

Эффективность предпосевной обработки семян *Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis*, *Triticum aestivum* L., *Raphanus sativus* L., *Allium cepa* L. оксидом кремния

Т. Г. Леконцева^{1✉}, А. В. Федоров¹

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук, Ижевск, Россия

✉ E-mail: t.lekontseva@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования – тестирование влияния водного раствора оксида кремния на посевные качества семян растений. **Методы.** Оценку влияния оксида кремния (SiO_2) на посевные качества семян проводили лабораторным методом согласно МУ 1.2.2635-10 «Медико-биологическая оценка безопасности наноматериалов» и ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». В качестве индикаторов использовали семена фасоли спаржевой *Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis* сорта Матильда, пшеницы яровой *Triticum aestivum* L. сорта Свеча, редиса посевного *Raphanus sativus* L. сорта Чемпион и лука репчатого *Allium cepa* L. сорта Одинцовец. Учитывали следующие показатели: энергия прорастания и всхожесть семян, количество, длина и масса подземных и надземных частей проростков. Статистическая обработка данных проведена дисперсионным методом по Б. А. Доспехову. **Научная новизна.** Выявлена видоспецифическая реакция семян на обработку оксидом кремния. Лучшие результаты по морфометрическим параметрам проростков фасоли спаржевой и пшеницы яровой получены при обработке семян 0,0025 % оксидом кремния, редиса – 0,005 %. Семена лука подвергать обработке оксидом кремния нецелесообразно. По результатам исследований наиболее отзывчивыми на обработку оказались семена фасоли спаржевой. Энергия прорастания и всхожесть семян в варианте обработки 0,0025 % оксидом кремния по сравнению с контролем (дистиллированная вода) были больше на 13,7 % и 3,0 % соответственно, однако разница недостоверна. Исследованные концентрации способствовали существенному увеличению средней длины корней. При концентрации 0,01 % данный показатель был больше на 30,6 мм, 0,005 % – на 30,7 мм, при 0,0025 % – на 48,8 мм соответственно ($\text{HCP}_{05} = 30,1$). Средняя масса корней была больше на 67,5 мг в варианте обработки семян 0,0025 % раствором оксида кремния ($\text{HCP}_{05} = 41,5$).

Ключевые слова: семена, энергия прорастания, всхожесть, фасоль спаржевая, пшеница яровая, редис посевной, лук репчатый.

Для цитирования: Леконцева Т. Г., Федоров А. В. Эффективность предпосевной обработки семян *Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis*, *Triticum aestivum* L., *Raphanus sativus* L., *Allium cepa* L. оксидом кремния // Аграрный вестник Урала. 2022. № 12 (227). С. 23–34. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-227-12-23-34.

Дата поступления статьи: 17.08.2022, **дата рецензирования:** 25.09.22, **дата принятия:** 12.10.22.

Постановка проблемы (Introduction)

Кремний довольно широко распространен в коре земного шара. Однако наблюдается несоответствие между распространением данного элемента в природе и имеющимися знаниями о нем. Кремний и его соединения являются обязательными элементами тканей растений и животных. Он присутствует во всех пищевых продуктах растительного происхождения [1, с. 302]. В золе культурных растений содержание кремния колеблется в среднем от 0,16 % до 8,4 %. Максимальное количество кремния содержат злаковые культуры (8–16 %), а растения риса – до 15–20 % оксида кремния [2, с. 39].

Кремний в растительном организме выполняет множество функций, способствует лучшему росту и развитию, повышению урожайности, особую роль играет при стрессовых ситуациях. Отсутствие кремния в растении приводит к замедленному росту, отставанию в развитии. Это единственный питательный элемент, который не нарушает состояние растений при его избытке [3, с. 86].

Исследования по влиянию данного элемента на растения актуальны, остается много неизученного.

Методология и методы исследования (Methods)

Оценку влияния оксида кремния на посевные качества семян проводили лабораторным методом согласно МУ 1.2.2635-10 «Медико-биологическая оценка безопасности наноматериалов» и ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести».

Для проращивания семян индикаторных культур пинцетом раскладывали в чашках Петри на двухслойную фильтровальную бумагу, смоченную дистиллированной водой (вариант опыта «контроль») или соответствующим опыту раствором (остальные варианты опыта), температура +20...+24 °С. С целью увлажнения фильтровальной бумаги до полной влагоемкости в каждую чашку Петри наливали по 3 мл соответствующего раствора. Нанесение исследуемого образца на поверхность семян проводили путем легкого встряхивания семян в бюксе с образцом в течение 30 секунд. По мере подсыхания семян и фильтровальной бумаги проводили опрыскивание дистиллированной водой. Энергию прорастания и всхожесть семян исследуемых культур проводили через определенный промежуток времени: фасоли – на 4-е и 7-е сутки опыта, пшеницы – на 4-е и 8-е сутки.

Кроме энергии прорастания и лабораторной всхожести семян, оценивались также количество, длина и масса подземных и надземных частей. По каждому варианту было заложено 20 семян, повторность четырехкратная. Проведено две закладки опыта.

Оксид кремния для исследований был предоставлен Отделом физики и химии наноматериалов Физико-технического института УдмФИЦ УрО РАН.

Схема опыта: 1) вода дистиллированная (контроль); 2) SiO_2 – 0,01 %; 3) SiO_2 – 0,005 %; 4) SiO_2 – 0,0025 %. Данная схема была изучена на семенах следующих культур: фасоль спаржевая *Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis* сорта Матильда и пшеница яровая *Triticum aestivum* L. сорта Свеча, редис посевной *Raphanus sativus* L. сорта Чемпион и лук репчатый *Allium cepa* L. сорта Одинцовец, – соответствующих ГОСТ 7758-75 и ГОСТ 9353-2016 соответственно.

Статистический анализ данных проводили дисперсионным методом по Б. А. Доспехову [4].

Результаты (Results)

Кремний – элемент IV группы периодической системы Д. И. Менделеева. После кислорода является самым распространенным элементом в коре земного шара, его содержание в литосфере по массе достигает 29,5 % [5].

