

*«Широко распространяет химия руки свои в дела человеческие... Куда ни посмотрим, куда ни оглянемся, везде обращаются перед очами нашими успехи ее прилежания»
М.В. Ломоносов*

Журнал входит в базу данных российских научных журналов Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science (WoS), включен в международные базы данных Chemical Abstracts (CAS (pt)), Agricultural Research Information System (AGRIS), Crossref, Google Scholar и Research Bible.

СОДЕРЖАНИЕ УДОБРЕНИЕ И УРОЖАЙ

- Погодина А.В., Лукманов А.А., Сафиоллин Ф.Н.** Влияние минеральных удобрений и биопрепаратов на формирование площади листьев, продуктивность фотосинтеза и урожайность полбы.....3
- Иудин В.А., Бортник Т.Ю.** Эффективность микробиологических удобрений Азотовит и Фосфатовит при выращивании картофеля в условиях Удмуртской республики.....8
- Гаспарян И.Н., Козлов И.Г., Гаспарян В.Ш.** Применение кремниевого удобрения в технологии возделывания двух урожаев картофеля.....13
- Почтенная А.И., Пашкевич Е.Б.** Влияние комплексных удобрений пролонгированного действия и фолиарной обработки Лигногуматом на агрохимические свойства почвогрунта при выращивании черной смородины.....16
- Гаевая Э.А., Безуголова О.С.** Эффективность внесения удобрений под озимую пшеницу в степной зоне Ростовской области.....23

СВОЙСТВА ПОЧВ

- Терехова Н.А., Галактионова Л.В., Бурцева Т.И.** Изменение агрохимических свойств почв в условиях загрязнения цинком...27
- Николаева А.А., Кляйн О.И., Чернышева М.Г., Салимгареева О.А., Филиппова О.И., Лысак Л.В., Хуснетдинова Т.И., Куликова Н.А.** Оценка праймирующих и обеззараживающих свойств наночастиц серебра по отношению к семенам пшеницы.....33

ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

- Лаптев А.Б., Мальцев В.К.** Дegrаdация действующих веществ инсектицидов при защите посевов рапса.....41
- Наумова Н.И., Лысов А.К., Корнилов Т.В.** Поиск путей повышения эффективности биопрепаратов в условиях полевых обработок картофеля.....47
- Гальперина А.Р., Сопрунова О.Б., Бареева А.Ш.** Роль ризосферных энтеробактерий в адаптации растений к пестицидному стрессу.....54

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

- Миронова О.А., Амерханов Х.А., Киричук А.А., Кармазин А.П.** Влияние продолжительности твердофазной микробиологической ферментации на динамику микотоксинов.....60
- Зайцев С.Ю., Макиевский А.В.** Методы исследования антиоксидантной активности биологических жидкостей.....65

РАБОТЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

- Лебедева А.Е.** Оценка ферментативной активности почв в различных звеньях севооборотов.....70
- Борисычев И.А.** Основные направления совершенствования методики мониторинга почв и их использование в современных условиях.....75
- Гвоздь В.К.** Экологическое исследование влияния физико-химических показателей почвы на рост сеяных газонов при применении перлита и минеральных удобрений.....80
- Янгирова Л.Я.** Влияние нефтяного загрязнения почвы на показатели жизнедеятельности некоторых растений.....83
- Безруких А.М.** Эффективность новых видов обогащенных удобрений и их влияние на агрохимические свойства почвы...89
- Годзишевская А.А.** Рт- и Рd-содержащие хитозан-желатиновые пленки: физико-химические свойства, биологическая активность и способность к биодegrаdации.....93
- Манакова Ю.С.** Оценка возможности использования кофейного жмыха в качестве субстрата для выращивания сельскохозяйственных культур.....98

Главный редактор: И.С. Прохоров, к.с.-х.н.

Редакция: И.И. Прохорова (директор), М.В. Царева, к.с.-х.н., С.Г. Царева

Редколлегия: Л.С. Бакуменко, к.э.н., С.Л. Белопухов, д.с.-х.н., к.х.н., Н.М. Белоус, д.с.-х.н., И.И. Дмитриевская, д.с.-х.н., Л.А. Дорожкина, д.с.-х.н., А.А. Завалин, д.с.-х.н., С.Ю. Зайцев, д.б.н., д.х.н., А.Л. Иванов, д.б.н., Л.В. Кирейчева, д.т.н., И.А. Коленченко, к.э.н., А.В. Кураков, д.б.н., А.В. Леднев, д.с.-х.н., С.В. Лукин, д.с.-х.н., С.М. Лукин, д.б.н., А.А. Лукманов, д.с.-х.н., М.Г. Мустафаев, д.с.-х.н. (Азербайджан), С.М. Надежкин, д.б.н., М.М. Овчаренко, д.с.-х.н., к.х.н., А.В. Пасынков, д.б.н., Т.Ф. Персикова, д.с.-х.н. (Беларусь), А.А. Плотников, к.с.-х.н., О.А. Подколзин, д.с.-х.н., Т.Р. Рыспеков (Казахстан), к.с.-х.н., Н.И. Санжарова, д.б.н., В.М. Семенов, д.б.н., В.И. Титова, д.с.-х.н., П.А. Чекмарев, д.с.-х.н., О.Х. Эргашева, к.б.н. (Узбекистан)

Адрес для переписки: 115419, г. Москва, ул. Шаболовка, 65-1-50. **Моб.:** +7-965-183-20-79, **Тел/факс:** +7-495-952-76-25

www.agrochemv.ru e-mail: agrochem_herald@mail.ru

Отпечатано в ООО «САМ Полиграфист», г. Москва, 109316, Волгоградский пр-т, д. 42, корп. 5

Подписано в печать 16.04.2024 г. Печать цифровая. Формат 60x90/8. Заказ 49477.

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации Российской Федерации 29 апреля 1997 г. № 011095.

«Chemistry of their hands to human affairs is widely spread... Wherever we look,
wherever we look back, our success in diligence is appealing to our eyes»

M.V. Lomonosov

Journal indexed in Russian Science Citation Index (RSCI – Russian platform of Web of Science), International Chemical Journals Database Chemical Abstracts (CAS (pt)), Agricultural Research Information System (AGRIS), Crossref, Google Scholar and Research Bible.

