактерий – методом предельных разведений на твердых питательных средах: мясо-пептонный агар, крахмало-амиачный агар, среда Козера соответственно.

Также для сравнения проводились анализы БоГум и БоГум-С. БоГум-С – образец, полученный при введении сухого метасиликата натрия в БоГум с последующим перемешиванием до полного его растворения без применения УЗ диспергирования.

Статистическую обработку полученных данных проводили, используя элементы вариационной статистики: среднеарифметические значения и стандартные отклонения конкретных показателей (объем выборки $n = 3$).

Апробация выбранного кремнегуминового образца проводилась в мелкоделяночном опыте по выращиванию картофеля сорта Скарб. Характеристика почвы: дерново-подзолистая легкосуглинистая; $\text{pH}_{\text{KCl}} = 5,0\text{--}5,1$; содержание гумуса (по Тюрину) – 2,2–2,4%, подвижного фосфора (P_2O_5) – 208–240 мг/кг, подвижного калия (K_2O) (по Кирсанову) – 164–185 мг/кг. Опыт проводили по естественному фону (без внесения удобрений). В качестве препаратов сравнения в опыт включены варианты с использованием БоГум и БоГум-С, которые применяли для обработки клубней и вегетирующих растений картофеля. Обработка клубней осуществлялась за 2 ч до посадки из ручного опрыскивателя в следующих разбавлениях: БоГум и БоГум-С – 1 : 100; НаноБоГум-С – 1 : 50; 1 : 100; 1 : 200. Некорневая обработка вегетирующих растений проводилась по фазам всходов и бутонизации в единой норме расходов – 1 л/га (разведение 1 : 300). Повторность опыта четырехкратная, расположение делянок систематическое. Учет урожая проводили сплошным методом, результаты обрабатывали методом дисперсионного анализа с вычислением наименьшей существенной разницей (НСР) при 5%-м уровне значимости.

В фазу цветения картофеля анализировали почвенные и растительные образцы на содержание кремния¹ в четырехкратной аналитической повторности. Выделение монокремниевых кислот проводили из почвы естественной влажности водой, поликремниевых – из воздушно-сухой почвы 0,1 н соляной кислотой, затем окрашивали растворимые силикаты в молибденовую синь и колориметрировали на спектрофотометре SPEKOL при длине волны 740 нм согласно модифицированного метода Маллена и Райли [21]. Содержание кремния в ботве растений картофеля определяли спектрофотометрическим методом по Барсуковой: проводили мокрое озоление сухого растительного материала смесью концентрированных азотной и серной кислот с последующим выделением кремниевых кислот щелочным гидролизом, окрашиванием их в молибденовую синь и колориметрированием на спектрофотометре SPEKOL при длине волны 640 нм.

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

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Применение ультразвукового диспергирования способствовало снижению эффективного

¹Титова В.И., Дабахова Е.В., Дабахов М.В. Агро- и биохимические методы исследования состояния экосистем: учеб. пособие для вузов. Н. Новгород: Изд-во ВВАГС, 2011. 170 с.

диаметра частиц в исследуемых кремнегуминовых образцах по сравнению с гуминовым препаратом БоГум, о чем свидетельствовали данные, полученные на анализаторе размера частиц. На рис. 1 представлен график, отражающий затраты энергии на прохождение физико-химического взаимодействия. Эффективный диаметр частиц в препарате БоГум составлял 374 ± 16 нм, после 5 мин воздействия УЗ их диаметр резко снизился до 255 ± 8 нм. Однако дальнейшая обработка на размере эффективного диаметра образцов отразилась мало, при этом разница в размере эффективного диаметра частиц образцов, полученных после обработки в течение 15 и 20 мин, оказалась минимальной. Но в то же время отмечено перераспределение частиц: при воздействии на образцы в течение 20 мин увеличивалось количество частиц меньшего размера (рис. 2, представлены результаты одной из двух серий измерений).

