

DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-1-716

УДК 633.11



Научная статья | Агрохимия и агропочвоведение

ВЛИЯНИЕ ЛИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЫ НА УРОЖАЙНОСТЬ ПШЕНИЦЫ

И.А. Массалимов, А.Х. Шакирзянов, Б.И. Массалимов

Обоснование. Проблема дефицита минеральных веществ решается внесением в почву основных видов удобрений: азота, калия и фосфора. Но в настоящее время твердо установлено, что еще одним наиболее востребованным макроэлементом является сера — важный элемент питания растений, которая улучшает усвоение соединений азота сельскохозяйственными культурами и обеспечивает ее высокое качество. В статье представлены результаты предпосевной и некорневой обработки наночастицами серы на урожайность и качество зерна мягкой яровой пшеницы на различных стадиях роста.

Цель. Целью исследования является оценка влияния предпосевной и некорневой обработки наночастицами серы на урожайность и качество зерна мягкой яровой пшеницы сорта «Экада» на различных стадиях роста.

Материалы и методы. В качестве источника наночастиц серы использован препарат на основе полисульфида кальция, разведением которого до концентрации 2% получают гидрозоль серы. Размеры частиц серы определяли с помощью лазерного анализатора размеров частиц и зондового микроскопа, а фазовый рентгеновский анализ проведен на дифрактометре. В работе использовалась мягкая яровая пшеница «Экада 70», характеристики которой определяли с помощью лабораторного и полевого опыта, который проводился по полностью рандомизированной блочной схеме с трехкратной повторностью.

Результаты. Установлено, что обработка пшеницы наночастицами серы на всех стадиях роста привела к улучшению основных показателей пшеницы, в том числе привела к получению более высокой урожайности и увеличению содержания белка в зерне пшеницы.

Заключение. Испытания в лабораторных и полевых условиях показали, что обработка мягкой пшеницы препаратом на основе полисульфида кальция оказывает положительное воздействие на все основные характеристики,

начиная с всхожести и количества продуктивных стеблей и завершая урожайностью и содержанием белка. Препарат может быть рекомендован к применению в качестве экологически безопасного продукта стимулирующего рост растения и повышающего урожайность и качество пшеницы.

Ключевые слова: сера; наночастица; полисульфид; пшеница; урожайность; белок

Для цитирования. Массалимов И.А., Шакирзянов А.Х., Массалимов Б.И. Влияние листовой обработки наночастицами серы на урожайность пшеницы // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2024. Т. 16, №1. С. 119-143. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-1-716

Original article | Agrochemistry and Agricultural Soil Science

EFFECT OF FOLIAR TREATMENT WITH SULFUR NANOPARTICLES ON WHEAT YIELD

I.A. Massalimov, A.Kh. Shakirzyanov, B.I. Massalimov

Background. The problem of mineral deficiency is solved by introducing the main types of fertilizers into the soil: nitrogen, potassium and phosphorus. But at present, it is firmly established that sulfur is another most demanded macronutrient – an important element of plant nutrition, which improves the absorption of nitrogen compounds by agricultural crops and ensures its high quality. The article presents the results of pre-sowing and foliar treatment with sulfur nanoparticles on the yield and grain quality of soft spring wheat at various stages of growth.

Purpose. The aim of the study is to evaluate the effect of presowing and foliar treatment with sulfur nanoparticles on the yield and grain quality of soft spring wheat of the Ekada variety at various stages of growth.

Materials and methods. As a source of sulfur nanoparticles, a preparation based on calcium polysulfide was used, which, diluted to a concentration of 2%, leads to obtaining sulfur hydrosol. The sulfur particle sizes were determined using a laser particle size analyzer and a probe microscope, and the X-ray phase analysis was carried out on a diffractometer. We used soft spring wheat “Ekada 70”, the characteristics of which were determined using laboratory and field experiments, which were carried out according to a completely randomized block scheme with three repetitions.

Results. *It was found that the treatment of wheat with sulfur nanoparticles at all stages of growth led to an improvement in the main indicators of wheat, including a higher yield and an increase in the protein content in wheat grain.*

Conclusion. *Laboratory and field tests have shown that the treatment of soft wheat with a calcium polysulfide preparation has a positive effect on all key characteristics, from germination and number of productive stems to yield and protein content. The drug can be recommended for use as an environmentally friendly product that stimulates plant growth and increases the yield and quality of wheat.*

Keywords: *sulfur; nanoparticles; polysulfide; wheat; productivity; protein*

For citation. *Massalimov I.A., Shakirzyanov A.Kh., Massalimov B.I. Effect of Foliar Treatment with Sulfur Nanoparticles on Wheat Yield. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 119-143. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-1-716*

Введение

Проблема дефицита минеральных веществ решается внесением в почву основных видов удобрений: азота, калия и фосфора. Но в последнее время выяснилось, что еще одним наиболее востребованным макроэлементом наряду с азотом, калием и фосфором является сера – важный элемент питания растений [13]. Это объясняется тем, что она входит в состав белков, витаминов, участвует в формировании большинства ферментов, масел, играет важную роль в окислительно-восстановительных реакциях культур. Сера улучшает усвоение соединений азота сельскохозяйственными культурами и предотвращает образование небелковых форм азотистых соединений (нитратов, нитритов и др.) в товарной продукции, чем и обеспечивает ее высокое качество. В настоящее время установлено, что дефицит серы существенно влияет на качество и количество урожая всех культур, в том числе основных продуктов питания, таких как злаковые, бобовые и масличные культуры [1,10].

Применение серы совместно с азотом традиционным способом внесением в почву эффективно, улучшает количество и качество урожая, а потому применяется давно [9, 12, 16, 20, 22, 24].

Но в последнее время все большую популярность приобретает, наряду с внесением в почву этих удобрений, листовая обработка, т. е. опрыскивание. Листовая обработка растений на определенных стадиях позволяет создавать благоприятные условия для развития растений. Степень и скорость усвоения элементов питания через листву значительно выше, чем при внесении удобрений в грунт. Кроме того, листовая обработка позво-

ляет проводить некоторые подкормки тогда, когда активность корневой системы со временем угасает [8,15]. В качестве серосодержащих подкормок для листовой обработки обычно используют растворимые сульфаты (MgSO_4 , K_2SO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) и тиосульфаты ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $\text{Ca}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$), т. е. те же соединения, которые вносились в почву при традиционном способе использования удобрений.