CONTENTS

FERTILIZER AND HARVEST

- Pogodina A.V., Lukmanov A.A., Safiullin F.N.* Influence of mineral fertilizers and biopreparations on formation of leaf area, photosynthesis productivity and yield of spelt.....3
- Iudin V.A., Bortnik T.Yu.* Efficiency of microbiological fertilizers Azotovit and Phosphatovit for potato cultivation in the Udmurt republic.....8
- Gasparyan I.N., Kozlov I.G., Gasparyan V.Sh.* Application of silicon fertilizer in technology of cultivation of two harvests of potato crops.....13
- Pochtennaia A.I., Pashkevich E.B.* Impact of complex slow-release fertilizers and foliar treatment with lignohumate on agrochemical properties of soil and yield of black currant.....16
- Gaevaya E.A., Bezuglova O.S.* Efficiency of fertilizer application for winter wheat in steppe zone of the Rostov region.....23

SOIL PROPERTIES

- Terekhova N.A., Galaktionova L.V., Burtseva T.I.* Changes in agrochemical properties of soils under conditions of zinc pollution.....27
- Nikolaeva A.A., Klein O.I., Chernysheva M.G., Salimgareeva O.A., Filippova O.I., Lysak L.V., Khusnetdinova T.I., Kulikova N.A.* Evaluation of priming and disinfecting activities of silver nanoparticles in relation to wheat seeds.....33

PLANT PROTECTION

- Laptiev A.B., Maltsev V.K.* Degradation of active substances of insecticides in protection of rapeseed.....41
- Naumova N.I., Lysov A.K., Kornilov T.V.* Finding ways to improve efficiency of biopreparations in conditions of field potato treatments.....47
- Galperina A.R., Soprunova O.B., Bareeva A.Sh.* Role of rhizosphere enterobacteria in plant adaptation to pesticide stress.....54

EXPERIMENTAL RESEARCHES

- Mironova O.A., Amerkhanov Kh.A., Kirichuk A.A., Karmazin A.P.* Influence of duration of solid-phase microbiological fermentation on mycotoxin dynamics.....60
- Zaitsev S.Yu., Makievski A.V.* Methods for studying the antioxidant activity in biological fluids.....65

YOUNG SCIENTISTS RESEARCH

- Lebedeva A.E.* Estimation of enzymatic soil activity in different crop rotation links.....70
- Borisychev I.A.* Main directions of improving of soil monitoring measures and its application in modern conditions.....75
- Gvozd V.K.* Ecological research of physical-chemical soil parameters influence on growth seeded lawns when using perlite and mineral fertilizers.....80
- Yangirova L.Ya.* Influence of oil pollution of soil on vital activities of some plants.....83
- Bezrukih A.M.* Efficiency of new types of enriched fertilizers and their impact on agrochemical properties of soil.....89
- Godzishvskaya A.A.* Pt- and Pd-containing chitosan-gelatin films: physicochemical properties, biological activity and biodegradation ability.....93
- Manakova Yu.S.* Assessment of the possibility of using coffee cake as a substrate for growing crops.....98

Editor-in-chief: Ph.D. I.S. Prokhorov

Editorial office: I.I. Prokhorova (director), Ph.D. M.V. Tsareva, S.G. Tsareva

Editorial board: Ph.D. L.S. Bakumenko, Dr.Sci. S.L. Belopukhov, Dr.Sci. N.M. Belous, Dr.Sci. T.Yu. Bortnik, Dr.Sci. I.I. Dmitrevskaya, Dr.Sci. L.A. Dorozhkina, Dr.Sci. A.A. Zavalin, Dr.Sci. S.Yu. Zaitsev, Dr.Sci. A.L. Ivanov, Dr.Sci. L.V. Kireycheva, Ph.D. I.A. Kolenchenko, Dr.Sci. A.V. Kurakov, Dr.Sci. A.V. Lednev, Dr.Sci. S.V. Lukin, Dr.Sci. S.M. Lukin, Dr.Sci. A.A. Lukmanov, Dr.Sci. M.G. Mustafaev (Azerbaijan), Dr.Sci. S.M. Nadezhkin, Dr.Sci. M.M. Ovcharenko, Dr.Sci. A.V. Pasynkov, Dr.Sci. T.F. Persikova (Belarus), Ph.D. A.A. Plotnikov, Corr.-member, Dr.Sci. O.A. Podkolzin, Dr.Sci. T.R. Ryspekov (Kazakhstan), Dr.Sci. N.I. Sanzharova, Dr.Sci. V.M. Semenov, Dr.Sci. V.I. Titova, Dr.Sci. P.A. Chekmarev, Ph.D. O.Kh. Ergasheva (Uzbekistan)

Post address: 65-1-50, Shabolovka st., Moscow, 115419, Russian Federation. **Cell:** +7-965-183-20-79, **Tel/fax:** +7-495-952-76-25

www.agrochemv.ru e-mail: agrochem_herald@mail.ru

Printed by «SAM Poligrafist» Ltd., 5-42, Volgograd prospect, Moscow, 109316

Signed for printing 16 of April 2025. Digital printing. Format 60x90/8. Order 49477.

Journal registered by Ministry for Press and Information of the Russian Federation 29 April of 1997 № 011095

Journal has been publishing since June of 1929 (prev. titles «Harvest and Fertilizer» («Udobrenie i Urozhay»),

«Chemization of Socialistic Agriculture» («Khimizatsiya socialisticheskogo zemledeliya»),

«Chemistry in Agriculture» («Khimiya v sel'skom khozyaistve»), «Chemization of Agriculture» («Khimizatsiya sel'skogo khozyaistva»))

ОЦЕНКА ПРАЙМИРУЮЩИХ И ОБЕЗЗАРАЖИВАЮЩИХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ПО ОТНОШЕНИЮ К СЕМЕНАМ ПШЕНИЦЫ

¹А.А. Николаева, ²О.И. Кляйн, к.б.н., ¹М.Г. Чернышева, д.х.н., ¹О.А. Салимгареева, к.б.н.,
¹О.И. Филиппова, ¹Л.В. Лысак, д.б.н., ¹Т.И. Хуснетдинова, к.б.н., ¹Н.А. Куликова, д.б.н.

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
e-mail: nikolaeva.gbs@gmail.ru, chernyshevamg@my.msu.com, salimgareevaoa@my.msu.ru,
philolga@mail.ru, lvlysak@mail.ru, tamara_iul@mail.ru, kulikova-msu@yandex.ru

²ФИЦ «Основы биотехнологии» РАН, e-mail: klein_olga@list.ru

Представлены результаты оптимизации условий праймирования семян пшеницы наночастицами серебра, стабилизированными карбоксиметилцеллюлозой (AgНЧ-КМЦ), а также оценка обеззараживающих свойств наночастиц в этих условиях. По данным просвечивающей электронной микроскопии AgНЧ-КМЦ имели близкую к сферической форму; гидродинамический радиус и ζ -потенциал соответственно $4,5 \pm 0,4$ нм и $45,65 \pm 2,91$ мВ, определенные методом динамического светорассеивания. С использованием трехфакторного трехуровневого дизайна Бокса-Бенкена наибольший эффект от праймирования может быть достигнут при концентрации AgНЧ-КМЦ 50 мг/л и замачивании семян в суспензии наночастиц в течение 14 ч. при температуре 16°C. Праймированные в этих условиях семена мягкой озимой пшеницы обладали улучшенными ростовыми характеристиками в оптимальных условиях прорастания и в условиях водного дефицита в лабораторных условиях; в полевых условиях была показана лучшая перезимовка всходов из обработанных семян. С использованием сканирующей электронной микроскопии было установлено, что AgНЧ-КМЦ не проникают в семена, а осаждаются локально на их поверхности. Оценка дезинфицирующих свойств показала, что AgНЧ-КМЦ характеризуются свойствами контактного бактерицидного протравителя, обладающего эффективностью при обработке им семян путем проведения мокрого протравливания. Сделан вывод о перспективности дальнейшего исследования AgНЧ-КМЦ в условиях полевых многолетних опытов.

Ключевые слова: озимая пшеница, наночастицы, обработка семян, карбоксиметилцеллюлоза, оптимизация обработки семян, электронная микроскопия.