Кремний – обязательный элемент растений [6, с. 23]. Он выполняет множество функций в растительном организме:

– оказывает существенное влияние на рост и развитие, способствует повышению урожайности и улучшению качества получаемой продукции;

– придает механическую прочность клеточным стенкам;

– в оптимальных дозах способствует лучшему усвоению таких элементов питания, как азот, фосфор, бор и др.;

– обеспечивает защиту растений от высоких токсичных доз тяжелых металлов;

– при оптимизации содержания кремния повышается эффективность фотосинтеза и активность корневой системы;

– невозможно переоценить роль кремния, которую он играет для повышения устойчивости растений к стрессам биотического и абиотического характера [7; 8, с. 70; 9, с. 12; 10; 11, с. 187]. Такой же точки зрения придерживаются и другие ученые, которые считают, что основной функцией кремния является формирование и поддержка природной защиты растений от загрязнения, болезней, насекомых-вредителей, заморозков, нехватки воды и элементов питания и других неблагоприятных факторов окружающей среды. Японские и канадские исследователи доказали, что иммуномодулирующая функция кремния заложена на генетическом уровне [12, с. 40; 13 с. 29; 14, с. 192; 15; 16].

Повышенная устойчивость растений к биотическим и абиотическим стрессам основана на том, что кремний находится в растении в виде силикагеля. Как отмечает М. П. Колесников, растения поглощают кремний из почвенного раствора в виде ионов (SiO_3^{2-}) и (SiO_4^{4-}), а также в виде собственно монокремниевых кислот (H_2SiO_3 и H_4SiO_4), которые впоследствии в клеточном соке превращаются в кремнегель $\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ [1, с. 304].

Водорастворимые формы кремния получают широкое применение как в России, так и за рубежом. Это обусловлено их высокой усвояемостью растениями, несложным способом применения и низкой себестоимостью. Считается, что они не так токсичны для животных и не летучи. Способы применения могут быть разные: можно использовать для обработки семенного материала и некорневых подкормок во время вегетационного периода. Предпосевная обработка семян положительно влияет с первых этапов их развития [17, с. 102; 3, с. 91; 18, с. 4; 19, с. 6].

Применение препарата «Силактив» (содержание кремния – 72 %) позволяет повысить урожайность риса до 16 % [20, с. 125].

Посевные качества – это совокупность признаков и свойств, характеризующих пригодность семян для посева. Это наиболее важные качества семян. Такой показатель, как энергия прорастания семян, характеризует дружность их прорастания,

всхожесть – количество семян, давших нормальные проростки в оптимальных условиях. Чем выше данные показатели, тем лучше качество семян. Обработка стимулирующими веществами призвана увеличить качество семенного материала для последующего повышения урожайности культур.

По результатам исследований все изучаемые концентрации оксида кремния по сравнению с контролем способствовали существенному увеличению

средней длины корней проростков фасоли (таблица 1, рис. 1, 2).

При 0,01-процентной концентрации данный показатель был больше на 30,6 мм; при 0,005-процентной – на 30,7 мм; при 0,0025-процентной – на 48,8 мм ($HCP_{05} = 30,1$). Средняя масса корней была существенно больше в варианте опыта с 0,0025-процентным раствором оксида кремния (на 67,5 мг при $HCP_{05} = 41,5$).

Таблица 1

Влияние оксида кремния на посевные качества семян фасоли спаржевой сорта Матильда, 2020 г.

Вариант обработки	Морфометрические параметры			
	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Средняя длина корней, мм	Масса корней, мг
Вода (к)	71,0	97,7	49,7	83,0
SiO ₂ 0,0025 %	84,7	100,0	98,5	150,5
SiO ₂ 0,005 %	70,7	100,0	80,4	105,6
SiO ₂ 0,01 %	69,7	100,0	80,3	119,7
HCP_{05}	$F_{\phi} < F_{05}$	$F_{\phi} < F_{05}$	30,1	41,5

Table 1

The effect of silicon oxide on the sowing qualities of seeds of the asparagus bean variety Matilda, 2020

Processing option	Morphometric parameters			
	Germination energy, %	Germination, %	Average length of roots, mm	Root mass, mg
Water (c)	71.0	97.7	49.7	83.0
SiO ₂ 0,0025 %	84.7	100.0	98.5	150.5
SiO ₂ 0,005 %	70.7	100.0	80.4	105.6
SiO ₂ 0,01 %	69.7	100.0	80.3	119.7
LSD_{05}	$F < F_{05}$	$F < F_{05}$	30.1	41.5

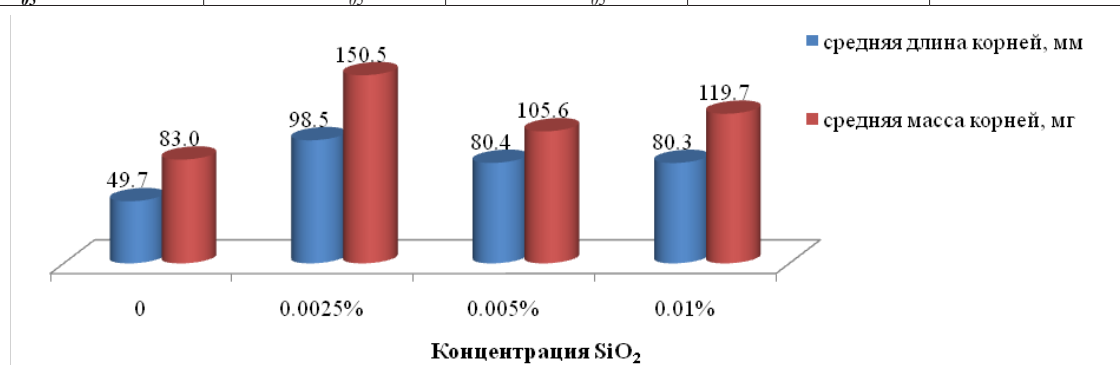


Рис. 1. Влияние оксида кремния на развитие первичных корешков семян фасоли спаржевой сорта Матильда, 2020 г.

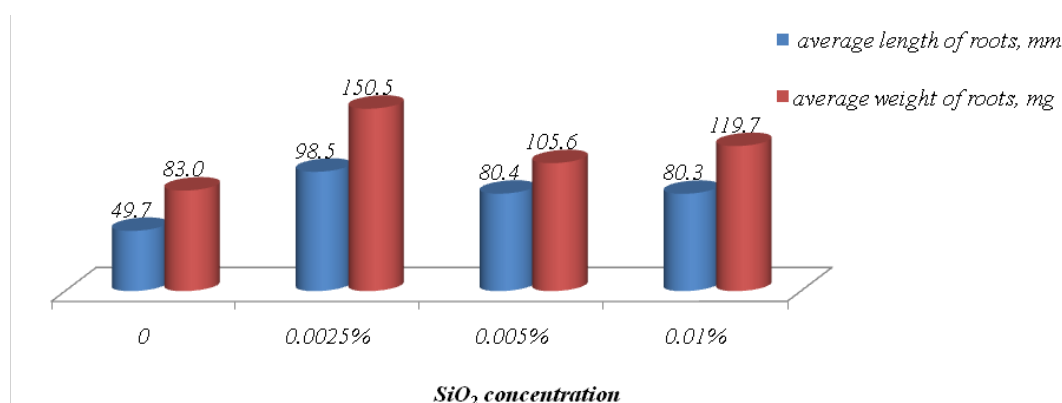


Fig. 1. The effect of silicon oxide on the development of the primary roots of the seeds of the asparagus bean variety Matilda, 2020



Рис. 2. Внешний вид проросших семян фасоли спаржевой сорта Матильда при контрольной обработке водой (слева) и 0,01-процентным оксидом кремния (справа), 2020 г.