Дефицит серы в почве также становится глобальной проблемой, потому что вызывает снижение эффективности использования азота (ЭИА) и увеличение количества сообщений о проблемах со здоровьем, связанных с белком пшеницы. В [23] использовались полевые и тепличные эксперименты для изучения воздействия серных удобрений на почву с дефицитом серы. Показано, что добавление серы увеличивало ЭИА более чем на 20%, авторы пришли к выводу, что дефицит серы в современных системах ведения сельского хозяйства не только оказывает глубокое негативное влияние на производительность, но и влияет на здоровье населения. В работе [18] было проведено изучение влияния внекорневой и почвенной подкормки чистой серой (0, 5, 10, 15, 20, 25 и 30 ppm) на вегетативный рост, урожайность и фотосинтез пигменты в листьях пшеницы. Результаты показали, что вегетативный рост и урожайность параметры (количество побегов/растение, количество листьев/растение, площадь флагового листа/растение, количество колос/растение, масса колоса, количество зерен, масса зерна и сухая масса побегов) были увеличены значительно при концентрации 15 и 20 ppm серы по сравнению с контрольными растениями. Применение серы для листьев и почвы значительно увеличило содержание хлорофилла «а», хлорофилла «b», общего хлорофилла в листьях и содержания азота и белка в семенах с увеличением концентрации серы. Чтобы оценить вклад азота и серы в почву и внекорневую подкормку на оценку качества пшеницы, была проведена полевые эксперименты с четырехкратной повторностью и восемью различными обработками комбинаций азота и серы, распределенных по участкам на разных стадиях роста [17]. В качестве источника азота применялась мочевины, а в качестве источник серы применяли сульфата аммония. Результаты показали, что самое высокое качество пшеницы можно получить сочетанием почвенной и некорневой обработки. В работе [21] ставилась задача, может ли внесение азота и серы в озимую пшеницу на стадии цветения во время двух полевых испытаний влиять на поглощение и распределение азота и серы в зерне и хлебопекарных качествах муки. С использованием метода масс-спектрометрии изотопов N и S обнаружено, что максимальный эффект наблюдается при одновременном внесении удо-

брений азота и серы. Установлено что синергетический эффект между внекорневыми азотными и серными удобрениями, по-видимому, увеличивает усвоение азота и серы зерном и может улучшить хлебопекарные качества.

Таким образом, листовая обработка растений пшеницы существенно и положительно влияет на качество и количество урожая. В связи с этим работе исследована эффективность препарата на основе полисульфида кальция посредством лабораторных и полевых испытаний на пшенице сорта Экада-70. В нашей работе исследовано предпосевной обработки семян и листовой обработки растений препаратом, содержащим полисульфид кальция, который при разбавлении водой, как показали результаты [3-5, 14] генерирует наночастицы серы.

Материалы

1. Характеристики препарата

В качестве препарата использован состав на основе полисульфида кальция [2], который представляет собой прозрачный раствор темно красного цвета плотностью $\rho=1,24 \text{ г/см}^3$ (рис. 1а). Рабочую жидкость готовили для листовой обработки разбавлением препарата до 2% концентрации при этом образовывалась дисперсия – гидрозоль серы (рис. 1б), а для протравливания использовалась рабочая жидкость 10% концентрации.

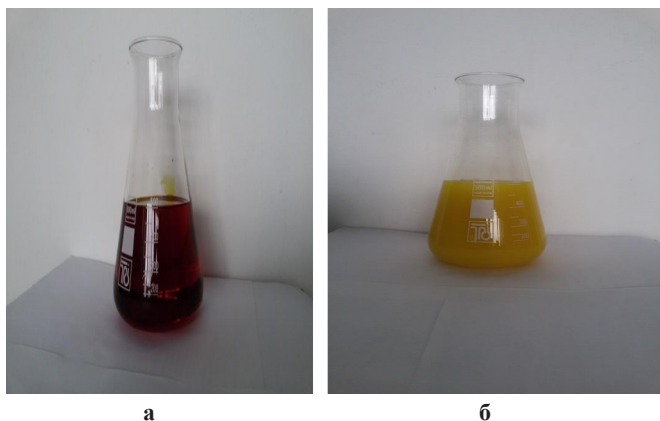


Рис. 1. Изображение раствора полисульфида кальция (а) и рабочей жидкости, полученной разбавлением раствора полисульфида кальция (б).

Характеристики частиц (размеры и их форма) были оценены с помощью лазерного анализатора размеров частиц Shimadzu Wing SALD 7101

и зондового микроскопа Solver PRO-M, а фазовый рентгеновский анализ проведен на дифрактометре BRUKER D2 PHASER. Для анализа распределения рабочей жидкости по поверхности использовался оптический микроскоп.

2. Характеристики пшеницы

В работе использовалась мягкая яровая пшеница «Экада 70», рекомендованная к применению [6], средний уровень урожайности в Уральском регионе 19,8 ц/га. Колос цилиндрический, средней плотности, белый с короткими или средней длины остевидными отростками на конце. Зерновка окрашенная. Масса 1000 зерен от 32 до 46 грамм. Разновидность лютеценс. Среднеустойчив к полеганию. Засухоустойчивость средняя. Ценная пшеница. Масса 1000 зёрен 32-46 г. Содержание клейковины до 36%, белка до 17,6%. Средняя урожайность в Уральском регионе 19,8 ц/га.

3. Характеристики места проведения эксперимента

Место проведения: Россия, Республика Башкортостан, опытный участок Башкирского научно-исследовательского института сельского хозяйства.

Агрохимическая характеристика почвы (опытного участка)

Почва: чернозем обыкновенный, тяжелосуглинистого механического состава.

Климатические условия относят территорию к зоне рискованного земледелия, характеризуются жарким летом и холодной зимой. Средняя годовая температура воздуха составляет +4,1°C. Продолжительность периода с температурой выше 0°C составляет 150 дней, выше +10°C – 137 дней. Снег держится в среднем 150 дней. Высота снежного покрова к концу зимы бывает 20 - 30 см. Полное оттаивание почвы наступает в третьей декаде апреля. Среднегодовое количество осадков составляет 310-335 мм, из них за май-июнь 55-70 мм, а за вегетационный период – 164-167 мм. В переходные периоды года – весной и осенью создаётся пониженный температурный режим. Наблюдаются резкие колебания температуры воздуха не только в годовом ходе, но и в суточном. Кроме того, выпадение осадков тоже изменчиво как в годовом цикле, так и по сезонам. Летом устанавливается жаркая и сухая погода, что резко снижает урожайность сельскохозяйственных культур. Гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК Hydrothermal moisture coefficient), характеристика уровня влагообеспеченности территории составляет в среднем за вегетацию 0,8, а в отдельные годы снижается до 0,4- 0,5.

Таблица 1.

Агрохимическая характеристика почвы опытного участка

Показатели	Чернозём обыкновенный
Гумус по Тюрину, %	6,28
Азот валовой, %	0,354
Азот щёлочногидролизуемый, мг/кг	272
Фосфор валовой, %	0,122
Фосфор подвижный, мг/100 г почвы	3,6
Степень подвижности фосфора, мг/л	0,04
Калий обменный, мг/100 г почвы	21,5
Кислотность обменная (pHкcl)	6,08
Гидролитическая кислотность, мг-экв/100 г	2,07
Сумма поглощ. оснований, мг-экв/100 г	36,9
Поглощённый кальций, мг-экв/100 г	21,2
Поглощённый магний, мг-экв/100 г	3,6
Степень насыщенности основаниями, %	93

4. Схема опыта

Виды испытания: лабораторный и полевой опыт, который проводился по полностью рандомизированной блочной схеме с трехкратной повторностью.