EVALUATION OF PRIMING AND DISINFECTING ACTIVITIES OF SILVER NANOPARTICLES IN RELATION TO WHEAT SEEDS

¹A.A. Nikolaeva, ²Ph.D. O.I. Klein, ¹Dr.Sci. M.G. Chernysheva, ¹Ph.D. O.A. Salimgareeva,
¹O.I. Filippova, ¹Dr.Sci. L.V. Lysak, ¹Ph.D. T.I. Khusnetdinova, ¹Dr.Sci. N.A. Kulikova

¹Lomonosov Moscow State University, e-mail: nikolaeva.gbs@gmail.ru, chernyshevamg@my.msu.com,
salimgareevaoa@my.msu.ru, philolga@mail.ru, lvlysak@mail.ru, tamara_iul@mail.ru, kulikova-msu@yandex.ru

²Research Center of Biotechnology of the RAS, e-mail: klein_olga@list.ru

The results of optimizing the conditions for priming wheat seeds with silver nanoparticles stabilized with carboxymethylcellulose (AgNP-CMC) are presented, as well as an evaluation of the disinfection properties of nanoparticles under these conditions. According to transmission electron microscopy data, the AgNP-CMC had a shape close to spherical; the hydrodynamic radius and ζ -potential determined by the dynamic light scattering method were 4.5 ± 0.4 nm and 45.7 ± 2.9 mV, respectively. Using a three-factor three-level Box-Benken design, the greatest effect of priming was found can be achieved at AgNP-CMC concentration of 50 mg/l and soaking seeds in a suspension of nanoparticles for 14 hours at a temperature of 16°C. Common winter wheat seeds primed under these conditions had improved growth characteristics under optimal germination conditions and under conditions of water deficiency in laboratory conditions; in the field, the best overwintering of seedlings from treated seeds was shown. Using scanning electron microscopy, it was found that AgNP-CMC does not penetrate the seeds, but are deposited locally on their surface. An assessment of the disinfecting properties showed that AgNP-CMC are characterized by the properties of a contact bactericidal disinfectant, which is effective in treating seeds by wet treatment followed by drying. The conclusion is made about the prospects for further research of the AgNP-CMC in the conditions of long-term field experiments.

Keywords: winter wheat, nanoparticles, seed treatment, carboxymethylcellulose, optimization of seed treatment, electron microscopy.

Чтобы полностью удовлетворить потребности населения в пище, по некоторым подсчетам, производство сельскохозяйственных культур должно быть увеличено на 25-70% [1, 2]. Один из способов повышения урожайности – улучшение ростовых качеств семян, например, с помощью праймирования – прием предпосевной обработки семян, заключающийся в их замачивании с последующим высушиванием [3-5].

Считается, что при праймировании уменьшается период прорастания семян, увеличивается дружность появления всходов и устойчивость проростков к стрессовым условиям [6, 7]. Праймирование также улучшает всхожесть старых семян [8].

В качестве праймирующих растворов преимущественно используют воду (гидропраймирование), растворы солей с низким водным потенциалом (осмопраймирование) и суспензии наночастиц (нанопраймирование), в том числе, суспензии наночастиц серебра (AgНЧ) [4, 5]. Влияние праймирования AgНЧ ранее было изучено на семенах пшеницы, ячменя, кукурузы, арбуза, цуккини и других сельскохозяйственных культур [9, 10]. Положительный эффект праймирования AgНЧ выражался в увеличении всхожести семян, более быстром росте проростков, увеличении содержания в них хлорофилла и антиоксидантных ферментов. В отличие от большинства праймирующих агентов AgНЧ не только способствуют развитию растений [11, 12], но также могут выступать в качестве обеззараживающих средств благодаря своим дезинфицирующим свойствам [13, 14]. Установлено, что выраженная токсичность AgНЧ по отношению к фитопатогенам бактериальной и микромицетной природы наблюдается в диапазоне концентраций от 1 мг/л до 1 г/л [15]. Однако известно, что высокие концентрации AgНЧ при праймировании могут оказывать угнетающее действие на растения. Например, в работе [16] продемонстрировано угнетающее действие AgНЧ в концентрации 10 мг/л на прорастание ячменя и льна, выражающееся в снижении длины корней проростков. AgНЧ в концентрации 0,2-1,6 мг/л ингибировали прорастание семян горчицы черной [17]. В целом, фитотоксический эффект AgНЧ зависит от свойств AgНЧ, вида растений, а также условий праймирования, поэтому актуальным остается определение оптимальной концентрации конкретного препарата и условий обработки для определенной культуры [6].

Цель исследования – оптимизация условий праймирования семян пшеницы AgНЧ, стабилизированных карбоксиметилцеллюлозой (AgНЧ-КМЦ), и оценка обеззараживающих свойств наночастиц в этих условиях. Выбор КМЦ в качестве стабилизирующего агента был обусловлен широким применением этого соединения при обработке семян в качестве прилипателя и пленкообразователя.

Методика. Для оценки праймирующих свойств AgНЧ-КМЦ и их взаимодействия с семенами использовали озимую пшеницу (*Triticum aestivum* L.) линии Л-1 разных сортов (оригинатор ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева), которая получена в результате индивидуального отбора сорта Звезда. Возраст семян составлял 6 лет (хранение проводили в темном сухом месте при комнатной температуре), что обеспечивало снижение ростовых качеств семян. Оценку эффективности AgНЧ-КМЦ как дезинфекторов проводили на семенах яровой пшеницы Радмира (оригинатор ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка»).

В работе использовали водную коллоидную суспензию AgНЧ-КМЦ (Найнтех, Россия) с концентрацией 500 мг/л (здесь и далее концентрации наночастиц указана по серебру). Форму и размер частиц AgНЧ-КМЦ определяли с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Условия проведения ПЭМ: концентрация AgНЧ-КМЦ 500 мг/л; микроскоп Tecnai 12 G2 BioTwin (Thermo Fisher Scientific, США), оснащенный детектором Eagle 4K; ускоряющее напряжение 120 кВ. Данные обрабатывали с использованием ПО TIA (Thermo Fisher Scientific, США). Гидродинамический диаметр наночастиц и их электрокинетический потенциал (ζ -потенциал) определяли при концентрации 50 мг/л методом динамического светорассеяния (ДСР) на двухугловом анализаторе размеров частиц с оптикой неинвазивного обратного рассеяния Zetasizer Nano 2 (Malvern, Великобритания). В качестве характеристики размера наночастиц использовали их средне-взвешенный диаметр (СВД) и средневзвешенный гидродинамический диаметр (СВДГ), рассчитываемый на основании распределения частиц по размеру по данным микроскопии и ДСР соответственно.