Распределение частиц в исследуемых образцах в основном приходилось на два диапазона. В БоГум средний размер частиц равнялся 542 ± 14 нм, минимальный – 119 ± 7 нм (рис. 2, а). Применение УЗ диспергирования способствовало снижению размеров частиц, при этом преимущественно происходило разрушение более крупных частиц. Средний размер частиц в кремнегуминовом образце 1 (после 5-минутного воздействия УЗ) равнялся 311 ± 17 нм, но минимальный размер снизился незначительно и диапазон распределения

частиц составил 115 ± 13 – 830 ± 23 нм (рис. 2, б). Дальнейшее увеличение времени воздействия приводило к снижению минимального диаметра: после 10 мин – 109 ± 18 нм; 15 мин – 100 ± 9 нм; 20 мин – 81 ± 8 нм (рис. 2, с). Таким образом, обработка УЗ в течение 20 мин способствовала значительному снижению ширины распределения размера частиц в образце 4 кремнегуминового препарата, и диаметр частиц приходился на две области – 81 ± 8 – 120 ± 10 нм и 280 ± 4 – 470 ± 18 нм (рис. 2, с).

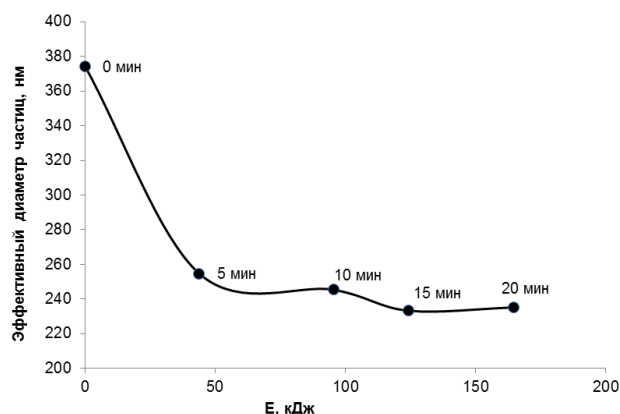


Рис. 1. Размер эффективного диаметра частиц в образцах кремнегуминового препарата

Fig. 1. Effective diameter of the particles in the samples of the silicon humic preparation