Рабочая жидкость для протравливания зерен готовилась разбавлением препарата разбавлением водой до концентрации 10%: к 9 литрам воды добавляли 1 литр препарата. Полученной рабочей жидкостью обрабатывали 1 тонну зерна. В случае листовой обработки рабочая жидкость готовилась разбавлением препарата водой до концентрации 2%, к 98 литрам воды добавляли 2 литра препарата. Эта рабочая жидкость наносилась опрыскиванием на растения.

Площадь (кв. м) и расположение делянок:

Площадь посевой делянки: $4,0 \times 25 = 100 \text{ м}^2$, количество повторностей в опыте – три.

Было проведено 4 варианта обработки:

1. контроль (обработка водой);
2. протравливание семян 10% препаратом, 10литров рабочей жидкости на 1 тонну зерна;
3. обработка растений 2% препаратом в фазу молочной спелости (2 л препарата на 98 л воды), 200 литров рабочей жидкости на 1 гектар;
4. обработка растений препаратом в фазу налива зерна (2 л препарата на 98 л воды), 200 литров рабочей жидкости на 1 гектар.

5. Агротехнические мероприятия, которые проводились до и во время эксперимента:

1. предшественник растения, на котором проводилось испытание: яровая пшеница по чистому пару;

2. обработка почвы: вспашка на глубину 23-25 см (сентябрь), ранневсеннее боронование (май), предпосевная культивация (май);

3. внесение удобрений: азот (15 кг), фосфор (15 кг), калий (15 кг) - N15P15K15.

Норма посева семян: 5 млн. всхожих зёрен на гектар.

Способ сева: рядовой с шириной междурядий 15 см.

Наименование и сроки проведения мероприятий по уходу за посевами: химическая прополка в период кущения яровой пшеницы (гербицид Чисталан).

Технология и способ применения препаратов: поделяночное опрыскивание ранцевым опрыскивателем. Норма расхода рабочей жидкости: для листовой обработки 200 л/га, для протравливания семян 10л/т. Сроки применения препарата: предпосевная обработка зерна и посевов в фазе молочной спелости и налива зерна.

6. Методика проведения испытаний

Фазы развития растений в период проведения исследований: полные всходы, кущение, колошение - цветение, полная спелость зерна. Для определения структуры урожая за один-два дня до начала уборки яровой пшеницы с каждой делянки отбирали по 4 сноповых образца. После просушки снопов определили: массу 1000 зерен и натуральный вес зерна. Уборку и учет урожая яровой пшеницы проводили самоходным комбайном прямым комбайнированием. При этом убирали всю площадь делянки. Пересчет урожая проводили на 100%-ную чистоту и 14%-ную влажность зерна.

7. Наблюдения за ростом и развитием яровой пшеницы

Посев яровой пшеницы проводился 21 мая 2020 года. Всходы появились на 6-й день после посева (27.05.2020 г.). Предпосевная обработка и обработка посевов препаратом полисульфида кальция оказывало стимулирующее влияние на растения яровой пшеницы, несколько ускоряло наступление фенологических фаз развития.

Результаты

1. Характеристики препарата

В процессе приготовления рабочего раствора препарат разбавляется водой до концентраций 2%, в результате молекулы полисульфида каль-

ция разрушаются, раствор мутнеет и становится непрозрачным за счет образования частиц серы (рис. 1б), размеры которых измеряют с помощью лазерного анализатора. Лазерный анализатор позволяет определять дифференциальное и интегральное распределения по размерам частиц осадка (рис. 2а), из которого видно, что средний размер частиц составляет 20 нм. Из рис. 2а видно, что все 100% частиц серы имеют размер меньше 40 нм.

Измерения, проведенные на зондовом микроскопе, также показали значения среднего размера частиц в интервале 20-25 нм, кроме того, установлена их сферически симметричная форма (см. рис. 2б). Химический и рентгеновский дифракционный анализы порошка показали, что частицы являются элементарной серой с орторомбической структурой кристаллической решетки (рис. 3).

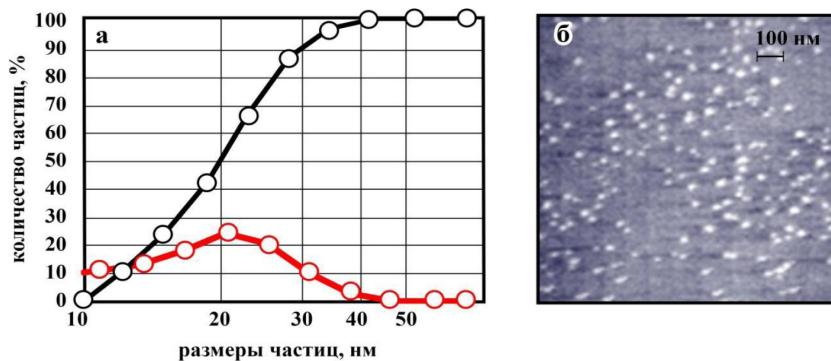


Рис. 2. Интегральное и дифференциальное распределение частиц серы, выделенных из полисульфида кальция (а) и изображение частиц серы, полученное с помощью зондового микроскопа (б)



Рис. 3. Рентгенограмма наночастиц серы, осажденных из полисульфидного раствора

При нанесении на поверхность растений препарат в виде рабочей жидкости равномерно распределяется по поверхности. Изображение разбавленного препарата на поверхности приведено на рис. 4.

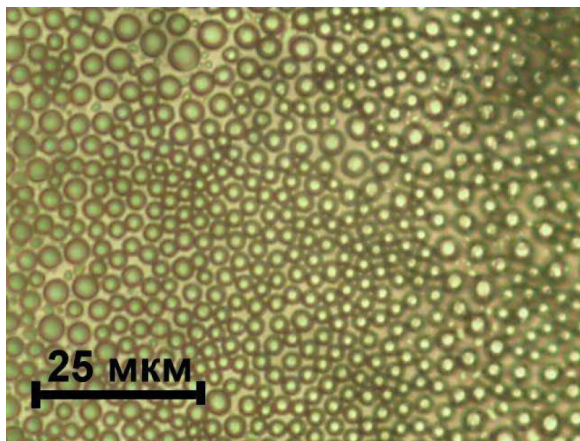


Рис. 4. Изображение поверхности стекла обработанного рабочей жидкостью

2. Влияние обработки препаратом на биологические параметры яровой пшеницы

В первую очередь была определена всхожесть и морфологические характеристики (длина побегов и корешков) препарата. Различают два вида всхожести: лабораторная всхожесть - определяется в лабораторных условиях и полевая всхожесть – определяется по количеству всходов непосредственно на поле, практически во всех случаях она бывает ниже лабораторной. Перед выполнением полевых испытаний были проведены лабораторные испытания, на основании которых установлена оптимальная концентрация препарата, приводящая к максимальной всхожести пшеницы. Для этой цели зерна пшеницы были обработаны препаратом различной концентрации. Для установления оптимальной концентрации для предпосевной обработки семян пшеницы препарат готовили ряд растворов из расчета 10 литров рабочей жидкости для обработки 1 тонны зерен пшеницы. В 10 литров рабочей жидкости компоненты препарат: вода входили в следующих отношениях: вода были: 0.5: 9.5, 1:9, 2:8, 3:7, 5:5 (рис.5).