Fig. 2. Appearance of germinated seeds of asparagus bean variety Matilda during control treatment with water (left) and 0.01 % silicon oxide (right), 2020



а)



б)

Рис. 3. Внешний вид корней фасоли спаржевой при обработке семян: а) 0,01-процентным оксидом кремния (слева) и водой (контроль, справа); б) 0,0025-процентным оксидом кремния (слева) и водой (контроль, справа), 2020 г.

Fig. 3. Appearance of the roots of asparagus beans during seed treatment: а) 0.01 % silicon oxide (left) and water (control, right); б) 0.0025 % silicon oxide (left) and water (control, right), 2020

По визуальной оценке наилучшее развитие корней было отмечено в варианте обработки семян 0,0025-процентным раствором кремния. Главный корень был толстый, с желтоватым оттенком, с наличием множества длинных боковых корней (рис. 3).

Таким образом, все концентрации оксида кремния оказали стимулирующее влияние на развитие зародышевых корней семян фасоли. Наибольший эффект оказал 0,0025-процентный раствор, при обработке которым выявлена существенно большая длина (на 48,8 мм) и масса корней (на 67,5 мг) по сравнению с контролем ($HCP_{05} = 30,1$ и 41,5 соответственно). По результатам многочисленных исследований ученых, концентрации растворов кремния и способы применения, которые оказывают стимулирующее действие, разные. Отмечен положительный эффект на посевные качества семян риса и фотосинтетическую деятельность растений при предпосевной обработке 0,75-процентным раствором кремния и 0,5-процентным при некорневом применении [21, с. 1]. Положительный эффект вы-

явлен на проростках семян гороха посевного сахарного (сорт Альфа), кукурузы сахарной (сорт Фаворит) и огурца (сорт Изящный) при обработке аморфным диоксидом кремния в дозе 50 мг/л. Использование кремнезоля с концентрацией 2 г/л для предпосевной обработки семян моркови сорта Лосиноостровская и рассады томатов Виноградная гроздь приводило к увеличению урожайности в 1,2 и 2 раза соответственно. Положительное влияние оказало применение аморфного диоксида кремния «Ковелос» на урожайность, физиологические и морфометрические показатели картофеля сорта Жуковский ранний [22, с. 95]. Рекомендовано внесение кремния в состав гидропонного раствора на постоянной основе. Джозеф Р. Чидьяк отмечает, что кремний добавляют в состав раствора в количестве не более 50 ppm. Данная концентрация вещества оказывает положительное влияние на рост и развитие растений, их устойчивость к болезням [23].

Кремний относится к важным элементам, входящих в минеральный состав коронарных клеток корневого чехлика и выделяемых корневыми во-

лосками слизей. Поэтому улучшение кремниевого питания растений приводит к увеличению биомассы корней, их объема, общей и рабочей адсорбирующей поверхности. Также применение удобрений, содержащих кремний, улучшает газообмен корневой системы [2, с. 39].

По результатам дисперсионного анализа морфометрических параметров проростков пшеницы (средняя длина и масса побега, средняя длина, количество и масса корней) между вариантами опыта отличий не выявлено. Однако при обработке семян 0,01-процентным раствором исследуемого раствора энергия прорастания и всхожесть были 59,5 % и 65,3 %, что меньше по сравнению с контролем на

25,5 % и 27,4 % соответственно (при $HCP_{05} = 3,9$ и 6,6, таблица 2).

Согласно МУ 1.2.2535-10 концентрация 0,01 % SiO_2 является токсичной по показателям энергии прорастания и всхожесть семян, тогда как 0,0025-процентный раствор оказал стимулирующее действие на такие параметры, как средняя длина побега, средняя длина и масса корня (на 135,2 %, 131,8 % и 157,2 % соответственно по сравнению с контролем). По оценке МУ 1.2.2535-10, в опыте при улучшении параметров свыше 120 % от контроля предполагается, что исследуемый образец обладает стимулирующими свойствами. Внешний вид проростков пшеницы приведен на рис. 4.

Таблица 2

Влияние оксида кремния на посевные качества семян пшеницы яровой сорта Свеча, 2020 г.

Вариант обработки	Морфометрические параметры					
	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Средняя длина побегов, мм	Средняя масса побегов, мг	Средняя длина корней, мм	Средняя масса корней, мг
Вода (к)	85,0	92,7	61,6	55,2	61,4	48,4
SiO_2 , 0,0025 %	85,3	93,0	83,3	63,9	80,9	76,1
SiO_2 , 0,005 %	80,0	83,0	72,7	60,8	66,9	49,9
SiO_2 , 0,01 %	59,5	65,3	72,4	57,0	58,0	58,1
HCP_{05}	3,9	6,6	$F_{\phi} < F_{05}$	$F_{\phi} < F_{05}$	$F_{\phi} < F_{05}$	$F_{\phi} < F_{05}$

Table 2

The effect of silicon oxide on the sowing qualities of seeds of spring wheat variety Svecha, 2020

Processing option	Morphometric parameters					
	Germination energy, %	Germination, %	Average length of shoot, mm	Average mass of shoots, mg	Average length of roots, mm	Average weight of roots, mg
Water (c)	85.0	92.7	61.6	55.2	61.4	48.4
SiO_2 , 0,0025 %	85.3	93.0	83.3	63.9	80.9	76.1
SiO_2 , 0,005 %	80.0	83.0	72.7	60.8	66.9	49.9
SiO_2 , 0,01 %	59.5	65.3	72.4	57.0	58.0	58.1
LSD_{05}	3.9	6.6	$F < F_{05}$	$F < F_{05}$	$F < F_{05}$	$F < F_{05}$