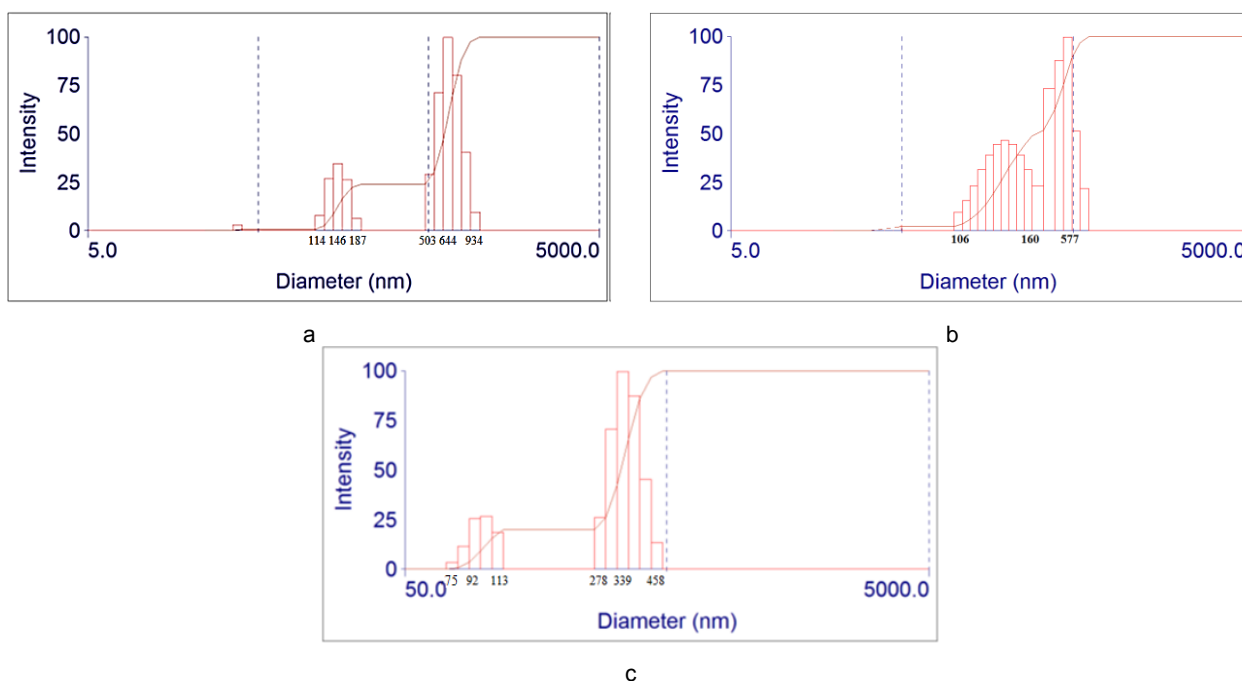


Рис. 2. Ширина распределения частиц по размерам (представлены результаты одного из определений):
 а – БоГум; б – кремнегуминовый образец 1 (время УЗ воздействия – 5 мин);
 с – кремнегуминовый образец 4 (время УЗ воздействия – 20 мин)

Fig. 2. Width of the particle size distribution (the results of one measurement are presented):
 а – BoHum; б – silicon humic sample 1 (ultrasonic exposure time 5 min);
 с – silicon humic sample 4 (ultrasonic exposure time 20 min)

Предполагается, что при обработке ультразвуком произошло расщепление гуминовых веществ на более короткие цепочки, в которые встроились ионы кремния с образованием устойчивых связей. Образование устойчивых кремнегуминовых соединений обсуждается в научных публикациях [22–25].

Образец 4, полученный при смешивании БоГум и метасиликата натрия в УЗ гомогенизаторе в течение 20 мин, обозначили НаноБоГум-С и совместно с БоГум и БоГум-С проанализировали на ряд показателей. Препараты в процессе хранения различались по внешнему виду: БоГум – темно-коричневая жидкость, практически прозрачная на протяжении всего периода наблюдения, в БоГум-С спустя 2 недели после его получения появились взвесь и хлопьевидный осадок, в НаноБоГум-С коагуляция частиц проявилась через 3 месяца после обработки ультразвуком. Уровень кислотности в образцах с метасиликатом натрия сместился в сторону щелочной реакции среды, что связано с распадом метасиликата натрия на оксид кремния и щелочь при растворении (табл. 1). Однако данное обстоятельство не окажет негативного влияния на почву и растения, поскольку препараты перед использованием разбавляются водой и значения pH рабочих растворов нейтральны.

Полагалось, что содержание гуминовых кислот во всех исследуемых препаратах должно быть одинаковым, поскольку не происходило химического или физического воздействия на источник гуминовых кислот (торф), а исследования проводились с готовым гуминовым препаратом. Однако анализ БоГум-С показал, что содержание Гк в нем было ниже, чем в БоГум. Повидимому, часть гуминовых кислот связалась с ионами кремния и выпала в хлопьевидный осадок, который отфильтровывался перед началом определения. Содержание гуминовых кислот в

НаноБоГум-С, наоборот, увеличилось, здесь отмечали обратный эффект: после воздействия УЗ образовались кремнегуминовые соединения малых размеров, которые не отфильтровались, а перешли в раствор при определении Гк, при этом увеличение содержания гуминовых кислот обеспечили связанные с ними ионы кремния. Поэтому, несмотря на то что по результатам анализа количество гуминовых кислот в НаноБоГум-С составило $8,24 \pm 0,11$ г/л, в наноразмерном кремнегуминовом препарате содержание Гк следует считать равным $7,85 \pm 0,13$ г/л, как в БоГум.

Количество всех микроорганизмов, как и предполагалось, уменьшилось в препарате БоГум-С вследствие увеличения уровня pH. Титр микроорганизмов в наноразмерном кремнегуминовом образце также понизился относительно БоГум, но в меньшей степени. Большее содержание микрофлоры в НаноБоГум-С по сравнению с БоГум-С связано, возможно, с тем, что при воздействии УЗ образовались доступные наноразмерные фрагменты гуминовых веществ, послужившие дополнительным источником для их питания.

Апробирование кремнегуминовых препаратов на посадках картофеля показало, что максимальная прибавка урожайности отмечена в варианте с обработкой семян (ОС) НаноБоГум-С в разбавлении 1 : 50 + некорневая обработка (НО) – урожайность товарных корнеплодов увеличилась на 17,6%, общая – на 18,7% относительно контроля (табл. 2).