По результатам исследований была установлена оптимальная концентрация, при которой получили максимальную всхожесть равную 98%, в контроле всхожесть равна 93%. Таким образом, соотношение компонент

9:1 принято в качестве оптимальной при предпосевной обработке семян (рис. 5).

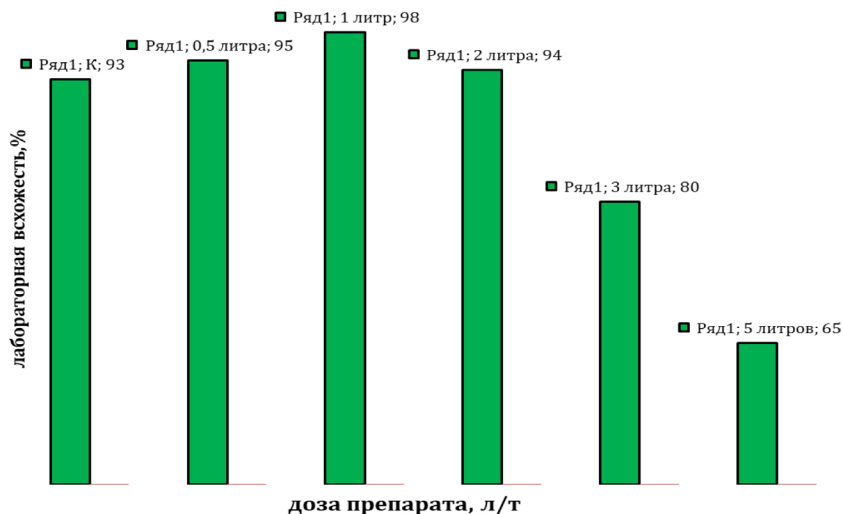


Рис. 5. Зависимость лабораторной всхожести от дозы препарата на тонну препарата

Далее для определения морфологических характеристик (длина побегов и корешков) полученные образцы рабочей жидкости раскладывали в чашки Петри по 15 зерен и заливали растворами различной концентрации и ставили в термостат при 25С (рис.6). Контрольными образцами являлись образцы зерен обработанных водой. Для каждого значения использовалось 6 чашек Петри, т.е. брали среднее по 90 измерениям. Установлено, что длина побегов и корешков сильно зависит от концентрации раствора, максимальные значения длин побегов и корешков достигает 190-200%, т.е. практически удваивается при обработке препаратом (рис.7), видно, что происходит при использовании препарата в концентрации 20 ppm.

При значениях концентраций больших, чем 20 ppm наблюдались меньшие значения, чем контрольные, т. е. рост подавлялся. При значениях концентраций меньших чем 20 ppm также наблюдались меньшие значения роста побегов и корешков, из-за того что концентрация молекул серы недостаточно для стимуляции роста. Наблюдаемые на рис.7 данные показывают, что препарат обладает сильным ростстимулирующим действием, что выражается 90-100% прибавлением роста побегов и корешков. На рис.7б

изображены проросшие зерна пшеницы обработанные водой (зерно слева) и обработанные дисперсиями с концентрациями 15 ppm и 20 ppm.

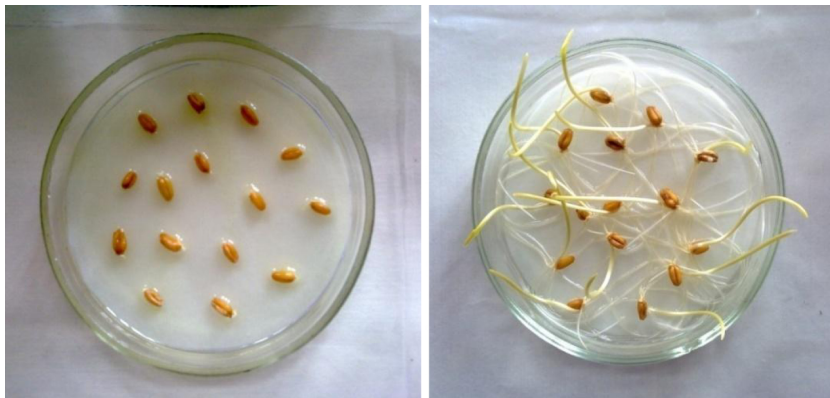


Рис. 6. Зерна пшеницы до обработки (а) и после обработки (б) дисперсией наночастиц серебра, выделенной из препарата на основе полисульфидного раствора

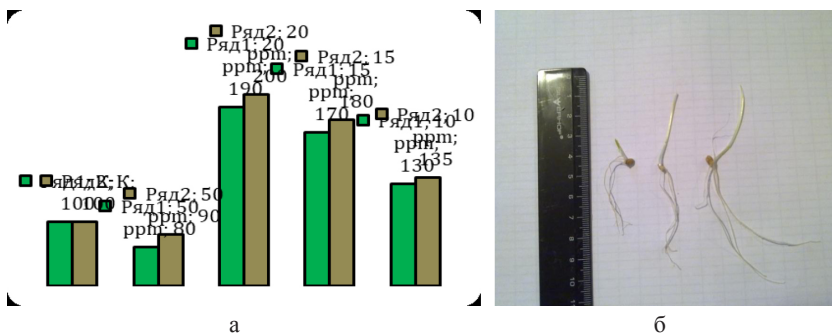


Рис. 7. Зависимость длины побегов и корешков для разных степеней разбавления (а) и изображение зерна необработанного и обработанных образцов (б)

Далее были проведены полевые испытания. В процессе выполнения работы измеряли: число всходов, полевая всхожесть, число растений к уборке, число сохранившихся растений, количество стеблей, коэффициент кущения, количество продуктивных стеблей, количество зёрен в колосе, вес зерна с 1 колоса, масса 1000 зёрен, выход зерна, выход соломы, биологическая урожайность (см. таблица 2).

Из данных таблицы 2 видно, что обработка зерна перед посевом, обработка в фазе молочной спелости и в фазе налива приводят к улучшению всех

показателей пшеницы. Наилучшие показатели полевой всхожести, процента сохранившихся растений, количества стеблей, количества продуктивных стеблей дал вариант протравливания семян. Надо отметить, что обе обработки растений в фазе молочной спелости и в фазе налива дают улучшение показателей по сравнению с контрольными показателями. В тоже время обработка растений в фазе молочной спелости дала максимальные результаты для показателей количества зёрен в колосе, веса зерна с 1 колоса, массы 1000 зёрен, выхода зерна и выхода соломы. Таким образом, обработка препаратом приводит к улучшению всех основных показателей пшеницы и показывает, что предложенный метод перспективен для использования.

Таблица 2.