Праймирование проводили путем добавления суспензии AgНЧ-КМЦ к семенам пшеницы (10 мл суспензии на 100 шт. семян), их совместного инкубирования с последующей промывкой семян дистиллированной водой и высушиванием семян на воздухе до воздушно-сухого состояния. На первом этапе оценки праймирующих свойств AgНЧ-КМЦ оптимизировали условия праймирования в лабораторных условиях с использованием трехфакторного трехуровневого дизайна Бокса-Бенкена, позволяющего путем проведения 15 экспериментов оптимизировать 3 фактора [19]: концентрацию праймирующего агента (уровни фактора 10, 30 и 50 мг/л), температуру (4, 14 и 24°C) и длительность (уровни фактора 6, 15 и 24 ч.) праймирования семян. Эффективность праймирования оценивали с помощью биотестирования методом проростков: семена пшеницы проращивали в темноте в чашках Петри (3 сут., 24°C) с последующим определением энергии прорастания, длины корней и побегов. На основании полученных данных рассчитывали индекс жизнеспособности (ИЖ) как

произведение энергии прорастания на сумму длин корней и побегов. ИЖ отражает способность семян давать нормальные всходы при неоптимальных условиях проращивания [20]. В качестве контрольных использовали семена, не подвергавшиеся праймированию. Оптимальными считали значения факторов, при которых были получены максимальные значения параметров. Повторность пятикратная.

Установленные оптимальные условия праймирования далее были использованы для оценки праймирующих свойств AgНЧ-КМЦ в лабораторных условиях водного дефицита и в микроделяночном эксперименте. В качестве контрольных использовали сухие семена. Дополнительно в схему эксперимента вводили также гидропраймированные семена, когда семена подвергали праймированию в тех же условиях, что и при обработке AgНЧ-КМЦ, но с использованием вместо суспензии наночастиц дистиллированной воды.

При биотестировании в условиях водного дефицита семена проращивали в гипертоническом растворе полиэтиленгликоля с молекулярной массой 6000 г/моль (ПЭГ6000, Serva, ФРГ) в концентрации 150 г/л (-0,3 МПа). Праймированные семена пшеницы проращивали в условиях, аналогичных использованным при биотестировании, по методу проростков в экспериментах по оптимизации. Повторность пятикратная.

Микроделяночный эксперимент был направлен на оценку влияния нанопраймирования на перезимовку семян пшеницы. Эксперимент проводили в октябре 2022 г. – апреле 2023 г. на территории Ботанического сада МГУ им. М.В. Ломоносова. Почва среднесуглинистого гранулометрического состава с нейтральной реакцией (p_{H_2O} 7,4), высоким содержанием углерода ($C_{орг}$ 8,1%), высокой обеспеченностью фосфором (P_2O_5 570 мг/кг) и калием (K_2O 172 мг/кг). Размер микроделянок 1,0 x 0,5 м, размещение двурядное встречное [21]. Повторность четырехкратная. Посев семян проводили 07.10.2023 вручную на глубину 1,0-1,5 см. Плотность посева 400 шт/м² (соответствует 4 млн. шт/га). До установления снежного покрова (15.10.2023) всходов пшеницы не наблюдали, поэтому полевую всхожесть пшеницы оценить не удалось. Учет всходов был проведен после перезимовки 25.04.2023.

Оценку сорбции AgНЧ-КМЦ семенами пшеницы проводили в условиях, ранее установленных при оптимизации условий праймирования. Для этого 50 шт. предварительно взвешенных семян помещали в пластиковые флаконы емкостью 50 мл, приливали 30 мл суспензии наночастиц в концентрации 50 мг/л. Пробирки с семенами встряхивали и оставляли на 14 ч при температуре +16°C. После окончания инкубирования определяли равновесную концентрацию серебра в суспензии AgНЧ-КМЦ с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связан-

ной плазмой (АЭС-ИСП) на спектрометре ICP-AES 720-ES (Agilent Technologies, США). На основании полученных данных рассчитывали количество сорбированных наночастиц.

Оценку распределения AgНЧ-КМЦ в семенах пшеницы проводили путем микроскопирования. Для первичного исследования, целью которого было определение возможных участков сорбции наночастиц, микроскопию проводили в отраженном свете при помощи стереомикроскопа Soptop SZN71 (Sunny Optical Instruments Co., Ltd., КНР) и микроскопа светового стандартного модели Soptop CX40P (Sunny Optical Instruments Co., Ltd., КНР), оснащенного цифровой видеокамерой SIMAGIS TC-5CU (SIAMS, Россия). Далее участки потенциального нахождения AgНЧ-КМЦ исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) при помощи электронного микроскопа JEOL-6060A (JEOL, Япония) в рассеянных и отраженных электронах. Перед микроскопированием зерновки (целые, разрезанные вдоль бороздки и поперек) закрепляли на предметном столике, затем напыляли Au в течение 100 с под вакуумом (Jeol, JFC-1600, Япония). Были сняты спектры и определено относительное количество Ag на участках, где предполагали его наличие, при помощи аналитической станции JED-2300 Analysis Station (JEOL, Германия).

Для учета микроорганизмов на поверхности контрольных и праймированных AgНЧ-КМЦ семян использовали метод обмывки семян [22], повторность двукратная. В качестве селективных сред использовали лизогенную среду Лурия (г/л: пептон 15, NaCl 5, агар 15) для учета бактерий и среду Чапека-Докса (г/л: сахароза 30; KH_2PO_4 1; $MgSO_4 \times 7H_2O$ 0,54; KCl 0,5; $FeSO_4 \times 7H_2O$ 0,01; $NaNO_3$ 2; агар 15) для учета грибов. Для выявления внешней и внутренней зараженности проводили проращивание семян во влажной камере (3 сут.) и в рулонах фильтровальной бумаги (7 сут.) [22], повторность пятикратная. При оценке дезинфицирующих свойств AgНЧ-КМЦ дополнительно исследовали вариант с семенами, подвергшимися гидропраймированию (16°C, 14 ч.), или стерилизованными с помощью 15% H_2O_2 в течение 40 мин. [22].

Обработку данных по оптимизации условий праймирования и дисперсионный анализ с расчетом наименьшей существенной разницы (НСР) проводили с помощью ПО Statistica 8.0 (StatSoft, США); уровень доверительной вероятности $p < 0,05$. Данные приведены как средние \pm стандартное отклонение.

Результаты. Микроскопирование показало, что использованные в работе наночастицы имели близкую к сферической форму (рис. 1).

ζ -потенциал AgНЧ-КМЦ составил $45,65 \pm 2,91$ мВ, что свидетельствует с высокой коллоидной стабильности наночастиц [23]. Тем не менее, СВД частиц по данным микроскопирования был $24,0 \pm 9,0$ нм, а

СВГД по данным ДСР – значительно меньше, $4,5 \pm 0,4$ нм, что указывает на агрегирование AgНЧ-КМЦ при повышении концентрации. Распределение частиц AgНЧ-КМЦ по гидродинамическому диаметру имело мономодальный характер с узким диапазоном возможных значений 3-9 нм и максимумом 4,2 нм (рис. 2Б).

При агрегировании мономодальный характер распределения сохранялся, однако диапазон был гораздо шире: от 3 до 55 нм, а максимум возростал до 25 нм (рис. 2А).

Оптимизация условий праймирования наночастицами серебра показала, что рассчитанная оптимальная концентрация AgНЧ-КМЦ для праймирования зерновок пшеницы для всех показателей характеризовалась небольшим разбросом и была близка к 50 мг/л (табл. 1), что соответствует диапазону величин, рекомендуемому для наночастиц серебра в других работах [9]. Исключение составил показатель «энергия прорастания», для достижения максимальных значений которого были установлены более низкие концентрации AgНЧ-КМЦ (38,8 мг/л).