Анализ почвы перед закладкой опыта на наличие кремния показал высокодефицитное содержание монокремниевых кислот и среднедефицитное – поликремниевых [21], составив 7,6 и 113,0 мг/кг соответственно, поэтому применение полученных кремнегуминовых препаратов было актуальным.

Таблица 1. Характеристика препаратов

Table 1. Characteristics of preparation

Препарат	pH	Гк, г/л	Аммониф. м-о, КОЕ/мл	Амилолит. м-о, КОЕ/мл	Энтеробакт., КОЕ/мл
БоГум	$7,9 \pm 0,1$	$7,85 \pm 0,13$	$1,27 \pm 0,17 \cdot 10^8$	$2,9 \pm 0,2 \cdot 10^{13}$	$1,7 \pm 0,1 \cdot 10^7$
БоГум-С	$10,1 \pm 0,1$	$7,30 \pm 0,11$	$0,13 \pm 0,01 \cdot 10^6$	$2,6 \pm 0,1 \cdot 10^{10}$	690 ± 23
НаноБоГум-С	$10,0 \pm 0,1$	$8,24 \pm 0,11$	$0,25 \pm 0,02 \cdot 10^6$	$1,5 \pm 0,1 \cdot 10^{11}$	$4,5 \pm 0,3 \cdot 10^3$

Примечание. Указаны среднеарифметические значения показателей со стандартным отклонением, $n = 3$.

Таблица 2. Урожайность картофеля сорта Скарб

Table 2. Potato yield of the Skarb variety

Вариант опыта	Урожайность, г/куста			
	товарная	± к контр, %	общая	± к контр, %
Без обработки	352	–	428	–
БоГум (ОС 1:100 + НО)	370	5,1	465	8,6
БоГум-С (ОС 1:100 + НО)	389	10,5	494	15,4
НаноБоГум-С (ОС 1:200 + НО)	368	4,5	459	7,2
НаноБоГум-С (ОС 1:100 + НО)	364	3,4	469	9,6
НаноБоГум-С (ОС 1:50 + НО)	414	17,6	508	18,7
НСР ₀₅	29	–	37	–

К фазе цветения в основном отмечали уменьшение в почве поликремниевых кислот и рост монокремниевых. Частичное растворение поликремниевых кислот с образованием монокремниевых обусловлено постоянно протекающими биохимическими и микробиологическими процессами, проходящими под воздействием применяемых препаратов.

Повышение монокремниевых кислот в почве отмечается также в исследованиях А.Х. Куликовой с соавторами [26]. Содержание кремния в дерново-подзолистой почве под посевом озимой пшеницы по отношению к контролю было в 1,6–2,3 раза выше при применении для предпосевной обработки семян и опрыскивания посевов различными препаратами кремния (Крезацин, Мивал-Агро, Силиплант, Энергия-М) [26]. Прирост в содержании монокремниевых кислот на 10–20% показано и при использовании кремнийсодержащего нанопрепарата с частицами размером до 100 нм для обработки семян и вегетирующих растений [19].

Не во всех вариантах наблюдалось накопление монокремниевых кислот по сравнению с его исходным содержанием. В почве контрольного

варианта опыта его количество снизилось в 1,8 раза, при этом здесь отмечалось наибольшее содержание поликремниевых кислот (табл. 3). Это можно связать с низкой биологической активностью почвы и, следовательно, с медленным переходом поликремниевых кислот в монокремниевые, поэтому на формирование урожая картофеля в контрольном варианте расходовались в основном монокремниевые кислоты.

Также низкое содержание монокремниевых кислот отмечали в варианте с обработкой семян раствором НаноБоГум-С в концентрации 1 : 50. Но здесь наблюдали и максимальное снижение поликремниевых кислот, что связано с высоким приростом урожайности данного варианта и, следовательно, с большим выносом соединений кремния из почвы. Данная взаимосвязь подтверждается отрицательным значением коэффициента корреляции – $r = -0,95$ ($p < 0,05$; число пар переменных – 6). Вместе с тем применение кремнегуминовых препаратов способствовало увеличению содержания SiO_2 в ботве картофеля в среднем на 0,96% абс. (табл.3).