Влияние препаратов на основе полисульфида кальция на структуру урожая яровой мягкой пшеницы Экада 70

№ п/п	Элементы структуры урожая	Контроль (без обработки)	Протравливание семян	Обработка растений в фазу молочной спелости	Обработка растений в фазу восковой спелости
1	Число всходов, шт/м ²	400	405	403	402
2	Полевая всхожесть, %	80,0	81,0	80,6	80,4
3	Число растений к уборке, шт/м ²	324	339	336	335
4	% сохранившихся растений	81,0	83,7	83,4	83,3
5	Количество стеблей, шт/м ²	356	373	370	369
6	Коэффициент кущения	1,1	1,1	1,1	1,1
7	Количество продуктивных стеблей, шт/м ²	356	373	370	369
8	Коэффициент продуктивного кущения	1,0	1,0	1,0	1,0
9	Количество зёрен в колосе, шт	16,0	16,0	16,5	16,4
10	Вес зерна с 1 колоса, г	0,51	0,53	0,58	0,56
11	Масса 1000 зёрен, г	31,7	33,3	35,1	34,4
12	Урожайность (выход зерна), ц/га	18,2	20,0	21,5	20,7
13	Выход соломы, ц/га	18,8	20,0	22,0	21,1
14	Биологическая урожайность, ц/га	37,0	40,9	43,5	41,8
15	Содержание белка, %	13,5	14,02	14,70	14,50

НСР 05 = 0,39 ц/га.

Использование препарата обеспечило более высокую урожайность яровой пшеницы. Так, протравливание зерен препаратом привело к 9,6%

увеличению урожайности, в контрольном варианте 18,2 ц/га. А обработка в фазе восковой спелости зерна повысила урожайность яровой пшеницы на 10% ц/га, по отношению урожайности в контрольном варианте. Обработка растений препаратом в фазе молочной спелости зерна дала прибавку урожайности яровой пшеницы 14,4% по сравнению с контролем и достигла 21,5 ц/га. Наряду с увеличением урожайности возрастает также такой важный показатель как содержание белка. В контрольном варианте содержание белка равно 13,5% протравливание зерен препаратом привело к увеличению содержания белка до 14,02%. Обработка растений препаратом в фазе молочной спелости восковой спелости зерна привело к увеличению этого параметра до 14,70%, а обработка в фазе восковой спелости зерна повысила параметра до значений 14,5%. Таким образом, препарат на основе полисульфида кальция обладает большим потенциалом применения для растений, особенно для зерновых культур, в связи с увеличением урожайности и качества зерна.

Обсуждение

Проблема обеспечения полноценного развития растений пшеницы решается внесением серы в почву в виде элементарной порошковой серы и в виде серосодержащих соединений, в основном в виде сульфатов аммония, магния, кальция. Виды серосодержащих удобрений в виде сульфатов, разрешенные в РФ: сульфат калия, серноокислый марганец и аммоний, сульфат аммония-натрия, сульфат магния. Этот метод показал свою эффективность, особенно совместного внесения серы и азота [7, 9, 12, 19]. В [19] авторы установили, что добавление серы увеличивало эффективность использования азота, в основном за счет увеличения извлечения азота из почвы, авторы считают, что сбалансированное внесение азота и серы важно для снижения потенциального загрязнения остаточными нитратами почвы за счет увеличения извлечения азота из почвы при сохранении высокой эффективности использования азота. В полевых исследованиях авторы [7] включали два уровня внесения в почву азотных удобрений и три уровня удобрений серных. Внесение азота и серы также значительно повлияло на урожай зерна и сухой клейковины, самое высокое содержание белка в зерне было получено при сочетании самых высоких норм удобрений (180 кг/га азота и 120 кг/га серы). В работе [12] эксперимент показал, что яровая пшеница положительно реагирует на азотные и серные удобрения на урожай зерна, наиболее благоприятно влияет на содержание общего белка, клейковины, цистеина и метионина наблюдалось при внесении N в норме

80 кг/га и S в норме 50 кг/га. Установлена положительная корреляция между содержанием S в зерне и урожайностью зерна ($r = 0,73$). В работе [9] указывается, что несбалансированное внесение азотных и/или серных удобрений может иметь низкую эффективность использования азота и серы, а также иметь существенные негативные последствия для урожайности, потери питательных веществ и параметров качества растений. Таким образом, внесение совместно азота и серы заметно улучшает урожайность и содержание белка в зерне.

Но в последнее время приобретает популярность, листовая обработка, т. е. опрыскивание, наряду с внесением в почву этих удобрений. Листовая обработка растений на определенных стадиях позволяет создавать благоприятные условия для развития растений. Степень и скорость усвоения элементов питания из удобрений через листву значительно выше, чем при внесении удобрений в грунт. Кроме того, некорневая обработка позволяет проводить некоторые подкормки тогда, когда активность корневой системы со временем угасает. В работе [21] опрыскивали растения пшеницы серой и азотом некорневой обработкой и исследовали содержание изотопов азота (^{15}N) и серы (^{34}S) в различных частях растений (листья, стебли, колосья) с помощью масс-спектрометрии. Влияние внекорневой подкормки на процент извлечения изотопов ^{15}N и ^{34}S в различных частях растения, урожайность зерна, содержание белка в муке и свойства теста исследовали после комбинации обработок: N (мочевина), S (микронизированная элементарная S) и NS (оба мочевины и микронизированный элемент S). Установлен синергетический эффект между удобрениями N и S, что свидетельствует о взаимодействии между метаболизмом обоих элементов. Кроме того, одновременное внесение азотных и серных удобрений может улучшить качество пшеничного теста без изменения урожайности зерна.

А в работе [17] были проведены полевые эксперименты с внесением в почву и некорневой обработкой с четырехкратной повторностью и восьмью различными обработками комбинаций азота и серы, распределенных по участкам на разных стадиях роста. Результаты показали, что самое высокое содержание глютена (28,35%) было зарегистрировано, когда урожай пшеницы был удобрен пяти кратной обработкой, включающей в себя сочетание почвенной и листовой обработки по сравнению с контрольной обработкой, которая приводила к низкому содержанию клейковины, низкому стандартному проценту энергии прорастания и минимальному значению всхожести. Авторы работы [18] провели изучение влияния внекорневой и почвенной подкормки чистой серой (0, 5, 10, 15, 20, 25 и 30 ppm) на веге-

тативный рост, урожайность и фотосинтез пигменты в листьях пшеницы. Результаты показали, что вегетативный рост и урожайность параметры (количество побегов/растение, количество листьев/растение, площадь флагового листа/растение, количество колос/растение, масса колоса, количество зерен, масса зерна и сухая масса побегов) были увеличены значимо при концентрации 15 и 20 ppm серы по сравнению с контрольными растениями. Применение серы для листьев и почвы значительно увеличило содержание хлорофилла a, хлорофилла b, общего хлорофилла в листьях и содержания азота и белка в семенах с увеличением концентрация серы.