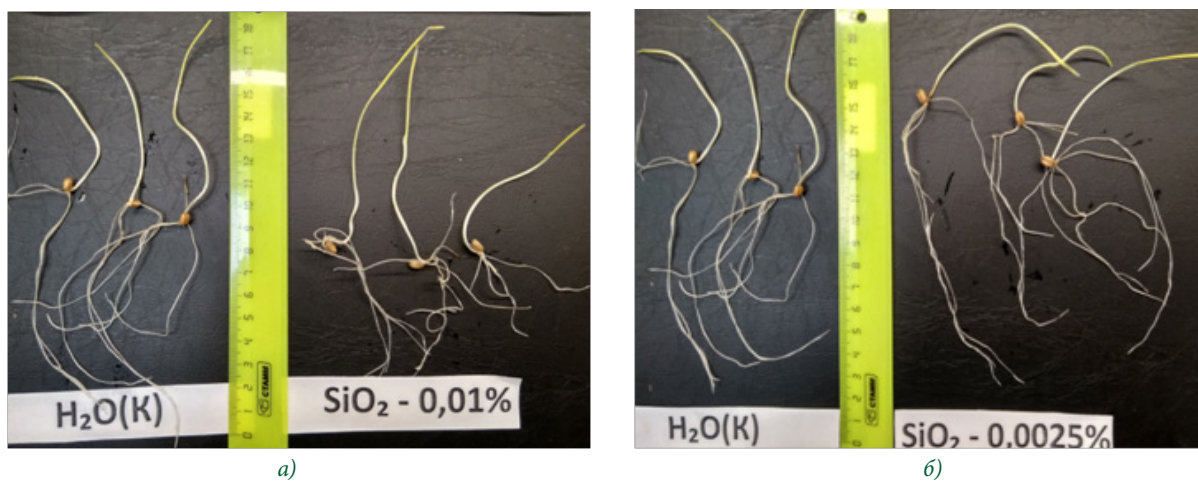


Рис. 4. Внешний вид проростков пшеницы при предпосевной обработке семян:
а) водой (контроль, слева) и 0,01-процентным раствором SiO_2 (справа);
б) водой (контроль, слева) и 0,0025-процентным раствором SiO_2 (справа), 2020 г.

Fig. 4. Appearance of wheat seedlings during presowing seed treatment
a) water (control, left) and 0.01 % SiO_2 solution (right);
b) water (control, left) and 0.0025 % SiO_2 solution (right), 2020

Таблица 3

Влияние оксида кремния на посевные качества семян редиса сорта Чемпион, 2020 г.

Вариант обработки	Морфометрические параметры			
	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Средняя длина корней, мм	Масса корней, мг
Вода (к)	98,0	98,0	99,4	40,3
SiO ₂ 0,0025 %	95,7	97,0	78,5	32,0
SiO ₂ 0,005 %	99,0	99,0	115,2	50,1
SiO ₂ 0,01 %	100,0	100,	42,8	21,2
HCP ₀₅	2,0	$F_{\phi} < F_{05}$	33,9	11,5

Table 3

Influence of silicon oxide on the sowing qualities of radish seed varieties Champion, 2020

Processing option	Morphometric parameters			
	Germination energy, %	Germination, %	Average length of roots, mm	Root mass, mg
Water (c)	98.0	98.0	99.4	40.3
SiO ₂ 0,0025 %	100.0	100.	42.8	21.2
SiO ₂ 0,005 %	99.0	99.0	115.2	50.1
SiO ₂ 0,01 %	95.7	97.0	78.5	32.0
LSD ₀₅	2.0	$F < F_{05}$	33.9	11.5

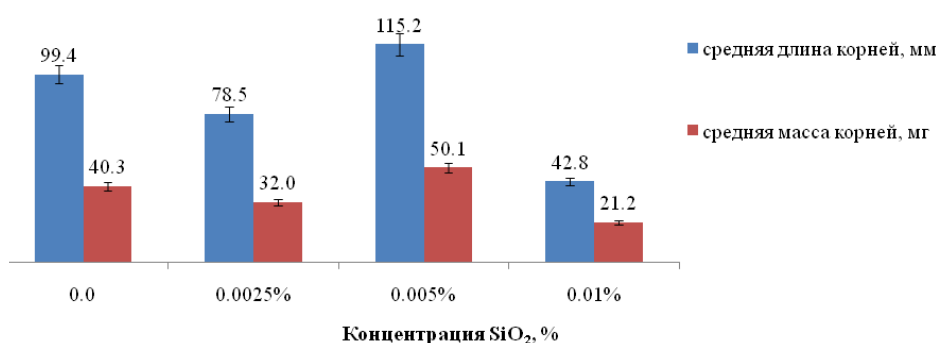


Рис. 5. Влияние оксида кремния на корнеобразование семян редиса сорта Чемпион, 2020 г.

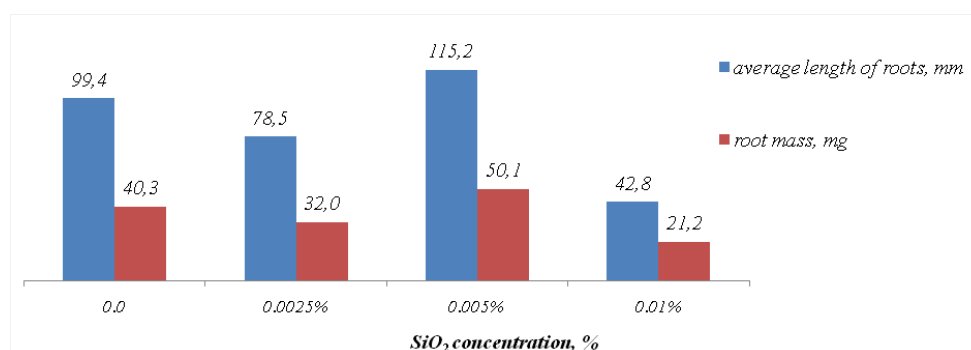


Fig. 5. The effect of silicon oxide on the root formation of radish seeds of the Champion variety, 2020

Злаковые культуры менее отзывчивы на действие аморфного диоксида кремния, а семена овощных и бобовых культур в большей степени [24, с. 45]. По другим данным, достаточно высокая эффективность предпосевной обработки семян и вегетирующих растений «ЭкSi», «Мивал-Агро», диатомитом и использования полного минерального удобрения в технологии возделывания яровой пшеницы сорта Маргарита [25, с. 67]. Способ при-

менения кремния также имеет большое значение. При корневом применении кремний содержащих растворов усваивается 1–5 %, тогда как при некорневом – 30–40 % [26, с. 34]. Опрыскивание проростков пшеницы оказалось лучшим вариантом по сравнению с замачиванием семян, которое выражалось в достоверном увеличении длины прироста проростков [27, с. 50].