Таблица 3. Содержание кремния в почве и ботве растений картофеля в фазу цветения

Table 3. Silicon content in the soil and potato plants tops in the flowering period

Вариант опыта	Содержание в почве, мг/кг		Содержание в ботве, %
	монокремниевые кислоты	поликремниевые кислоты	
Без обработки	4,2±0,2	66,7±0,7	1,87±0,06
БоГум (ОС 1:100 + НО)	9,7±0,4	63,6±1,2	1,83±0,04
БоГум-С (ОС 1:100 + НО)	11,8±0,3	54,8±0,8	2,79±0,06
НаноБоГум-С (ОС 1:200 + НО)	11,5±0,4	59,3±1,4	2,86±0,03
НаноБоГум-С (ОС 1:100 + НО)	10,0±0,4	63,0±1,0	2,75±0,05
НаноБоГум-С (ОС 1:50 + НО)	5,7±0,3	51,4±0,7	2,94±0,05

Примечание. Указаны среднееарифметические значения показателей со стандартным отклонением, $n = 4$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода ультразвукового диспергирования позволило получить кремнегуминовый препарат с наноразмерными частицами, минимальный размер которых составил 81 ± 8 нм. Полученный препарат характеризуется стабильным агрегатным состоянием, в его состав входят два действующих вещества – гуминовые кислоты (~7,85 г/л) и SiO_2 (0,1%), известных своим стимулирующим влиянием на произрастание сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жемчужин С.Г., Спиридонов Ю.Я., Клейменова И.Ю., Босак Г.С. Нанотехнологии и пестициды (дайджест публикаций за 2011–2017 гг.) // Агрохимия. 2019. N 5. С. 89–96.
2. Nanotechnology for Agriculture: Crop Production & Protection. Eds.: Panpatte D.G., Jhala Y.K. Singapore: Springer, 2019. 337 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9374-8>
3. Кадырова А.И., Колесникова В.Г. Применение микроудобрений в наноформе в технологии возделывания овса // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2016.

Обработка клубней картофеля перед посадкой наноразмерным кремнегуминовым препаратом в разбавлении 1 : 50 и последующая некорневая обработка вегетирующих растений в дозе 1 л/га способствовали прибавке урожайности картофеля на 18,7%. Выявлены изменения в перераспределении подвижных форм кремния в почве (переход поликремниевых кислот в монокремниевые), послужившие дополнительным источником питания для растений картофеля.

- N 4 (49). С. 3–12.
4. Yazdpour H., Noormohamadi G., Madani H., Heidari H., Abad Sh., Mobasser H.R., et al. Role of nano-silicon and other silicon resources on straw and grain protein, phosphorus and silicon contents in Iranian rice cultivar (*Oryza sativa* cv. Tarom) // International Journal of Biosciences. 2014. Vol. 5. Issue 12. P. 449–456. <https://doi.org/10.12692/ijb/5.12.449-456>
5. Панова Г.Г., Семенов К.Н., Шилова О.А., Корнюхин Д.Л., Шпанев А.М., Аникина Л.М. [и др.]. Влияние углеродных и кремнезольных наноматериалов на устойчивость ярового ячменя к заболе-

ванию корневыми гнилями // *Агрофизика*. 2018. N 3. С. 48–58. <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2018.03.09>

6. Lakzian A., Bayat M., Gadzhikurbanov A., Zargar M. The role of nanotechnology for improving crop production // *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2019. Vol. 14. Issue 4. P. 297–305. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2019-14-4-297-305>

7. Силкин С.В., Куликов Е.Е., Попов И.А. Исследование управляемого ультразвукового диспергирования торфа и бурого угля в воде // *Труды Московского физико-технического института*. 2018. Т. 10. N 3 (39). С. 86–95.

8. Алферова Е.Ю., Проценко Е.П., Косолапова Н.И. Определение влияния органического удобрения (диспергированного торфа) на биометрические показатели растений [Электронный ресурс] // *Auditorium*. 2016. N 4 (12). С. 14–19. URL: <https://auditorium.kursksu.ru/#index> (16.07.2020).

9. Косолапова Н.И., Проценко Е.П., Проценко А.А., Неведров Н.П., Алферова Е.Ю., Мирошников О.В. Некоторые протекторные свойства инновационного экологически безопасного агропрепарата «Cavita bioscomplex» // *Проблемы региональной экологии*. 2016. N 3. С. 24–30.