В работе [11] с препаратом [2] переданным нами для исследований, проведены исследования на урожайность и некоторые свойства растений мягкой пшеницы в течение зимнего вегетационного периода 2016-2017 гг. в районе Испарта, Турция. Были исследованы пять различных видов обработки: контроль, внесение в почву, предпосевная обработка семян, покрытие семян + нанесение на стадии выхода в трубку и покрытие семян + нанесение на стадии колошения. Применение наночастиц серы к мягкой пшенице оказало положительное влияние на все изученные признаки (скорость появления всходов, среднее время появления всходов, высота растения, длина колосья, количество зерен в колосе, выход зерна, содержание белка). Средние значения изучаемых признаков варьировали по коэффициенту всхожести 75,0-100,0%, средним срокам появления всходов 2,35-2,83 дня, высоте растений 68,7-73,7 см, длине колоса 8,37-9,92 см, числу зерен в колосе 35,55-39,50, урожайности зерна 3431-3911 кг/га⁻¹, соотношению белков 13,29-14,57%.

Результаты работ [11, 17, 18, 21] указывают на исключительную эффективность некорневой обработки пшеницы, обработка таким способом положительно влияет на большинство важных характеристик (урожайность, содержание белка, содержание хлорофилла). Наиболее близким к данной работе являются результаты [11], в которой авторы провели детальное исследование препарата и получили положительное влияние на все изученные признаки. Интересно сравнить результаты, так как много общего в этих работах: один и тот же препарат (на основе полисульфида кальция) и использование предпосевной обработки семян и некорневой обработки. Различие лишь в сроках некорневой обработки. Авторы [11] использовали протравленные семена для некорневой обработки препаратом во время выхода в трубку, а также использовали протравленные семена для листовой обработки препаратом во время колошения. А в нашей работе мы использовали вариант с протравленными семенами, с некорневой

обработкой препаратом в фазе молочной спелости и вариант с листовой обработкой во время восковой спелости.

Если взять за 100% данные полученные для контрольных образцов, то по сравнению с ними в результате применения препарата путем протравливания семян урожайность увеличилась на 9,8%, в результате применения препарата на стадии восковой спелости на 13,7%, а применение его на стадии молочной спелости на 18,1 (см. табл. 3). Масса 1000 зёрен в результате протравливания семян увеличилась на 5,04%, в результате обработки на стадии восковой спелости на 8,5%, а на стадии молочной спелости на 10,7%. По сравнению с контрольным образцом в результате применения препарата содержание белка в случае протравливания семян на 3,8%, в случае обработки на стадии восковой спелости на 7,4%, а применение его на стадии молочной спелости на 8,8%. Таким образом, по всем основным показателям наблюдается существенное улучшение параметров, и это говорит о том, что препарат на основе полисульфида кальция благотворно влияет на пшеницу. Таким образом, максимальное возрастание показателей произошло в результате обработки пшеницы в фазе молочной спелости.

Таблица 3.

**Увеличение технологических качеств зерна яровой пшеницы
в результате обработки препаратом**

Параметры	протравливание семян, %	восковая спелость, %	молочная спелость, %
Масса 1000 зёрен, г	5,04	8,5	10,7
Выход зерна, ц/га	9,8	13,7	18,1
Содержание белка, %	3,8	7,4	8,8

Можно непосредственно сравнить наши результаты по урожайности и содержанию белка с данными работы [11] для случая протравливания семян, в этом случае по сравнению с контрольными результатами урожайность в нашей работе увеличилась на 9,8%, а в работе [11] на 3,8% (см. табл.4). По сравнению с контрольными результатами содержание белка в результате протравливания семян в нашей работе увеличилась 3,8%, а в работе [11] на 5,3%. В результате листовой обработки в фазе молочной спелости и в фазе восковой спелости результаты урожайности увеличилась на 18,1% и 13,7%, а в результате комбинированного воздействия (протравливание семян + листовая обработка в фазе выхода в труб-

ку) урожайность увеличилась на 14% и в результате комбинированного воздействия (протравливание семян + листовая обработка в фазе колошения) урожайность увеличилась на 12%. Близкие результаты относительно увеличения содержания белка наблюдаются для наших результатов и для результатов [11].

Таблица 4.

Улучшение результатов применения препарата на основе полисульфида кальция данной работы и [11] на разных фазах

Параметры	1 протравливание семян, данная работа	2 протравливание семян, [11]	3 листовая обработка в фазе восковой спелости, данная работа	4 протравливание семян + листовая обработка в фазе выхода в трубку, [11]	5 листовая обработка в фазе молочной спелости, данная работа	6 протравливание семян + листовая обработка в фазе колошения, [11]
Урожайность зерна, %	9,8	3,7	13,7	14	18,1	12,0
Содержание белка, %	3,8	5,3	7,4	7,5	8,8	7,5

Выводы

На основании полученных данных действия препарата на основе полисульфида кальция для подкормки пшеницы сорта «Экада 70» можем заключить следующее:

1. Испытания в лабораторных и полевых условиях показывают, что обработка мягкой пшеницы препаратом на основе полисульфида кальция оказывает положительное воздействие на все основные характеристики, начиная с всхожести и количества продуктивных стеблей и завершая урожайностью и содержанием белка.
2. Успех препарата на основе полисульфида кальция обеспечивает формирование сферически симметричных наночастиц серы со средним размером 20 нм, которые равномерно распределяются по поверхности растений и усваиваются ими.
3. Предпосевная обработка семян показывает высокую эффективность, увеличение урожайности 9,8% и по содержанию белка 3,8% по сравнению с контрольными результатами.
4. Испытания в лабораторных и полевых условиях показала, что обработка зерен пшеницы при определенных концентрациях (15-20 ppm) препарата оказывает положительное воздействие – ускоряет на 70-100% рост побегов и корешков.

5. Самым эффективным является обработка в фазе молочной спелости, она показала увеличение с 18,8 ц/га до 21,5 ц/га, а содержание белка в зерне с 13,5% до 14,70%. Увеличение также наблюдалось при обработке в фазе восковой спелости с 18,8 ц/га до 20,7 ц/га.
6. Изучение биологических свойств наночастиц серы по отношению к пшенице показало на присутствие у нее свойств, позволяющих ускорять рост растений и увеличивать урожайность и содержание белка в зерне пшеницы. Положительные результаты получены для сортов пшеницы произрастающих в разных климатических зонах (Россия и Турция), этот факт свидетельствует об универсальности препарата и способа листовой обработки.
7. На основе полученных результатов создан препарат «Сульфитек-А-ГРО», который прошел государственную регистрацию и получил свидетельство №3691 от 20 мая 2022 года, информация на сайте: <http://sulfitech.com>

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания «Разработка современных технологий, цифровых методов анализа и моделей, предназначенных для работы с большими объемами разрозненной биохимической, химической и технической информации с учетом и без учета влияния внешних условий» (FZWU-2023-0002), Регистрационный номер: 1022033100240-2-1.7.1».