Влияние оксида кремния на посевные качества семян лука репчатого сорта Одинцовец, 2020 г.

Вариант обработки	Морфометрические параметры				
	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Средняя длина корней, мм	Средняя масса растений, мг	Средняя длина растений, мм
Вода (к)	62,7	74,7	19,1	17,2	61,7
SiO ₂ 0,0025 %	65,0	74,7	18,9	10,1	41,6
SiO ₂ 0,005 %	45,0	62,0	19,9	11,1	41,1
SiO ₂ 0,01 %	62,0	72,0	21,5	17,2	59,3
HCP ₀₅	$F_{\phi} < F_{05}$	$F_{\phi} < F_{05}$	$F_{\phi} < F_{05}$	$F_{\phi} < F_{05}$	$F_{\phi} < F_{05}$

Table 4

The effect of silicon oxide on the sowing qualities of onion seeds of the Odintsovo variety, 2020

Processing option	Morphometric parameters				
	Germination energy, %	Germination, %	Average length of roots, mm	Average weight of plants, mg	Average length of plants, mm
Water (c)	62.7	74.7	19.1	17.2	61.7
SiO ₂ 0,0025 %	65.0	74.7	18.9	10.1	41.6
SiO ₂ 0,005 %	45.0	62.0	19.9	11.1	41.1
SiO ₂ 0,01 %	62.0	72.0	21.5	17.2	59.3
LSD ₀₅	$F < F_{05}$	$F < F_{05}$	$F < F_{05}$	$F < F_{05}$	$F < F_{05}$



а)



б)

Рис. 6. Внешний вид корней редиса сорта Чемпион при обработке семян:

а) водой (контроль, слева) и 0,01-процентным раствором оксида кремния (справа);

б) водой (контроль, слева) и 0,005-процентным раствором оксида кремния (справа), 2020 г.

Fig. 6. The appearance of the roots of the radish variety Champion during seed treatment:

а) water (control, left) and 0.01 % 0.01 % solution of silicon oxide (right);

б) water (control, left) and 0.005 % solution of silicon oxide (right), 2020

Обработка семян редиса посевного сорта Чемпион оксидом кремния также оказала влияние на их посевные качества. Энергия прорастания семян при контрольной обработке дистиллированной водой была 98,0 %, существенно выше в варианте использования 0,01-процентного оксида кремния (больше на 2,0 % при HCP₀₅ = 2,0). Однако в дальнейшем по всхожести семян между вариантами опыта разницы не было (таблица 3).

Обработка 0,01-процентным оксидом кремния по сравнению с контролем отрицательно повлияла на среднюю длину и массу корней, меньше на 56,6 мм и 19,1 мг соответственно (HCP₀₅ = 33,9 и 11,0, рис. 5).

По визуальной оценке обработка семян 0,01-процентным раствором кремния стимулировала развитие главного корня без боковых, всасывающие корневые волоски были слабо выражены (рис. 6, а, справа).

Стимулирующее влияние оказала 0,005-процентная концентрация раствора кремния по таким параметрам, как средняя длина и масса корней, однако разница по сравнению с контролем была не достоверна (рис. 6, б). Необходимо отметить наличие боковых корней, что является положительным моментом при развитии корневой системы и в дальнейшем растения в целом.

Также была оценена возможность применения оксида кремния для стимулирования семян лука. По внешнему виду семена черные (их иногда называют чернушкой), неправильной трехгранной формы, покрыты твердой морщинистой роговидной оболочкой, хорошо защищающей от неблагоприятных воздействий. Семена культуры считаются труднопрорастающими. Для повышения всхожести семян перед посевом рекомендуется проводить за-

мачивание, что способствует повышению посевных качеств. В опыте энергия прорастания и всхожесть семян были невысокими. Энергия прорастания в контроле – 62,7 % при обработке 0,005-процентным раствором кремния данный показатель снизился на 17,7 % и составил 45,0 %. Всхожесть по сравнению с контролем ниже на 12,7 %, однако разница недопустима (таблица 4).

По другим исследуемым параметрам, таким как средняя длина корней, средняя масса и длина растений, между вариантами опыта отличий не выявлено. Применение оксида кремния для стимулирования семян лука нецелесообразно.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Таким образом, на основе анализа научных статей и проведенных нами лабораторных исследований по влиянию оксида кремния на посевные качества семян нельзя сделать однозначный вывод об определенной концентрации, которая бы оказывала стимулирующее действие на разные виды растений. Ни одна из исследуемых в опыте концентраций не оказала жесткого губительного воздействия на семена и их дальнейшее развитие. Отмечена видоспецифичная реакция семян видов растений на предпосевную обработку оксидом кремния.

1. Наиболее отзывчивыми оказались семена фасоли спаржевой. Семена лука подвергать обработке оксидом кремния нецелесообразно, так как стимулирующего эффекта не выявлено.

2. Лучшие результаты по морфометрическим параметрам проростков фасоли спаржевой и пшеницы яровой получены при минимальной концентрации оксида кремния (0,0025 %), редиса посевного – 0,005 %.

3. Исследованные концентрации способствовали существенному увеличению средней длины корней фасоли. При 0,01-процентной концентрации данный показатель был больше на 30,6 мм; при 0,005-процентной – на 30,7 мм; при 0,0025-процентной – на 48,8 мм соответственно ($HCP_{05} = 30,1$). Средняя масса корней была больше на 67,5 мг в варианте обработки семян 0,0025-процентным раствором оксида кремния ($HCP_{05} = 41,5$).

4. Согласно МУ 1.2.2535-10, 0,01-процентная концентрация SiO_2 для семян пшеницы является токсичной, тогда как 0,0025-процентный раствор по сравнению с контролем оказал стимулирующее действие на такие параметры, как средняя длина побегов, средняя длина и масса корней (на 135,2 %, 131,8 % и 157,2 % соответственно).

Благодарности (Acknowledgements)

Авторы выражают благодарность сотрудникам Отдела физики и химии наноматериалов Физико-технического института УдмФИЦ УрО РАН: главному научному сотруднику, доктору физико-математических наук Ломаевой Светлане Федоровне, старшему научному сотруднику, кандидату физико-математических наук Шакову Анатолию Анатольевичу за предоставленный для исследований оксид кремния.