10. Денисюк Е.А., Митрофанов Р.А., Кузнецова И.А. Технологии получения гуминовых веществ // *Вестник НГИЭИ*. 2014. N 2 (33). С. 66–80.

11. Rastogi A., Tripathi D.K., Yadav S., Chauhan D.K., Živčák M., Ghorbanpour M., et al. Application of silicon nanoparticles in agriculture // *3 Biotech*. 2019. Vol. 9. Issue 3. Article number 90. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7>

12. Хлебцов Б.Н., Ханадеев В.А., Пылаев Т.Е., Хлебцов Н.Г. Метод динамического рассеяния света в исследованиях силикатных и золотых наночастиц // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика*. 2017. Т. 17. N 2. С. 71–84. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2017-17-2-71-84>

13. Мофа Н.Н., Жапекова А.О., Садыков Б.С., Баккара А.Е., Сахан М.Г., Бекентаева А.Д. [и др.]. Комплексное использование механохимической и ультразвуковой обработки для получения высокодисперсного диоксида кремния специального назначения // *Горение и плазмохимия*. 2019. N 17. С. 123–132.

14. Патент № 2508963, Российская Федерация. Способ диспергирования наноразмерного порошка диоксида кремния ультразвуком / Н.С. Хитерхеева, А.В. Номоев, С.П. Бардаханов, С.С. Уладаева; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Бурятский государственный университет»; заявл. 18.05.2012; опубл. 10.03.2014.

15. Аминова Е.В., Мушинский А.А., Короткова А.М., Дергилёва Т.Т. Воздействие ультрадисперсных частиц диоксида кремния на биохимические показатели растений *Solanum tuberosum* // *Животноводство и кормопроизводство*. 2019. Т. 102. N 4. С. 33–42. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-102-4-33>

16. Fraceto L.F., Grillo R., de Medeiros G.A., Scognamiglio V., Rea G., Bartolucci C.

Nanotechnology in agriculture: which innovation potential does it have? // *Frontiers in Environmental Science*. 2016. Vol. 4. Article number 20. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>

17. Martin-Ortigosa S., Peterson D.J., Valenstein J.S., Lin V.S.-Y., Trewyn B.G., Lyznik L.A., et al. Mesoporous silica nanoparticle-mediated intracellular cre protein delivery for maize genome editing via loxP site excision // *Plant Physiology*. 2014. Vol. 164. Issue 2. P. 537–547. <https://doi.org/10.1104/pp.113.233650>

18. Bao-shan L., Shao-qi D., Chun-hui L., Li-jun F., Shu-chun Q., Min Y. Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedlings // *Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 15. Issue 2. P. 138–140. <https://doi.org/10.1007/BF02856749>

19. Забегалов Н.В., Дабахова Е.В. Влияние кремнийсодержащего нанопрепарата на урожайность и содержание кремния в зерновых культурах // *Достижения науки и техники АПК*. 2011. N 12. С. 22–24.

20. Рабинович Г.Ю., Смирнова Ю.Д., Васильева Е.А., Фомичева Н.В. Инновационная технология для решения проблем агроэкологии // *Региональная экология*. 2015. N 6 (41). С. 32–40.

21. 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 // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2016. N 3. С. 37–46.

22. Офицеров Е.Н., Рябов Г.К., Убасыкина Ю.А., Климовский А.Б., Фетюхина Е.Г. Кремний и гуминовые кислоты: моделирование взаимодействий в почве // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011. Т. 13. N 4-2. С. 550–557.

23. Патент № 2529151, Российская Федерация. Кремнегуминовый регулятор роста растений и его применение / И.В. Перминова, Н.А. Куликова, О.Н. Филиппова; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»; заявл. 17.12.2012; опубл. 27.09.2014.

24. Камбалина М.Г., Скворцова Л.Н., Мазурова И.С., Гусева Н.В., Бакебаев А.А. Исследование форм нахождения кремния в природных водах с высоким содержанием растворенных органических веществ // *Известия Томского политехнического университета. Химия и химические технологии*. 2014. Т. 325. N 3. С. 64–70.