Оптимизированные величины продолжительности (12,9-13,9 ч.) и температуры обработки (15,2-16,3°C) также характеризовались незначительным варьированием. При этом оптимальная продолжительность праймирования приблизительно соответствовала длительности стадии набухания семян, указываемой для пшеницы (6-16 ч.), а оптимальная температура – оптимальной температуре прорастания культуры [24]. На основании полученных данных в дальнейших экспериментах праймирование семян проводили в растворах AgНЧ-КМЦ при концентрации 50 мг/л в течение 14 ч. при температуре 16°C.

Энергия прорастания семян пшеницы в контрольном варианте была очень низкой и составила 76% (табл. 2), что объясняется продолжительным сроком хранения семян. У семян, праймированных AgНЧ-КМЦ, энергия прорастания была 78% и значимо не отличалась от контрольных величин. Однако семена, обработанные наночастицами серебра, характеризовались значимо большей длиной корней, что привело к увеличению ИЖ почти в 3 раза.

В условиях водного дефицита у проростков пшеницы, полученных из непраймированных семян, наблюдали значимое уменьшение длины побегов по сравнению с контрольными в 2,5 раза и, как следствие, снижение ИЖ на 30%. Праймирование семян привело к увеличению длины побегов проростков, однако значимой разницы между эффективностью гидро- и нанопраймирования не отмечено. В случае праймирования AgНЧ-КМЦ отмечена также тенденция к повышению энергии прорастания семян до 84%, но статистически значимой разницы с контролем (76%) не установлено. По всей видимости, отсутствие положительного влияния AgНЧ-КМЦ в этом случае объясняется тем, что оптимизированное

значение концентрации наночастиц для достижения максимальной энергии прорастания ниже, чем для остальных показателей прорастания семян (табл. 1).

После гидропраймирования и праймирования AgНЧ-КМЦ семян наблюдали увеличение длины побегов пшеницы, а в случае AgНЧ-КМЦ – и длины корней. ИЖ праймированных семян превышал не только ИЖ необработанных семян, пророщенных в условиях водного дефицита, но и контрольные величины этого показателя. Это указывает на выраженную эффективность праймирования, особенно нанопраймирования, в лабораторных условиях.

В полевых условиях количество перезимовавших всходов пшеницы в контроле составило 42% от количества посеянных семян (табл. 3), что может быть связано как с низкой энергией прорастания (табл. 2), так и с неблагоприятными погодными условиями для перезимовки озимых культур.

Осенне-зимний период 2022-2023 гг. характеризовался неблагоприятными погодными условиями для перезимовки озимых культур. Несмотря на значительную высоту снежного покрова, установившуюся к середине декабря (30-39 см), из-за сильной оттепели в 22.12.2022 – 01.01.2023 и дождей высота снежного покрова значительно уменьшилась. Рекордно высокая температура 01.01.2023 (+5,1°C) сменилась сильными морозами 07.01.2023 (-23,5°C) при низком уровне осадков (55% от средней нормы для января). Большие перепады температуры привели к уплотнению и обледенению снежного покрова. На территории Центральной части России зимой 2022-2023 гг. наблюдались такие погодные явления, как ледяная корка и вымерзание. Минимальная температура почвы на глубине залегания узла кущения озимых была ниже критических значений и колебалась в диапазоне от -3 до -6°C. Часто были отмечены очень значительные перепады температуры с +8°C до -20°C и ниже [25]. Перечисленные явления привели к плохой перезимовке озимых культур вследствие частичного вымерзания как надземной части растений, так и узла кущения и корневой системы, необходимых для возобновления весенней вегетации.

Праймирование AgНЧ-КМЦ значимо увеличило количество перезимовавших всходов: на 10% относительно контроля и на 6% относительно гидропраймирования. Проведенные эксперименты свидетельствуют об эффективности AgНЧ-КМЦ как

1. Значения оптимизированных условий праймирования семян пшеницы AgНЧ-КМЦ

Показатель	Концентрация, мг/л	Продолжительность, ч.	Температура, °C
Энергия прорастания	38,8	12,9	15,2
Длина побегов	50,0	13,2	15,9
Длина корней	49,9	13,9	16,3
ИЖ	49,9	13,2	16,2

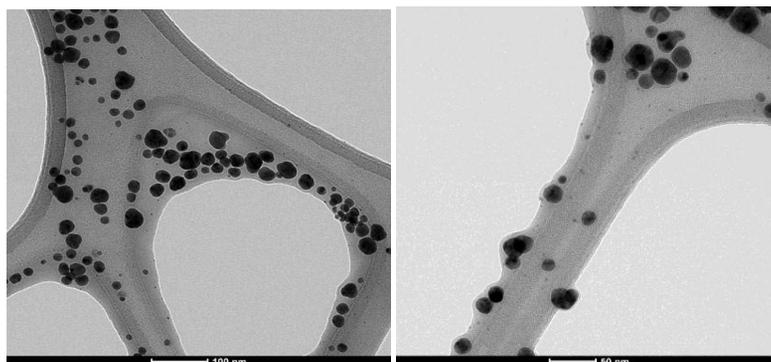


Рис. 1. ПЭМ-изображения AgNC-KMC при концентрации 500 мг/л образца

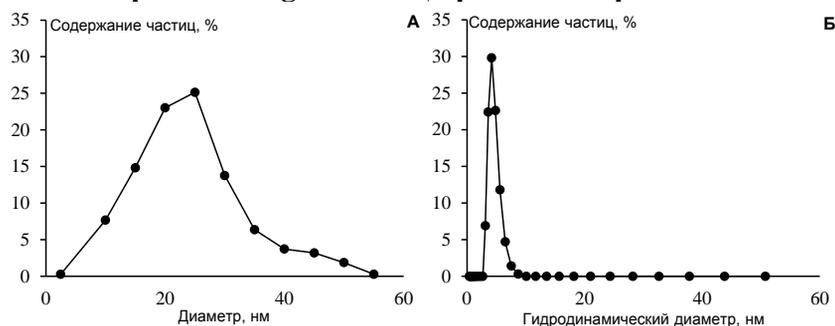


Рис. 2. Распределение частиц AgNC-KMC по размеру по данным микроскопии (А) и ДСР (Б)

праймирующих агентов в отношении семян с пониженной всхожестью, обусловленной длительным сроком хранения. В качестве дальнейших направлений исследования AgNC-KMC следует выделить необходимость оценки их действия в условиях полевых многолетних опытов, а также изучение взаимодействия наночастиц с семенами.

Проведенные эксперименты показали, что семенами пшеницы сорбируется 11 ± 1 мкг/г наночастиц. СВГД несорбированных AgNC-KMC был ниже, чем СВГД наночастиц в исходной суспензии и составил $3,2 \pm 0,3$ нм. Это указывает на преимущественное оседание на семенах пшеницы частиц большего

размера. Абсолютное значение ζ -потенциала несорбированных AgNC-KMC уменьшилось до $-(33,90 \pm 0,71)$, что согласуется с существующим предположением о том, что растительные клетки эффективно усваивают преимущественно наноматериалы с положительным или отрицательным ζ -потенциалом выше 20-30 мВ [4].