Библиографический список

1. Колесников М. П. Формы кремния в растениях // Успехи биологической химии. 2001. № 41. С. 301–332.
2. Козлов А. В., Уромова И. П., Фролов Е. А., Мозолева К. Ю. Физиологическое значение кремния в онтогенезе культурных растений и при их защите от фитопатогенов // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 1. С. 39.
3. Самсонова Н. Е. Кремний в растительных и животных организмах. Агрехимия. 2019. № 1. С. 86–96. DOI: 10.1134/S0002188119010071.
4. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. Москва: Колос, 1985. 351 с.
5. Матковский П., Ярулин Р. Кремний в мире человека // Химический журнал. 2011. № 6–7. С. 36–39.
6. Козлов А. В., Куликова А. Х., Яшин Е. А. Роль и значение кремния и кремнийсодержащих веществ в агроэкосистемах [Электронный ресурс] // Вестник Мининского университета. 2015. № 2 (10). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-i-znachenie-kremniya-i-kremniysoderzhaschih-veschestv-v-agroekosistemah> (дата обращения: 06.06.2022).
7. Крамарев С. М., Полянчиков С. П., Ковбель А. И. Кремний и защита растений от стресса: теория, практика, перспективы [Электронный ресурс]. URL: http://quantum.ua/articles/art_06.pdf (дата обращения 06.06.2022).
8. Петриченко В. Н., Логинов С. В., Туркина О. С., Солдатова С. Ю. Применение кремнийсодержащих препаратов в растениеводстве России // Вестник РАЕН. 2019. Т. 19. № 4. С. 70–86.
9. Самсонова Н. Е., Козлов Ю. В., Зайцева З. Ф., Шупинская И. А. Эффективность соединений кремния при обработке семян и растений кукурузы (*Zea mays L.*) // Агрехимия. 2017. № 1. С. 12–18.
10. Luyckx M., Hausman J. F., Lutts S., Guerriero G. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives [e-resource] // Frontiers in Plant Science. 2017. Vol. 8. No. 411. DOI: 10.3389/fpls.2017.00411. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00411/full> (date of reference: 22.07.2022).
11. Alzahrani Y., Kuşvuranb A., Alharbya H. F., Kuşvuranb S., Radyc M. M. The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced bydrought, salinity or cadmium // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. No. 154. Pp. 187–196.

12. Безручко Е. В. Кремний – недооцененный элемент питания растений // Земледелие. 2020. № 4. С. 40–46. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10411.
13. Матыченков В., Бочарникова Е., Ходырев В. Кремний питает растения // Наука и жизнь. 2015. № 8. С. 28–31.
14. Hawerth C., Araujo L., Bermudez-Cardona M. Silicon-mediated maize resistance to macrospora leaf spot // The Journal of Tropical Plant Pathology. 2018. Vol. 44. Pp. 192–196. DOI: 10.1007/s40858-018-0247-8.
15. Zhou X., Shen Y, Fu X. Application of Sodium Silicate Enhances Cucumber Resistance to Fusarium Wilt and Alters Soil Microbial Communities [e-resource] // Frontiers in Plant Science. 2018. Vol. 9. No. 624. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.00624/full>. DOI: 10.3389/fpls.2018.00624 (date of reference: 24.07.2022).
16. Kaushik P., Saini D. Silicon as a Vegetable Crops Modulator – A Review [e-resource] // Plants. 2019. Vol. 8. No. 6. No. 148. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/8/6/148>. DOI: 10.3390/plants8060148. (date of reference: 24.07.2022).
17. Ложникова В. Н., Слестя И. В. Рост растений ярового ячменя и активность эндогенных фитогормонов под действием кремния // Сельскохозяйственная биология. 2010. № 3. С. 102–107.
18. Смывалов В. С. Эффективность кремнийсодержащих материалов при возделывании яровой пшеницы и ячменя в условиях Среднего Поволжья // автореф. дис. ... канд. с.-х. наук.: 06.01.04 Усть-Кинельский, 2017. 20 с.
19. Зейслер Н. А. Влияние силатранов на прорастание семян хлебных злаков // Интеллектуальный потенциал XXI: ступени познания. 2016. № 31. С. 6–10.
20. Барчукова А. Я., Бондарчук Е. Ю., Чернышева Н. В. Урожайность риса в зависимости от применения в технологии его возделывания агрохимиката Силактив // Энтузиасты аграрной науки: сборник статей по материалам международной конференции, посвященной советскому и российскому организатору сельского хозяйства, академику ВАСХНИЛ и РАН, герою Социалистического Труда Трубилину Ивану Тимофеевичу. Краснодар, 2016. С. 125–129.
21. Кемечева М. Х. Роль кремниевых удобрений в повышении продуктивности риса на луговых почвах левобережья р. Кубань: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук.: 06.01.04. Краснодар, 2003. 21 с.
22. Немцова А. В., Харин А. В., Разлуга И. А., Выхорь Т. П. Влияние аморфного диоксида кремния «Ковелос» на урожайность, морфометрические и физиологические показатели овощных культур [Электронный ресурс] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21. № 2 (88). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-amorfno-go-dioksida-kremniya-kovelos-na-urozhaynost-morfometricheskie-i-fiziologicheskie-pokazateli-ovoschnyh-kultur> (дата обращения: 25.07.2022).
23. Загадочный помощник: кремний и его влияние на жизнь растений [Электронный ресурс]. URL: <https://agro-exim.com/ru/news/zagadochnyj-pomoshnik-kremnij-i-ego-vliyanie-na-zhizn-rastenij/> (дата обращения: 20.07.2022).
24. Анищенко Л. Н., Борздыко Е. В., Москаленко В. В., Сквородникова Н. А., Лось С. Л., Прохоренко Ф. В. Влияние аморфного диоксида кремния на ростовые и биохимические показатели культурных растений на ранних стадиях онтогенеза [Электронный ресурс] // Успехи современного естествознания. 2017. № 3. С. 40–45. URL: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36409> (дата обращения: 14.07.2022).
25. Смывалов В. С., Карпов А. В., Куликова А. Х., Яшин Е. А., Захарова Д. А. Продуктивность и биоэнергетическая эффективность технологий возделывания яровой пшеницы в зависимости от применения кремний содержащих препаратов, диатомита и минерального удобрения // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2017. № 4 (16). С. 67–73.
26. Матыченков В. В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва – растение: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пушино, 2008. 34 с.
27. Смирнова Ю. Д., Рабинович Г. Ю. Исследование влияния кремния на биометрию проростков яровой пшеницы // Аграрный научный журнал. 2021. № 11. С. 50–53.