25. Zhang M., Li D., Ye Z., Wang S., Xu N., Wang F., et al. Effect of humic acid on the sedimentation and transport of nanoparticles silica in water-saturated porous media // *Journal of Soils and Sediments*. 2019. Vol. 20. Issue 2. P. 911–920. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02444-x>

26. Куликова А.Х., Козлов А.В., Смывалов В.С. Влияние кремнийсодержащих материалов на свойства почвы, состояние посевов и урожайность зерновых культур в условиях среднего Поволжья // *Агрохимия*. 2019; N 4. С. 60–69. <https://doi.org/10.1134/S0002188119040082>

REFERENCES

1. Zhemchuzhin SG, Spiridonov YuYa, Kleimeno-va IYu, Bosak GS. Nanotechnology and pesticides (digest publications for 2011–2017). *Agrokimiya*. 2019;5:89–96. (In Russian)
2. *Nanotechnology for Agriculture: Crop Production & Protection*. Panpatte DG, Jhala YK. (eds.) Singapore: Springer; 2019. 337 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9374-8>
3. Kadyrova AI, Kolesnikova VG. Appliance of micronutrients in nanoform in oats cultivation technology. *Vestnik Izhevskoi gosudarstvennoi sel'skokho-zyaistvennoi akademii = The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2016;4:3–12. (In Russian)
4. Yazdpour H, Noormohamadi G, Madani H, Heidari H, Abad Sh, Mobasser HR, et al. Role of nano-silicon and other silicon resources on straw and grain protein, phosphorus and silicon contents in Iranian rice cultivar (*Oryza sativa* cv. Tarom). *International Journal of Biosciences*. 2014;5(12):449–456. <https://doi.org/10.12692/ijb/5.12.449-456>
5. Panova GG, Semenov KN, Shilova OA, Kornuhin DL, Shpanev AM, Anikina LM, et al. Impact of carbon and silica sol nanostructures on spring barley resistance to the root rot infestation. *Agrofizika = Agrophysica*. 2018;3:48–58. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.25695/AGRP.2018.03.09>
6. Lakzian A, Bayat M, Gadzhikurbanov A, Zargar M. The role of nanotechnology for improving crop production. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2019;14(4):297–305. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2019-14-4-297-305>
7. Silkin SV, Kulikov EE, Popov IA. Investigation of the controlled ultrasonic dispersion of peat and brown coal in water. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta = Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*. 2018;10(3):86–95. (In Russian)
8. Alferova EYu, Protsenko EP, Kosolapova NI. Determination of the effect of organic fertilizer (dispersed peat) on the biometric parameters of plants. *Auditorium*. 2016;4:14–19. Available from: <https://auditorium.kursku.ru/#index> [Accessed 16th July 2020]. (In Russian)
9. Kosolapova NI, Protsenko EP, Protsenko AA, Nevedrov NP, Alferova EYu, Miroshnichenko OV. Some protective features of innovative ecology-safe agricultural preparation "Cavita biocomplex". *Problemy regional'noi ekologii = Regional Environmental Issues*. 2016;3:24–30. (In Russian)
10. Denisyk EA, Mitrofanov RA, Kuznetsova IA. Technology of obtaining of humic substances. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGIEI*. 2014;2:66–80. (In Russian)
11. Rastogi A, Tripathi DK, Yadav S, Chauhan DK, Živčák M, Ghorbanpour M, et al. Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech*. 2019;9(3). Article number 90. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7>
12. Khlebtsov BN, Khanadeev VA, Pylaev TE, Khlebtsov NG. Dynamic light scattering method in studies of silica and gold nanoparticles. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Fizika = Izvestiya of Saratov University. Physics*. 2017;17(2):71–84. (In Russian) <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2017-17-2-71-84>
13. Mofa NN, Zhapekova AO, Sadykov BS, Bak-kara AYe, Sakhan MG, Bekentaeva AD, et al. Complex use of mechanochemical and ultrasonic processing to obtain highly dispersed silicon dioxide for special purposes. *Gorenje i plazmokhimiya*. 2019;17:123–132. (In Russian)
14. Khiterkheeva NS, Nomoiev AV, Bardakhanov SP, Uladaeva SS. *Method of dispersion of nanosized silicon dioxide powder by ultrasound*. Patent RF, no. 2508963; 2012. (In Russian)
15. Aminova EV, Mushinsky AA, Korotkova AM, Dergileva TT. Exposure of ultrafine silica particles on biochemical indicators of plants *Solanum tuberosum*. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo = Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(4):33–42. (In Russian) <https://doi.org/10.33284/2658-3135-102-4-33>
16. Fraceto LF, Grillo R, de Medeiros GA, Scog-namiglio V, Rea G, Bartolucci C. Nanotechnology in agriculture: which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental Science*. 2016;4. Article number 20. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>
17. Martin-Ortigosa S, Peterson DJ, Valenstein JS, Lin VS-Y, Trewyn BG, Lyznik LA, et al. Mesoporous silica nanoparticle-mediated intracellular cre protein delivery for maize genome editing via loxP site excision. *Plant Physiology*. 2014;164(2):537–547. <https://doi.org/10.1104/pp.113.233650>
18. Bao-shan L, Shao-qi D, Chun-hui L, Li-jun F, Shu-chun Q, Min Y. Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedlings. *Journal of Forest Research*. 2004;15(2):138–140. <https://doi.org/10.1007/BF02856749>
19. Zabegalov NV, Dabakhova EV. Studying of influence of a siliceous nanocomposite preparation on productivity and silicon content in crops. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2011;12:22–24. (In Russian)
20. Rabinovich GYu, Smirnova YuD, Vasilieva EA, Fomicheva NV. An innovative technology to solve the problems of agroecology. *Regional'naya ekologiya = Regional ecology*. 2015;6:32–40. (In Russian)
21. Matychenkov IV, Khomiakov DM, Pakhnenko EP, Bocharnikova EA, Matychenkov VV. The mobile Si-rich compounds in the soil-plant system and methods for their determination. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie = Bulletin of the Moscow University. Series 17. Soil Science*. 2016;3:37–46. (In Russian)
22. Ofitserov EN, Rjabov GK, Ubaskina JA, Klimovsky AB, Fetjulina EG. Silicon and humic acids: modelling of interactions in soil. *Izvestiya Samarskogo NTs RAN = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(4):550–557. (In Russian)
23. Perminova IV, Kulikova NA, Filippova ON. *Silicon humic plant growth regulator and its application*. Patent RF, no. 2529151; 2012. (In Russian)
24. Kambalina MG, Skvortsova LN, Mazurova IS, Guseva NV, Bakibaev AA. Research of the sili-