Исследование праймированных AgNC-KMC и контрольных семян с помощью световой микроскопии показало, что после обработки наночастицами на оболочке семян соломенного цвета отмечаются темные коричневатые пятна. Это указывает на то, что AgNC-KMC не образуют сплошной пленки на

2. Влияние гидропраймирования и праймирования AgNC-KMC на параметры прорастания семян пшеницы в условиях водного дефицита

Вариант обработки	Энергия прорастания, %	Длина корней, мм	Длина побегов, мм	ИЖ, % от контроля
Оптимальные условия (проращивание в дистиллированной воде)				
Контроль	$(76 \pm 5)^a$	$(8 \pm 4)^o$	$(10 \pm 4)^a$	100
Гидропраймирование	$(73 \pm 10)^a$	$(11 \pm 4)^o$	$(8 \pm 3)^a$	148
AgNC-KMC	$(78 \pm 5)^a$	$(21 \pm 4)^a$	$(13 \pm 3)^a$	295
Водный дефицит (проращивание в ПЭГ6000, 150 г/л)				
Без обработки	$(80 \pm 10)^a$	$(7 \pm 2)^o$	$(4 \pm 1)^b$	70
Гидропраймирование	$(76 \pm 18)^a$	$(11 \pm 4)^o$	$(7 \pm 2)^o$	112
AgNC-KMC	$(84 \pm 11)^a$	$(13 \pm 4)^a$	$(8 \pm 1)^o$	146

± – стандартное отклонение, n = 5; буквами обозначена принадлежность к гомогенной группе при p < 0,05.

3. Влияние гидропраймирования и праймирования AgNC-KMC на количество перезимовавших всходов озимой пшеницы

Вариант обработки	Количество перезимовавших всходов, % от посеянных семян
Контроль	$(42 \pm 2)^b$
Гидропраймирование	$(46 \pm 2)^o$
AgNC-KMC	$(52 \pm 2)^a$

± – стандартное отклонение, n = 4; буквами обозначена принадлежность к одной гомогенной группе при p < 0,05.

поверхности семян, а осаждаются локально. Анализ этих участков методом электронной микроскопии позволил установить в них наличие серебра в концентрации 3-16% (рис. 3).

При микроскопировании продольных и поперечных срезов зерновок серебро не было обнаружено. Очевидно AgНЧ-КМЦ не проникли через семенную оболочку пшеницы. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, что наночастицы небольшого размера с высокими значениями ζ -потенциала могут проходить только через липидные мембраны, но не через плазмалемму [4].

Учет КОЕ в смывах семян показал, что праймирование AgНЧ-КМЦ приводит к снижению поверхностной зараженности семян в смывах в 9-75 раз, но уступает по эффективности обработке перекисью водорода (табл. 4).

Гидропраймирование, напротив, способствовало росту количества КОЕ на поверхности семян. Этот негативный эффект ранее неоднократно отмечался другими исследователями и указывался как одна из основных причин ограничения широкого использования праймирования в сельском хозяйстве [5].

Определение микроорганизмов на основании фенотипических признаков (морфология колоний, окраска, микроморфология под микроскопом, тест с 3% КОН) показало, что в смывах с семян на обеих использованных средах обнаруживаются только колонии бактерий, но не грибов. На среде Лурия преобладали грамотрицательные бактерии, которые на основании фенотипических признаков предположительно были отнесены к родам *Erwinia*, *Xantomonas*, *Cytophaga*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas* и *Enterobacter*. Также один из обнаруженных штаммов относился к грамположительным (*Bacillus*). На среде Чапека также преимущественно обнаруживались грамотрицательные бактерии родов *Erwinia*, *Xantomonas*, *Enterobacter*, а также грамположительный *Rhodococcus*. Интересно отметить, что колонии грамположительных бактерий обнаруживались только в смывах с контрольных и гидропраймированных семян, в то время как после обработки AgНЧ-КМЦ наблюдали только рост грамотрицательных бактерий. Возможно, наблюдаемый факт объясняется большей устойчивостью грамотрицательных бактерий к бактерицидному действию наночастиц серебра, что связано с наличием наружной мембраны, служащей дополнительным барьером для наночастиц [26]. Снижением КОЕ в смывах с семян, праймированных AgНЧ-КМЦ, хорошо согласуется с наличием на поверхности серебра (рис. 3) и многочисленными свидетельствами антибактериальной активности наночастиц серебра [14].

Несмотря на выраженную бактерицидную активность AgНЧ-КМЦ, эксперименты во влажной камере не подтвердили способность наночастиц эффективно подавлять развитие патогенных микро-

организмов: количество зараженных семян, определяемых по размягчению и ослизнению тканей зерновок, в контроле составило 18%, а в варианте нанопраймирования 10% и значимо не отличалось от контрольных (табл. 5).

Отсутствие влияния перекиси водорода в этих условиях свидетельствует о том, что наблюдаемый рост патогенных микроорганизмов был обусловлен, главным образом, внутренней зараженностью семян. В пользу высказанного предположения свидетельствует тот факт, что при росте в рулонах фильтровальной бумаги количество зараженных семян возросло, и они имели признаки фузариоза (наличие пушистого мицелия ярко-малинового цвета), темно-бурого гельминтоспориоза (наличие бурой пигментации) и альтернариоза (образование паутинистого мицелия темно-серого цвета), в то время как в смывах с семян грибных микроорганизмов не обнаружено. Полученные результаты показывают, что AgНЧ-КМЦ обладают свойствами контактного бактерицидного протравителя, обладающего эффективностью при обработке им семян путем проведения мокрого протравливания. Аналогичной активностью обладают биопрепараты. Для повышения эффективности AgНЧ-КМЦ перспективным будет создание на их основе пленок для инкрустации семян.

Зараженные семена характеризовались удовлетворительными показателями прорастания (энергия прорастания 90%, лабораторная всхожесть 94%) и ни гидропраймирование, ни нанопраймирование не повлияли на их величины. В целом, праймирующие свойства AgНЧ-КМЦ в отношении зараженных семян были слабо выражены: если при обработке старых семян пшеницы с пониженной всхожестью по результатам 3-дневных испытаний ИЖ возрастал до 295% от контроля, то при обработке зараженных семян с высокой всхожестью – только до 117%. При увеличении продолжительности опыта до 7 сут. (в рулонах фильтровальной бумаги) положительного действия AgНЧ-КМЦ ни на один из оцениваемых показателей ростовых качеств семян не отмечено.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными о том, что эффект праймирования часто проявляется только на самых стадиях развития растений. Например, в полевых опытах с редисом было показано, что всходы из праймированных семян появ-

4. Влияние гидропраймирования, праймирования AgНЧ-КМЦ и стерилизации H₂O₂ на содержание микроорганизмов на поверхности семян пшеницы, КОЕ/г

Вариант	Среда Лурия	Среда Чапека-Докса
Контроль	2,0 x 10 ⁶	2,6 x 10 ⁶
Гидропраймирование	2,8 x 10 ⁶	2,8 x 10 ⁶
AgНЧ-КМЦ	2,3 x 10 ⁵	3,5 x 10 ⁴
H ₂ O ₂	3,0 x 10 ²	45

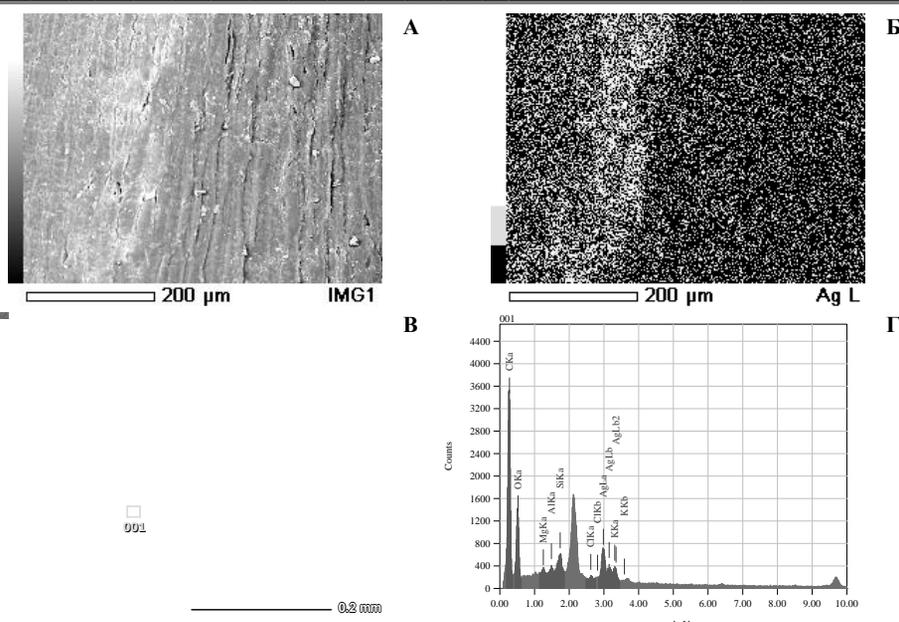


Рис. 3. СЭМ-изображения темного пятна на поверхности семян, праймированных AgНЧ-КМЦ: А – поверхность зерновки в отраженных электронах; Б – карта распределения Ag по поверхности в том же поле зрения, светлые точки отмечают место, где достоверно есть Ag; В – поверхность зерновки в рассеянных электронах; Г – элементный состав в выбранной области, относительное содержание Ag ($13,4 \pm 0,9\%$)

5. Влияние гидропраймирования, праймирования AgНЧ-КМЦ и стерилизации H_2O_2 на параметры прорастания семян пшеницы во влажной камере и в рулонах фильтровальной бумаги

Вариант обработки	Количество зараженных семян, %	Энергия прорастания/всхожесть, %	Длина корней, мм	Длина побегов, мм	ИЖ, % от контроля
Влажная камера (n = 5)					
Контроль	(21 ± 6) ^a	(91 ± 10) ^a	(39 ± 7) ^o	(17 ± 4) ^o	100
Гидропраймирование	(24 ± 5) ^a	(94 ± 5) ^a	(39 ± 14) ^o	(17 ± 7) ^o	98
AgНЧ-КМЦ	(8 ± 4) ^o	(88 ± 11) ^a	(44 ± 5) ^a	(23 ± 3) ^a	117
H_2O_2	(18 ± 2) ^a	(88 ± 13) ^a	(24 ± 4) ^b	(10 ± 2) ^b	56
Рулоны фильтровальной бумаги (n = 4)					
Контроль	(97 ± 2) ^a	(94 ± 3) ^a	(65 ± 8) ^a	(99 ± 8) ^a	100
Гидропраймирование	(95 ± 2) ^a	(95 ± 3) ^a	(62 ± 5) ^a	(103 ± 6) ^a	102
AgНЧ-КМЦ	(90 ± 4) ^o	(95 ± 3) ^a	(66 ± 2) ^a	(105 ± 3) ^a	106
H_2O_2	(93 ± 1) ^o	(94 ± 4) ^a	(58 ± 3) ^o	(93 ± 4) ^a	92

± – стандартное отклонение, буквами обозначена принадлежность к гомогенной группе при $p < 0,05$.

ляются на день раньше, чем из необработанных, и в течение первой недели после посева в контрольном варианте наблюдается более медленное появление всходов. Однако в дальнейшем эффект праймирования нивелировался, и полевая всхожесть необработанных и праймированных семян не отличались [27]. Тем не менее, именно быстрое прорастание и появление всходов часто рассматриваются как основные проблемы в успешном растениеводстве [5, 28], особенно в неоптимальных условиях окружающей среды [5, 28, 29]. Поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на оценку праймирующих и обеззараживающих свойств AgНЧ-КМЦ в полевых условиях.

1. С использованием трехфакторного трехуровневого дизайна Бокса-Бенкена установлено, что наибольший эффект от праймирования семян мягкой озимой пшеницы может быть достигнут при концентрации AgНЧ-КМЦ 50 мг/л и замачивании

семян в суспензии наночастиц в течение 14 ч. при температуре 16°C. В этих условиях праймирование семян, характеризующихся пониженной всхожестью вследствие длительного хранения, позволяет повысить ИЖ семян до 295%, по сравнению с контрольными величинами, главным образом за счет стимулирования роста корней проростков.

2. В условиях водного дефицита, имитируемого с помощью ПЭГ6000 в концентрации 150 г/л, ИЖ семян пшеницы, праймированных AgНЧ-КМЦ, увеличивается до 146% от контроля за счет стимулирования роста корней и побегов проростков.

3. В полевых условиях праймирование семян пшеницы AgНЧ-КМЦ значительно увеличило количество перезимовавших всходов на 10% относительно контроля.

4. С использованием сканирующей электронной микроскопии установлено, что AgНЧ-КМЦ не проникают в семена, а осаждаются локально на их по-

верхности; в местах осаждения наночастиц концентрация серебра лежит в диапазоне 3-16%.

5. Оценка дезинфицирующих свойств показала, что AgНЧ-КМЦ характеризуются свойствами контактного бактерицидного протравителя, обладающего эффективностью при обработке им семян путем проведения мокрого протравливания.

Таким образом, наибольший эффект от праймирования семян мягкой озимой пшеницы получен при концентрации AgНЧ-КМЦ 50 мг/л и замачивании семян в суспензии наночастиц в течение 14 ч. при температуре 16°C. В этих условиях праймирования ИЖ семян составил 295%, а в условиях

имитируемого водного дефицита – до 146% по сравнению с контрольными величинами. В полевых условиях праймирование семян пшеницы AgНЧ-КМЦ значительно увеличило количество перезимовавших всходов. С использованием сканирующей электронной микроскопии установлено, что AgНЧ-КМЦ не проникают в семена, а осаждаются локально на их поверхности. Оценка дезинфицирующих свойств показала, что AgНЧ-КМЦ характеризуются свойствами контактного бактерицидного протравителя, обладающего эффективностью при обработке им семян путем проведения мокрого протравливания.

Работа выполнена в рамках НИР «Разработка и оценка комплекса инновационных агрохимических средств, мелиорантов и регуляторов роста в условиях агро-, техногенеза и городской среды» (номер ЦИТИС: 121041300098-7). При проведении экспериментов использован микроскоп световой стандартной модели Soptor CX40P факультета почвоведения МГУ, приобретенный по «Программе развития Московского университета».

Литература

1. FAO. The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. Summary version. 2018. Rome, Italy, 60 Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. – URL: <http://www.fao.org/3/CA1553EN/ca1553en.pdf> (дата обращения 10.12.2024).
2. Hunter M.C., Smith R.G., Schipanski M.E., Atwood L.W., Mortensen D.A. Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification // *BioScience*, 2017, V. 67, № 4. – P. 386-391. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>.
3. Алексейчук Г.Н., Ламан Н.А. Физиологическое качество семян сельскохозяйственных культур и методы его оценки. – Минск: ИООО «Право и экономика», 2005. – 48 с.
4. Eevera T., Kumaran S., Djanaguiraman M., Thirumaran T., Le Q.H., Pugazhendhi A. Unleashing the potential of nanoparticles on seed treatment and enhancement for sustainable farming // *Environmental Research*, 2023, V. 236(Pt 2). – 116849. doi: 10.1016/j.envres.2023.116849.
5. Lutts S., Benincasa P., Wojtyła L., Kubala S.S., Pace R., Lechowska K., Quinet M., Garnczarska M. Seed priming: new comprehensive approaches for an old empirical technique / *New Challenges in Seed Biology – Basic and Translational Research Driving Seed Technology*, 2016. – London: IntechOpen Limited, 2016. – P. 1-46. <http://dx.doi.org/10.5772/64420>.
6. Pawar V.A., Laware S.L. Seed priming: a critical review // *International Journal of Scientific Research in Biological Sciences*, 2018, № 5. – P. 94-101.
7. Куприянов Ф.А., Савиных П.А., Устюжанин И.А. Влияние прайминга семян на всходы сельскохозяйственных культур // *Вестник АПК Верхневолжья*, 2022, № 1. – С. 5-10. <http://dx.doi.org/10.35694/YARCX.2022.57.1.001>.
8. Corbineau F., Taskiran-Özbingöl N., El-Maarouf-Bouteau H. Improvement of seed quality by priming: Concept and biological basis // *Seeds*, 2023, № 2(1). – P. 101-115. <https://doi.org/10.3390/seeds2010008>.
9. Омельченко А., Жижина М., Юркова А. Влияние обработки семян нанобиосеребром на фитопатогены и ростовые процессы проростков озимой пшеницы // *Вестник ВГУ. Серия химия, биология, фармакология*, 2015, № 3. – С. 71-74.
10. Acharya P., Jayaprakasha G.K., Crosby K.M., Jifon J.L., Patil B.S. Nanoparticle-mediated seed priming improves germination, growth, yield, and quality of watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas // *Scientific Reports*, 2020, № 10. – 5037. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61696-7>.
11. Pallavi C., Mehta M., Srivastava R., Arora S., Sharma A.K. Impact assessment of silver nanoparticles on plant growth and soil bacterial diversity // *3BIOTECH*, 2016, № 6. – 254. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0567-7>.
12. Hojjat S.S., Kamyab M. The effect of silver nanoparticle on Fenugreek seed germination under salinity levels // *Russian Agricultural Sciences*, 2017, V. 43, № 1. – P. 61-65. <https://doi.org/10.3103/S1068367417010189>.
13. Adisa I.O., Pullagurala V.L.R., Peralta-Videa J.R., Dimkpa C.O., Elmer W.H., Gardea-Torresdey J.L., White J.C. Recent advances in nano-enabled fertilizers and pesticides: A critical review of mechanisms of action // *Environmental Science, Nano*, 2019, № 6(7). – P. 2002-2030.
14. Rana S., Kalaichelvan P.T. Antibacterial activities of metal nanoparticles // *Antibacterial Activities of Metal Nanoparticles*, 2011, T. 11, № 2. – P. 21-23.
15. Фастовец И.А., Верховцева Н.В., Пашкевич Е.Б. Наночастицы серебра: токсическое действие на микроорганизмы и взаимодействие с высшими растениями // *Проблемы агрохимии и экологии*, 2017, № 1. – С. 51-62.
16. El-Temsah Y.S., Joner E.J. Impact of Fe and Ag nanoparticles on seed germination and differences in bioavailability during exposure in aqueous suspension and soil // *Environmental Toxicology*, 2012, V. 27. – P. 42-49.
17. Amooaghaie R., Tabatabaei F., Ahadi A.-m. Role of the hematin and sodium nitroprusside in regulating *Brassica nigra* seed germination under nanosilver and silver nitrate stresses // *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, V. 113. – P. 259-270.
18. Rivera D., Obando M., Barbosa H., Rojas-Tapias D., Bonilla Buitrago R. Evaluation of polymers for the liquid rhizobial formulation and their influence in the Rhizobium-Cowpea interaction // *Universitas Scientiarum*, 2014, V. 19, № 3. – P. 265-275. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC19-3.eplr>.
19. Ferreira S.L., Bruns R.E., Ferreira H.S., Matos G.D., David J.M., Brandão G.C., da Silva E.G., Portugal L.A., dos Reis P.S., Souza A.S., dos Santos W.N. Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods // *Analitica Chimica Acta*, 2007, V. 597, № 2. – P. 179-186.
20. Damalas C.A., Koutroubas S.D., Fotiadis S. Hydro-priming effects on seed germination and field performance of faba bean in spring sowing // *Agriculture*, 2019, № 9. – Article Number 201.
21. Щерба С.В. Методика полевых и вегетационных опытов с удобрениями и гербицидами. – М.: Наука, 1967. – 183 С.
22. Nardi S., Pizzeghello D., Gessa C., Ferrarese L., Trainotti L., Casadoro G. A low molecular weight humic fraction on nitrate uptake and protein synthesis in maize seedlings // *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, V. 32. – P. 415-420.
23. Kumar A., Dixit C.K. Methods for characterization of nanoparticles / *Advances in Nanomedicine for the Delivery of Therapeutic Nucleic Acids*. – Amsterdam: Elsevier, 2017. – P. 43-58. <https://doi.org/10.11144/10.1016/b978-0-08-100557-6.00003-1>.
24. Рогожин В.В., Рогожина Т.В. Физиолого-биохимические механизмы прорастания зерновок пшеницы // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, 2011, № 8. – С. 17-21.
25. Перезимовка озимых зерновых культур. URL: <https://www.syngenta.ru/crops/crop-cereals/20230316-winter-ear-crops-atthe-beginning-of-spring-vegetation-in-2023> (дата обращения 10.12.2024).
26. Габриелян Л.С., Трчуянян А.А. Антибактериальные свойства наночастиц серебра и мембранотропные механизмы их действия // *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*, 2020, № 3. – С. 64-71.
27. Kulikova N.A., Khusnetdinova T.I., Filippova O.I., Klein O.I. Priming with humic substances affects the field performance of radishes (*Raphanus Raphanistrum* subsp. *Sativus* L. domin) in hot, dry conditions / *AIP Conference Proceedings*, 2023, 2817 (1). – 020034.
28. Mal D., Verma J., Levan A., Reddy M. R., Avinash A.V., Velaga P.K. Seed priming in vegetable crops: A review // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2019, № 8. – P. 868-874. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.806.105>.
29. Noman A., Ali Q., Maqsood J., Iqbal N., Javed M.T., Rasool N., Naseem J. Deciphering physio-biochemical, yield, and nutritional quality attributes of water-stressed radish (*Raphanus sativus* L.) plants grown from Zn-Lys primed seeds // *Chemosphere*, 2018, № 195. – P. 175-189. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.059>.