Об авторах:

Татьяна Германовна Леконцева¹, научный сотрудник, ORCID 0000-0002-6659-0504, AuthorID 637255; +7 950-155-20-26, t.lekontseva@yandex.ru

Александр Владимирович Федоров¹, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, ORCID 0000-0003-2759-2037, AuthorID 219069; +7 950-820-25-65

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

Efficiency of presowing seed treatment of *Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis*, *Triticum aestivum* L., *Raphanus sativus* L., *Allium cepa* L. with silicon oxide

T. G. Lekontseva¹✉, A. V. Fedorov¹

¹Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

✉E-mail: t.lekontseva@yandex.ru

Abstract. The purpose of the study was to test the effect of an aqueous solution of silicon oxide on the sowing qualities of plant seeds. **Methods.** The assessment of the effect of silicon oxide (SiO₂) on the sowing qualities of seeds was carried out by a laboratory method according to Medical and biological safety assessment of nanomaterials 1.2.2635-10 and GOST 12038-84 “Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination”. Asparagus bean seeds *Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis* of Matilda variety, spring wheat *Triticum aestivum* L. of Svecha variety, seed radish *Raphanus sativus* L. of Champion variety and onion *Allium cepa* L. of Odintsovo variety. The following indicators were taken into account: germination energy and seed germination, number, length and weight of underground and aboveground parts of seedlings. Statistical data processing was carried out by the dispersion method according to B. A. Dospikhov. **Scientific novelty.** The species-specific reaction of seeds to the treatment with silicon oxide was revealed. The best results in terms of morphometric parameters of seedlings of asparagus bean and spring wheat were obtained when seeds were treated with 0.0025 % silicon oxide, radish – 0.005 %. It is not advisable to treat onion seeds with silicon oxide. According to the **research results**, asparagus bean seeds turned out to be the most responsive to processing. Germination energy and seed germination in the variant of treatment with 0.0025 % silicon oxide compared to the control (distilled water) were 13.7 % and 3.0 % higher, respectively, but the difference is not significant. The studied concentrations contributed to a significant increase in the average length of the roots. At 0.01 % concentration, this indicator was higher by 30.6 mm, 0.005 % by 30.7 mm, at 0.0025 % by 48.8 mm, respectively (HCP₀₅ = 30.1). The average root weight was 67.5 mg more in the variant of seed treatment with 0.0025% silicon oxide solution (HCP₀₅ = 41.5).

Keywords: seeds, germination energy, germination, cowpea asparagus, spring wheat, radish, onion.

For citation: Lekontseva T. G., Fedorov A. V. Effektivnost' predposevnoy obrabotki semyan *Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis*, *Triticum aestivum* L., *Raphanus sativus* L., *Allium cepa* L. oksidom kremniya [Efficiency L., *Allium cepa* L. with silicon oxide] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2022. No. 12 (227). Pp. 23–34. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-227-12-23-34. (In Russian.)

Date of paper submission: 17.08.2022, **date of review:** 25.09.22, **date of acceptance:** 12.10.22.

References

1. Kolesnikov M. P. Formy kremniya v rasteniyakh [Silicon forms in plants] // Biological chemistry reviews. 2001. No. 41. Pp. 301–332. (In Russian.)
2. Kozlov A. V., Uromova I. P., Frolov E. A., Mozoleva K. Yu. Fiziologicheskoe znachenie kremniya v ontogeneze kul'turnykh rasteniy i pri ikh zashchite ot fitopatogenov [The physiological significance of silicon in the ontogeny of cultivated plants and in their protection from phytopathogens] // European Student Scientific Journal. 2015. No. 1. P. 39. (In Russian.)
3. Samsonova N. E. Kremniy v rastitel'nykh i zhivotnykh organizmakh [Silicon in plant and animal organisms] // Agricultural Chemistry. 2019. No. 1. Pp. 86–96. DOI: 10.1134/S0002188119010071. (In Russian.)
4. Dospikhov B. A. Metodika polevogo opyta [Field experiment methodology]. Moscow: Kolos, 1985. 351 p. (In Russian.)
5. Matkovskiy P., Yaaruln R. Kremniy v mire cheloveka [Silicon in the human world] // The Chemical Journal. 2011. No. 6–7. Pp. 36–39. (In Russian.)
6. Kozlov A. V., Kulikova A. Kh., Yashin E. A. Rol' i znachenie kremniya i kremniysoderzhashchikh veshchestv v agroekosistemakh [The role and importance of silicon and silicon-containing substances in agroecosystems] [e-resource] // Vestnik Mininskogo universiteta. 2015. No. 2 (10). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-i-znachenie-kremniya-i-kremniysoderzhashchih-veschestv-v-agroekosistemah> (date of reference: 06.06.2022). (In Russian.)