con aqueous forms in organic-rich natural water. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Khimiya i khimicheskie tekhnologii = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2014;325(3):64–70. (In Russian)

25. Zhang M, Li D, Ye Z, Wang S, Xu N, Wang F, et al. Effect of humic acid on the sedimentation and transport of nanoparticles silica in water-saturated porous media. *Journal of Soils and Sediments*.

2019;20(2):911–920. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02444-x>

26. Kulikova AKh, Kozlov AV, Smyvalov VS. Influence of silicon-containing materials on soil properties, crop condition and yield of grain crops in the conditions of middle Volga region. *Agrokhimiya*. 2019;4:60–69. (In Russian) <https://doi.org/10.1134/S0002188119040082>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Смирнова Юлия Дмитриевна,

к.б.н., заместитель директора по науке,
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

Рабинович Галина Юрьевна,

д.б.н., профессор, заведующая отделом
биотехнологий,
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

Фомичева Наталья Викторовна,

к.б.н., заведующая лабораторией
микробиологии и экологической
биотехнологии,
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

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили оконча-
тельный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 24.02.2021.
Одобрена после рецензирования 30.05.2021.
Принята к публикации 30.08.2021.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yulia D. Smirnova,

Cand. Sci. (Biology), Deputy Director for Science,
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

Galina Yu. Rabinovich,

Dr. Sci. (Biology), Professor,
Head of the Department of Biotechnology,
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

Natalia V. Fomicheva,

Cand. Sci. (Biology), Head of the Laboratory
of Microbiology and Environmental
Biotechnology,
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

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests re-
garding the publication of this article.

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

*The article was submitted 24.02.2021.
Approved after reviewing 30.05.2021.
Accepted for publication 30.08.2021.*