Список литературы

1. Лебедев С.И. Физиология растений. 3-е изд. М.: Агропромиздат, 1988. 544 с.
2. Массалимов И.А., Гайфулин Р.Р. Удобрение, содержащее высокодисперсную серу и способ обработки ею пшеницы // Евразийский патент №028406, 30.11.2017, бюл. № 5.
3. Массалимов И.А., Хусаинов А.Н., Зайнитдинова Р.М., Мусавирова Л.Р., Зарипова Л.Р., Мустафин А.Г. Химическое осаждение наночастиц серы // Журнал прикладной химии. 2014. № 6(87). С. 705-713.
4. Массалимов И.А., Шайнурова А.Р., Хусаинов А.Н., Мустафин А.Г. Получение наночастиц серы из водного раствора полисульфида калия // Журнал прикладной химии. 2012. № 12(85). С. 1944-1949.

5. Федяев В.В., Фархутдинов Р.Г., Массалимов И.А., Цветков В.О., Ишмухаметов А.А., Ярмухаметова И.А., Латыпов Р.Н., Ямалеева А.А. Влияние полисульфида кальция на морфометрические и физиолого-биохимические процессы растений пшеницы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. № 2(25). С. 55-62. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-2-55-62>
6. Шириев В.М., Аминова А.Л., Сахибгареев А.А., Давлетов Ф.А., Акчуринов Р.Л., Гайнуллина К.П., Жемякин С.В. и др. Рекомендации по проведению весенне-полевых работ в Республике Башкортостан: методические указания. Уфа: Мир печати, 2017. 56 с.
7. Ercoli L., Lulli L., Arduini I., Mariotti M., Masoni A. Durum wheat grain yield and quality as affected by S rate under Mediterranean conditions // European Journal of Agronomy. 2011. Vol. 35. P. 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.03.007>
8. Fageria N., Filho M., Moreira A., Guimarães C. Foliar Fertilization of Crop Plants // Journal of Plant Nutrition., 2009. Vol. 32, no. 6. P. 1044-1064. <https://doi.org/10.1080/01904160902872826>
9. Gallejones P., Castellon A., Del Prado A., Unamunzaga O., Aizpurua A. Nitrogen and sulphur fertilization effect on leaching losses, nutrient balance and plant quality in a wheat-rapeseed rotation under a humid Mediterranean climate // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2012. Vol. 93. P. 337-355. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9520-2>
10. Hawkesford M.J. Sulfate uptake and assimilation – whole plant regulation // Proceedings of the International Plant Sulfur Workshop. 2012. Vol. 1. P. 11–24. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4450-9_2
11. Kaya M., Karaman R., Aykut Ş. Effects of nano sulfur (s) applications on yield and some yield properties of bread wheat // Scientific Papers. Series A. Agronomy. 2018. Vol. LXI, no. 1.
12. Klikocka H., Cybulska M., Barczak B., Narolski B., Szostak B., Kobińska A., Nowak A., Wójcik E. The effect of sulphur and nitrogen fertilization on grain yield and technological quality of spring wheat // Plant Soil and Environment. 2016. Vol. 62, no. 5. P. 230–236. <https://doi.org/10.17221/18/2016-PSE>
13. Lakkineni K.C., Ahmad A., Abrol Y.P. Sulphur in Plants January. Springer, 2003. 398 p. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0289-8_14
14. Massalimov I., Medvedev Yu., Urakaev F., Ahmed I.S.A., Burkitbayev M., Uralbekov B. Antifungal activity of inorganic micro- and nanoparticles against pathogenic Fungi compared with some traditional organic drugs // American-Eurasian Journal of Agricultural & Environment Sciences. 2016. Vol. 16, no. 4. P. 652-662. <https://doi.org/10.5829/idosi.ajeaes.2016.16.4.12902>

15. Rahman I., Afzal A., Iqbal Z., Manan S. Application of Plant Mineral Nutrients on Wheat: A Review // *Research and Reviews: Journal of Agriculture and Allied Sciences*. 2014. Vol. 3, no. 2. P. 19-22.
16. Randall P., Spencer K., Freney J. Sulfur and nitrogen fertilizer effects on sulfur ratio in grain, in relation to the yield response // *Australian Journal of Agricultural Research*. 1981. Vol. 32, no. 2. P. 203-212. <https://doi.org/10.1071/AR9810203>
17. Saeed A., Gul H. Physio-chemical Qualities of Wheat Varieties as Influenced by Nitrogen and Sulfur Fertilization // *Pakistan Journal of Nutrition*. 2011. Vol. 10, no. 11. P. 1076-1082.
18. Salih Z., Mohammad, M., Sabir T. Effect of Foliar and soil Application of sulfur on Growth, Yield, and Photosynthetic Pigments of the Wheat plant // *Journal of Raparin University*. 2016. Vol. 3, no. 6. <https://www.researchgate.net/publication/324263263>
19. Salvagiotti F., Castellarín J.M., Miralles D.J., Pedrol H.M. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake // *Field Crops Research*. 2009. Vol. 113. P. 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.05.003>
20. Salvagiotti F., Miralles D.J. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat // *European Journal of Agronomy*. 2008. Vol. 28. P. 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.08.002>
21. Tea I., Genter T., Nault N., Lummerzheim M., Kleiber D. Interaction between nitrogen and sulfur by foliar application and its effects on flour bread-making quality // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2007. Vol. 87. P. 2853-2859. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3044>
22. Withers P. J., Tytherleigh A.R.J., O'Donnell F.M. Effect of sulphur fertilizers on the grain yield and sulphur content of cereals // *The Journal of Agricultural Science*. 1995. Vol. 125, no. 3. P. 317–324. <https://doi.org/10.1017/S0021859600084811>
23. Yu Z., She M., Zheng T., Diepeveen D., Islam S., Zhao Yu., Zhang Y., Tang G., Zhang Yu., Zhang J., Blanchard C. L., Ma W. Impact and mechanism of sulphur-deficiency on modern wheat farming nitrogen-related sustainability and gliadin content // *Communications Biology*. 2021. Vol. 4. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02458-7>
24. Zhao F.J., Hawkesford M.J., McGrath S.P. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat // *Journal of Cereal Science*. 1999. Vol. 30, no. 1. P. 19-31. <https://doi.org/10.1006/JCRS.1998.0241>

References

1. Lebedev S.I. *Fiziologiya rasteniy* [Plant Physiology]. Moscow: Agropromizdat, 1988, 544 p.
2. Massalimov I.A., Gayfulin R.R. *Udobrenie, soderzhashchee vysokodispersnyuyu seru i sposob obrabotki eyu pshenitsy* [Fertiliser and method of wheat treatment with this fertiliser]. Eurasian patent №028406, 30.11.2017, bull. 5.
3. Massalimov I.A., Khusainov A.N., Zaynitdinova R.M., Musavirova L.R., Zari-pova L.R., Mustafin A.G. Khimicheskoe osazhdenie nanochastits sery [Chemical precipitation of sulfur nanoparticles from aqueous solutions]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2014, no. 6(87), pp. 705-713.
4. Massalimov I.A., Shaynurova A.R., Khusainov A.N., Mustafin A.G. Poluche-nie nanochastits sery iz vodnogo rastvora polisul'fida kaliya [Production of sulfur nanoparticles from aqueous solution of potassium polysulfide]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2012, no. 12(85), pp. 1944-1949.
5. Fedyaev V.V., Farkhutdinov R.G., Massalimov I.A., Tsvetkov V.O., Ishmukha-metov A.A., Yarmukhametova I.A., Latypov R.N., Yamaleeva A.A. Vliyanie polisul'fida kal'tsiya na morfometricheskie i fiziologo-biokhimicheskie protsessy rasteniy pshenitsy [Effects of calcium polysulphide on morphometric, physiological and biochemical processes in wheat]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2018, vol. 8, no. 2(25), pp. 55-62. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-2-55-62>
6. Shiriev V.M., Aminova A.L., Sakhigareev A.A., Davletov F.A., Akchurin R.L., Gaynullina K.P., Zhemyakin S.V. et al. *Rekomendatsii po provedeniyu vesenne-polevykh rabot v Respublike Bashkortostan* [Recommendations for conducting spring field work in the Republic of Bashkortostan]. Ufa: Mir pechati, 2017, 6 p.
7. Ercoli L., Lulli L., Arduini I., Mariotti M., Masoni A. Durum wheat grain yield and quality as affected by S rate under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 2011, vol. 35, pp. 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.03.007>
8. Fageria N., Filho M., Moreira A., Guimarães C. Foliar Fertilization of Crop Plants. *Journal of Plant Nutrition*, 2009, vol. 32, no. 6, pp. 1044-1064. <https://doi.org/10.1080/01904160902872826>
9. Gallejones P., Castellon A., Del Prado A., Unamunzaga O., Aizpurua A. Ni-trogen and sulphur fertilization effect on leaching losses, nutrient balance and plant quality in a wheat-rapeseed rotation under a humid Mediterranean climate. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, vol. 93, pp. 337-355. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9520-2>

10. Hawkesford M.J. Sulfate uptake and assimilation – whole plant regulation. *Proceedings of the International Plant Sulfur Workshop*, 2012, vol. 1, pp. 11-24. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4450-9_2
11. Kaya M., Karaman R., Aykut Ş. Effects of nano sulfur (s) applications on yield and some yield properties of bread wheat. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 2018. Vol. LXI, no. 1.
12. Klikocka H., Cybulska M., Barczak B., Narolski B., Szostak B., Kobiałka A., Nowak A., Wójcik E. The effect of sulphur and nitrogen fertilization on grain yield and technological quality of spring wheat. *Plant Soil Environ*, 2016, vol. 62, no. 5, pp. 230-236. <https://doi.org/10.17221/18/2016-PSE>
13. Lakkineni K.C., Ahmad A., Abrol Y.P. *Sulphur in Plants January*. Springer. 2003, 398 p. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0289-8_14
14. Massalimov I., Medvedev Yu., Urakaev F., Ahmed I.S.A., Burkitbayev M., Ur-albekov B. Antifungal activity of inorganic micro-and nanoparticles against pathogenic Fungi compared with some traditional organic drugs. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environment Sciences*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 652-662. <https://doi.org/10.5829/idosi.ajeaes.2016.16.4.12902>
15. Rahman I., Afzal A., Iqbal Z., Manan S. Application of Plant Mineral Nutrients on Wheat: A Review. *Research and Reviews: Journal of Agriculture and Allied Sciences*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 19-22.
16. Randall P., Spencer K., Freney J. Sulfur and nitrogen fertilizer effects on sulfur ratio in grain, in relation to the yield response. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1981, vol. 32, no. 2, pp. 203–212. <https://doi.org/10.1071/AR9810203>
17. Saeed A., Gul H. Physio-chemical Qualities of Wheat Varieties as Influenced by Nitrogen and Sulfur Fertilization. *Pakistan Journal of Nutrition*, 2011, vol. 10, no. 11, pp. 1076-1082.
18. Salih Z., Mohammad M., Sabir, T. Effect of Foliar and soil Application of sulfur on Growth, Yield, and Photosynthetic Pigments of the Wheat plant. *Journal of Raparin University*, 2016, vol. 3, no. 6.
19. Salvagiotti F., Castellarin J.M., Miralles D.J., Pedrol H.M. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research*, 2009, vol. 113, pp. 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.05.003>
20. Salvagiotti F., Miralles D.J. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy*, 2008, vol. 28, pp. 282-290. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.08.002>

21. Tea I., Genter T., Naulet N., Lummerzheim M., Kleiber D. Interaction between nitrogen and sulfur by foliar application and its effects on flour bread-making quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, vol. 87, pp. 2853–2859. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3044>
22. Withers P. J., Tytherleigh A.R.J., O'Donnell F.M. Effect of sulphur fertilizers on the grain yield and sulphur content of cereals. *The Journal of Agricultural Science*, 1995, vol. 125, no. 3, pp. 317–324. <https://doi.org/10.1017/S0021859600084811>
23. Yu Z., She M., Zheng T, Diepeveen D., Islam S., Zhao Yu., Zhang Y., Tang G., Zhang Yu., Zhang J., Blanchard C. L., Ma W. Impact and mechanism of sulphur-deficiency on modern wheat farming nitrogen-related sustainability and gliadin content. *Communications Biology*, 2021, vol. 4. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02458-7>
24. Zhao F.J., Hawkesford M.J., McGrath S.P. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. *Journal of Cereal Science*, 1999, vol. 30, no. 1, pp. 19–31. <https://doi.org/10.1006/JCRS.1998.0241>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Массалимов Исмаил Александрович, профессор, доктор технических наук
Уфимский университет науки и технологий
ул. Заки Валиди, 32, г. Уфа, 450076, Российская Федерация
ismail_mass@mail.ru

Шакирзянов Анвар Хафизович, доктор сельскохозяйственных наук, директор
Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства УФИЦ РАН
ул. Рихарда Зорге, 19, г. Уфа, 450059, Российская Федерация

Массалимов Бурхан Исмаилович, младший научный сотрудник
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН
Ленинский пр-т, 53, г. Москва, 119333, Российская Федерация
Burkhan.massalimov@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Ismail A. Massalimov, Professor, Doctor of Technical Sciences
Ufa University of Science and Technology

32, Zaki Validi Str., Ufa, 450076, Russian Federation
ismail_mass@mail.ru

Anvar Kh. Shakirzyanov, Director, doctor of agricultural sciences
Bashkir Scientific Research Institute of Agriculture UFRC RAS
19, Rikharda Zorge Str., Ufa, 450059, Russian Federation

Burkhan I. Massalimov, Junior Researcher
The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
53, Leninskiy Ave., Moscow, 119333, Russian Federation
Burkhan.massalimov@gmail.com
Researcher ID: H-6536-2016

Поступила 27.06.2023

После рецензирования 19.07.2023

Принята 25.07.2023

Received 27.06.2023

Revised 19.07.2023

Accepted 25.07.2023