7. Kramarev S. M., Polyanchikov S. P., Kovbel' A. I. Kremniy i zashchita rasteniy ot stressa: teoriya, praktika, perspektivy [Silicon and protection of plants from stress: theory, practice, prospects] [e-resource] URL: http://quantum.ua/articles/art_06.pdf (date of reference: 06.06.2022). (In Russian.)
8. Petrichenko V. N., Loginov S. V., Turkina O. S., Soldatova S. Yu. Primenenie kremniysoderzhashchikh preparatov v rastenievodstve Rossii [The use of silicon-containing preparations in crop production in Russia] // Vestnik RAEN. 2019. Vol. 19. No. 4. Pp. 70–86. (In Russian.)
9. Samsonova N. E., Kozlov Yu. V., Zaytseva Z. F., Shupinskaya I. A. Effektivnost' soedineniy kremniya pri obrabotke semyan i rasteniy kukuruzy (*Zea mays* L.) [The efficiency of silicon compounds in the treatment of maize (*Zea mays* L.) seeds and plants] // Agricultural Chemistry. 2017. No. 1. Pp. 12–18. (In Russian.)
10. Luyckx M., Hausman J. F., Lutts S., Guerriero G. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives [e-resource] // Frontiers in Plant Science. 2017. Vol. 8. No. 411. DOI: 10.3389/fpls.2017.00411. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00411/full> (date of reference: 22.07.2022).
11. Alzahrana Y., Kuşvuranb A., Alharbya H. F., Kuşvuranb S., Radyc M. M. The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced by drought, salinity or cadmium // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. No. 154. Pp. 187–196.
12. Bezruchko E. V. Kremniy – nedootsenennyy element pitaniya rasteniy [Silicon is an underestimated element of plant nutrition] // Zemledelie. 2020. No. 4. Pp. 40–46. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10411. (In Russian.)
13. Matychenkov V., Bocharnikova E., Khodyrev V. Kremniy pitaet rasteniya [Silicon nourishes plants] // Nauka i zhizn'. 2015. No. 8. Pp. 28–31. (In Russian.)
14. Hawerth S., Araujo L., Bermudez-Cardona M. Silicon-mediated maize resistance to macrospora leaf spot // The Journal of Tropical Plant Pathology. 2018. Vol. 44. Pp. 192–196. DOI: 10.1007/s40858-018-0247-8.
15. Zhou X., Shen Y, Fu X. Application of Sodium Silicate Enhances Cucumber Resistance to Fusarium Wilt and Alters Soil Microbial Communities [e-resource] // Frontiers in Plant Science. 2018. Vol. 9. No. 624. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.00624/fulldoi>: 10.3389/fpls.2018.00624 (date of reference: 24.07.2022).
16. Kaushik P., Saini D. Silicon as a Vegetable Crops Modulator: A Review [e-resource] // Plants. 2019. Vol. 8. No. 6. No. 148. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/8/6/148>. DOI: 10.3390/plants8060148 (date of reference: 24.07.2022).
17. Lozhnikova V. N., Slastya I. V. Rost rasteniy yarovogo yachmenya i aktivnost' endogennykh fitogormonov pod deystviem kremniya [Growth of spring barley plants and activity of endogenous phytohormones under the action of silicon] // Agricultural Biology. 2010. No. 3. Pp. 102–107. (In Russian.)
18. Smyvalov V. S. Effektivnost' kremniysoderzhashchikh materialov pri vozdeystvii yarovoy pshenitsy i yachmenya v usloviyakh Srednego Povolzh'ya: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk: 06.01.04 [Efficiency of silicon-containing materials in the cultivation of spring wheat and barley in the conditions of the Middle Volga region: abstract of the dissertation ... candidate of agricultural sciences: 06.01.04]. Ust'-Kinel'skiy, 2017. 20 p. (In Russian.)
19. Zeysler N. A. Vliyanie silatranov na prorastanie semyan khlebnnykh zlakov [Effect of silatranes on the germination of cereal seeds] // Intellektual'nyy potentsial XXI: stupeni poznaniya. 2016. No. 31. Pp. 6–10. (In Russian.)
20. Barchukova A. Ya., Bondarchuk E. Yu., Chernysheva N. V. Urozhaynost' risa v zavisimosti ot primeneniya v tekhnologii ego vozdeystviya agrokhimikata Silaktiv [Rice yield depending on the use of Silaktiv agrochemical in the technology of its cultivation] // Entuziasty agrarnoy nauki Sbornik statey po materialam mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy sovetskomu i rossiyskomu organizatoru sel'skogo khozyaystva, akademiku VASKhNIL i RAN, geroyu Sotsialisticheskogo Truda Trubilinu Ivanu Timofeevichu. Krasnodar, 2016. Pp. 125–129. (In Russian.)
21. Kemecheva M. Kh. Rol' kremnievykh udobreniy v povyshenii produktivnosti risa na lugovykh pochvakh levoberezh'ya r. Kuban': avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk: 06.01.04 [The role of silicon fertilizers in increasing the productivity of rice on meadow soils on the left bank of the river Kuban: abstract of the dissertation ... candidate of agricultural sciences: 06.01.04]. Krasnodar, 2003. 21 p. (In Russian.)
22. Nemtsova A. V., Kharin A. V., Razlugo I. A., Vykhor' T. P. Vliyanie amorfnogo dioksida kremniya "Kovelos" na urozhaynost', morfometricheskie i fiziologicheskie pokazateli ovoschnykh kul'tur [Influence of amorphous silicon dioxide "Kovelos" on productivity, morphometric and physiological parameters of vegetable crops] [e-resource] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2019. Vol. 21. No. 2 (88). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-amorfnogo-dioksida-kremniya-kovelos-na-urozhaynost-morfometricheskie-i-fiziologicheskie-pokazateli-ovoschnykh-kulturn> (date of reference: 25.07.2022). (In Russian.)
23. Zagadochnyy pomoshchnik: kremniy i ego vliyanie na zhizn' rasteniy [Mysterious helper: silicon and its effect on plant life] [e-resource]. URL: <https://agro-exim.com/ru/news/zagadochnyj-pomoshnik-kremnij-i-ego-vliyanie-na-zhizn-rastenij> (date of reference: 20.07.2022). (In Russian.)

24. Anishchenko L. N., Borzdyko E. V., Moskalenko V. V., Skovorodnikova N. A., Los' S. L., Prokhorenko F. V. Vliyanie amorfnoogo dioksida kremniya na rostovye i biokhimicheskie pokazateli kul'turnykh rasteniy na rannikh stadiyakh ontogeneza [Effect of amorphous silica on growth and biochemical parameters of cultivated plants at the early stages of ontogenesis] [e-resource] // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2017. No. 3. Pp. 40–45. URL: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36409> (date of reference: 14.07.2022). (In Russian.)
25. Smyvalov V. S., Karpov A. V., Kulikova A. Kh., Yashin E. A., Zakharova D. A. Produktivnost' i bioenergeticheskaya effektivnost' tekhnologiy vzdelyvaniya yarovoy pshenitsy v zavisimosti ot primeniya kremniy soderzhashchikh preparatov, diatomita i mineral'nogo udobreniya [Productivity and bioenergetic efficiency of spring wheat cultivation technologies depending on the use of silicon-containing preparations, diatomite and mineral fertilizer] // Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives. 2017. No. 4 (16). Pp. 67–73. (In Russian.)
26. Matychenkov V. V. Rol' podvizhnykh soedineniy kremniya v rasteniyakh i sisteme pochva – rastenie: avtoref. dis. d-ra biol. nauk [The role of mobile silicon compounds in plants and the soil – plant system: abstract of the dissertation ... doctor of biological sciences]. Pushchino, 2008. 34 p. (In Russian.)
27. Smirnova Yu. D., Rabinovich G. Yu. Issledovanie vliyaniya kremniya na biometriyu prorstkov yarovoy pshenitsy [Study of the effect of silicon on the biometrics of spring wheat seedlings] // The Agrarian Scientific Journal. 2021. No. 11. Pp. 50–53. (In Russian.)

Authors' information:

Tatyana G. Lekontseva¹, scientist researcher, ORCID 0000-0002-6659-0504, AuthorID 637255;
+7 950 155-20-26, t.lekontseva@yandex.ru

Aleksandr V. Fedorov¹, doctor of agricultural sciences, chief researcher, ORCID 0000-0003-2759-2037,
AuthorID 219069; +7 950 820-25-65

¹ Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia