

создании алгоритма математической обработки первичных данных по индексам NDVI и BI. больших массивов пространственно распределенных

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балабанов В. И., Федоренко В. Ф. (ред.) Технологии, машины и оборудование для координатного (точного) земледелия. М.: Издательство ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. 220 с.
- Савин И. Ю. Современный спутниковый мониторинг почв и посевов: достижения и проблемы // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2015 г. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015. С. 29–32.
- Черепанов А. С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
- Якушев В. П., Канаш Е. В., Конев А. В., Ковтюх С. Н., Лекомцев П. В., Матвеев Д. А., Петрушин А. Ф., Якушев В. В., Буре В. М., Русаков Д. В., Осипов Ю. А. Теоретические и методические основы выделения однородных технологических зон для дифференцированного применения средств химизации по оптическим характеристикам посева. Практическое пособие. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2010. 60 с.
- <http://www.trimble.com/agriculture/greenseeker> [Электронный ресурс].
- <http://www.n-sensor.de> [Электронный ресурс].
- <http://www.yara.ru/crop-nutrition/Tools-and-Services/n-tester/> [Электронный ресурс].

REFERENCES

- Balabanov V. I., Fedorenko V. F. (red.). *Tehnologii, mashiny i oborudovanie dlja koordinatnogo (tochnogo) zemledelija* [Technologies, equipment and devices for coordinate (precision) agriculture]. Moscow: Publishing house FGBNU «Rosinformagroteh», 2016. 220 p.
- Savin I. Ju. *Sovremennyyj sputnikovyyj monitoring pochv i posevov: dostizhenija i problemy* [Current satellite monitoring of crops: achievements and problems] // *Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Primenenie sredstv distancionnogo zondirovanija Zemli v sel'skom hozjajstve»*. Sankt-Petersburg, 16–17 sentjabrja 2015 g. [Materials of the international conference «Remote sensing methods in agriculture». St. Petersburg, September 16–17, 2015]. Sankt-Petersburg, Publishing house ARI, 2015. pp. 29–32.
- Cherepanov A. S. *Vegetacionnye indeksy* [Vegetation indices] // *Geomatika*, 2011, no. 2, pp. 98–102.
- Jakushev V. P., Kanash E. V., Konev A. V., Kovtjukh S. N., Lekomtsev P. V., Matveenko D. A., Petrushin A. F., Jakushev V. V., Bure V. M., Rusakov D. V., Osipov Iu. A. *Teoreticheskie i metodicheskie osnovy vydelenija odnorodnyh tehnologicheskikh zon dlja differencirovannogo primeneniya sredstv himizacii po opticheskim harakteristikam poseva. Prakticheskoe posobie* [Theoretical and methodological approaches for optical detection of homogeneous technological zones of crop for differential application of agrochemicals. A practical guide]. Sankt-Petersburg: Publishing house ARI, 2010. 60 p.
- <http://www.trimble.com/agriculture/greenseeker>
- <http://www.n-sensor.de>
- <http://www.yara.ru/crop-nutrition/Tools-and-Services/n-tester/>

УДК: 546.26:631.8:581.1, 635.07

DOI: 10.25695/AGRPH.2018.03.09

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ И КРЕМНЕЗОЛЬНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ К ЗАБОЛЕВАНИЮ КОРНЕВЫМИ ГНИЛЯМИ

Г. Г. Панова¹, К. Н. Семенов², О. А. Шилова^{3,4}, Д. Л. Корнюхин⁵, А. М. Шпанев¹, Л. М. Аникина¹,
Т. В. Хамова³, А. М. Артемьева⁵, Е. В. Канаш¹, Н. А. Чарыков⁶, О. Р. Удалова¹, А. С. Галушко¹,
А. С. Журавлева¹, П. С. Филиппова¹, Д. В. Кудрявцев¹, С. Ю. Блохина¹

¹ ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
Гражданский пр., д. 14, Санкт-Петербург, 195220,
E-mail: gaiane@inbox.ru;

² ФГБОУ ВПО СПбГУ, Университетская наб., д.7-9, Санкт-Петербург, 199034
E-mail: semenov1986@yandex.ru;

³ ФГБНУ ИХС, наб. Макарова, д. 2, Санкт-Петербург, 199034

⁴ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376
E-mail: olgashilova@bk.ru; ltpp@rambler.ru;

⁵ ФГБНУ ФИЦ ВИР, ул. Большая Морская, 42-44, Санкт-Петербург, 190000
E-mail: akme11@yandex.ru

⁶ Санкт-Петербургский технический университет
Московский пр., д.26, Санкт-Петербург, 190013
E-mail: ncharykov@yandex.ru

Поступила в редакцию 20 августа 2018 г., принята к печати 28 августа 2018 г

Выявлено влияние наноматериалов – углеродных и кремнезольных наноструктур и их производных – на устойчивость ярового ячменя к заболеванию корневыми гнилями. Установлено,

что усовершенствование состава кремнезелей на основе 1 масс. % и 20 масс. % тетраэтоксисилана (ТЭОС) (рН 2–3 и 7–8) с макро- и микроэлементами (М) путем введения диоксида титана (TiO₂) в форме анатаза, детонационного наноалмаза (ДНА) или его шихты, легированной бором (АШ с В), а также глицерина обеспечивало повышение их фитопротекторных свойств и существенно повышало устойчивость ярового ячменя к поражению возбудителем корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) после обработки семян. При этом положительное влияние на выживаемость растений и их дальнейшее развитие оказывали варианты кремнезелей: 20 масс.% ТЭОС (рН 7–8) с М, 2,5 масс. % ДНА; 1 масс.% ТЭОС (рН 2-3) с М и добавками отдельно или совместно 0,1 масс. % TiO₂ и глицерина. Микробиологические исследования поверхности семян ячменя позволили предположить возможную связь повышения устойчивости растений к фитопатогенам с регулирующим воздействием кремнезелей на численный состав эпифитных микроорганизмов и соотношение их таксономических и функциональных групп. Выявлено положительное влияние обработки семян производными фуллерена C₆₀ с метионином и фуллереном C₆₀ с треонином, а также его наносоствами на устойчивость растений к поражению возбудителем корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.). При этом механизм их положительного влияния не связан с регулированием численности микроорганизмов на поверхности семян, а, по всей видимости, обусловлен способностью активизировать метаболизм и антиоксидантные способности растений.

Ключевые слова: наноматериалы, аминокислотные производные фуллерена C₆₀ кремнезоли, ТЭОС, детонационный наноалмаз, диоксид титана, семена, яровой ячмень, продукционный процесс, устойчивость, эпифитные микроорганизмы, фитопатогены

IMPACT OF CARBON AND SILICA SOL NANOSTRUCTURES ON SPRING BARLEY

RESISTANCE TO THE ROOT ROT INFESTATION

G. G. Panova¹, K. N. Semenov², O. A. Shilova^{3,4}, D. L. Korniyuhin⁵, A. M. Shpanev¹, L. M. Anikina¹, T. V. Namova³, A. M. Artem'eva⁵, E. V. Kanash¹, N. A. Charykov⁶, O. R. Udalova¹, A. S. Galushko¹, A. S. Zhuravleva¹, P. S. Filippova¹, D. V. Kudryavcev¹, S. Yu. Blohina¹

¹Agrophysical Research Institute,

14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, 195220; E-mail: gaiane@inbox.ru

²St. Petersburg State University,

Universitetskaya emb., 7-9, St. Petersburg, 199034; E-mail: semenov1986@yandex.ru

³I. V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences, 2, Makarova emb., St. Petersburg, 199034; E-mail: olgashilova@bk.ru ltp@rambler.ru

⁴St.-Petersburg State Electrotechnical University

ul. Professora Popova, 5, St. Petersburg, 197376; E-mail: olgashilova@bk.ru; ltp@rambler.ru

⁵N. I. Vavilov Institute of Plant Genetic Resources,

42-44, B. Morskaya St., St. Petersburg, 190000; E-mail: akme11@yandex.ru

⁶St. Petersburg Technical University

Moscow av., 26, St. Petersburg, 190013

E-mail: ncharykov@yandex.ru

The impact of carbon and silica sol nanostructures and their derivatives on spring barley resistance to the root rot *Cochliobolus sativus* (S. Ito and Kurib.) infestation has been revealed in a series of laboratory and vegetation experiments. It was determined that silica sols based on 1 mass% and 20 mass% tetraethoxysilane (TEOS) (pH 2–3 and 7–8) with macro- and microelements (M), modified by incorporation titanium dioxide (TiO₂) in the form of anatase, detonation-synthesized nanodiamond (DND) or boron doped blend (DB with B), and glycerin have significantly strengthened phytoprotective properties and resistance of spring barley plants to the root rot infestation after seed treatment. The treatment of TEOS concentration of 20 mass% (pH 7–8) with M, 2,5 mass% DND and 1 mass % TEOS (pH 2–3) with M, 0,1 mass% TiO₂ and glycerin have positively influenced the survival rate and plant growth. Microbiological tests of barley seed surface showed that there was possible relationship between increasing plant resistance to the root rot and the regulating effect of silica sols on numerical structure of epigenous microorganisms and their taxonomic and functional group ratio. The increasing trend in spring barley resistance to the root rot was revealed after seed treatment by fullerene derivatives C₆₀-methionine and C₆₀-threonine and their nanocomposites. However the mechanism of the revealed positive influence was not related to the regulation of the microorganism number on the seed surface, but caused by the possible impact on plant metabolism and antioxidant activity.

Keywords: nanomaterials, amino acid fullerene derivatives C₆₀, silica sol, tetraethoxysilane, detonation-synthesized nanodiamond, titanium dioxide, seeds, spring barley, resistance, epigenous microorganisms, phytopathogen.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка оригинальных агробиотехнологий, включающих использование новых

многокомпонентных биоразлагаемых индукторных наноконпозиций с комплексом полезных функций, и способствующих снижению и предотвращению дальнейшего загрязнения окружающей среды

персистентными пестицидами и агрохимикатами, является актуальной в связи с необходимостью решения проблемы экологически безопасного повышения устойчивости сельскохозяйственных растений и получения стабильных урожаев качественной растительной продукции.

Интерес к наноматериалам и нанотехнологиям обусловлен их уникальными свойствами и высокой эффективностью в низких концентрациях. За счет наноразмеров (1–100 нм) и электронейтральности они легко проникают через мембрану клетки (Каплушенко и др., 2008), а вследствие значительной удельной поверхности имеют большую реакционную способность и, соответственно, эффективны в более низких концентрациях (Каплушенко с соавт., 2008; Забегалов, Дабахова, 2011; Федоренко с соавт., 2013; Полищук и др., 2014; Fedorenko et al., 2015). Кроме того, показано, что, например, наночастицы металлов вследствие электронейтральности существенно менее токсичны по сравнению с солями металлов (Фолманис, Коваленко, 2009), а такие углеродные наноструктуры, как полиоксигидроксилированные и аминокислотные производные фуллерена C₆₀ обладают антиоксидантными свойствами и обеспечивают повышение устойчивости растений при возникновении окислительного стресса (Panova et al., 2016; Semenov et al., 2017; Панова и др., 2018).

К перспективным наноматериалам, потенциально способным повысить устойчивость растений к стрессорам биотической и абиотической природы, относят углеродные, кремнезольные наноструктуры, гидратированные и карботированные наночастицы биогенных металлов или неионные коллоидные растворы наночастиц металлов и других микроэлементов (Azam et al., 2012; Khot et al., 2012; Khan, Rizvi, 2014; Huang et al., 2015). Продемонстрирована способность ряда наночастиц металлов (намагнитченного железа, алюминия, меди, золота, серебра, кремния, цинка и оксида цинка, диоксида титана, оксида церия и др.), а также кремнезольных наноструктур оказывать бактерицидный и фунгицидный эффект против фитопатогенных микроорганизмов и при этом стимулировать рост, развитие растений, увеличивать их продуктивность (Kumar, Yadav, 2009; Young, 2009; Prasad, Swamy, 2013; Шилова и др., 2018). Показана перспективность использования наночастиц и наноструктур в качестве переносчиков химических соединений с фитопротекторными свойствами, в том числе соединений, относящихся к пестицидам (Nuruzzaman et al., 2016). Так называемые нанопестициды вследствие высокой эффективности в низких концентрациях и «адресной доставки» позволят по прогнозам исследователей снизить дозовую нагрузку агрохимикатов на экосистемы.

В литературе отмечается, что закономерности и механизмы взаимодействия наноструктур и их производных с биообъектами и окружающей средой в агро- и экосистемах практически не изучены (Prasad et al., 2014; Kah, Hofmann, 2014; Huang et al., 2015). В настоящее время во всем мире активно ведутся исследовательские работы в данном направлении для создания высокоэффективных, биологических разлагаемых и экологически безопасных препаратов на их основе.

Цель исследований – изучить влияние углеродных и кремнезольных наноматериалов и их производных на устойчивость растений к поражению фитопатогенами на примере ярового ячменя.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Оценку влияния разработанных наносоставов на основе аминокислотных производных фуллерена C₆₀ и кремнезоль на устойчивость растений ярового ячменя сорта Ленинградский и Атаман к поражению фитопатогенами проводили в лабораторных условиях, в теплице с регулируемым микроклиматом и на биополигоне в регулируемых условиях. Сорт Ленинградский относится к группе среднеустойчивых к поражению фитопатогенами, а сорт Атаман – к восприимчивым.

В работе использовали синтезированные ранее аддукты фуллерена C₆₀ с треонином, метионином, цистеином, гистидином (Semenov et al., 2017), а также кремнезольные наноконпозиции на основе 1масс.% и 20 масс.% тетраэтоксисилана (ТЭОС) Si(OEt)₄ (pH 2–3 или 7–8) с макро- и микроэлементами (Шилова и др., 2017). Для усиления фитопротекторной функции в состав кремнезоль введен добавка диоксида титана в форме анатаза, детонационного наноаламаза и его шихты, легированной бором, так как известна способность данных веществ оказывать биоцидное действие в отношении ряда бактерий, вирусов и плесневых грибов (Schrand et al., 2009; Долматов, 2011; Хамова и др., 2012; Khan, Rizvi, 2014; Исакова и др., 2017 и др.). Обработка семян кремнезольями проводили по разработанной ранее методике (Шилова и др., 2018).

Определение фунгицидной и бактерицидной способности синтезированных производных фуллерена осуществляли по реакции на их присутствие бактериальных и грибных фитопатогенов а) возбудитель сосудистого бактериоза капусты *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (штамм 5212); б) возбудитель фузариоза *Fusarium graminearum* Schwabe.

Оценку бактерицидной способности испытуемых веществ проводили по методике Филатова с соавторами (2010).

Оценку фунгицидной способности испытуемых веществ в отношении возбудителя фузариоза *Fusarium graminearum* Schwabe проводили по методике, изложенной в: (Сёмина и др., 2016).

Оценку влияния синтезированных кремнезоль на численный состав эпифитных микроорганизмов на поверхности семян ярового ячменя, обработанного кремнезольями, проводили с использованием следующей методики: навески обработанных кремнезольями сухих семян (по 10 г) помещали в колбы, содержащие 100 мл натрий-фосфатного буферного раствора (pH 7,2). Колбы подвергли воздействию слабого ультразвука в течение 18 мин. Время воздействия ультразвуком было выбрано на основании результатов предварительных экспериментов по определению зависимости количества смываемых с поверхности семян клеток микроорганизмов от периода ультразвукового воздействия. Далее с применением общепринятого метода серийных разведений определяли численность микроорганизмов основных таксономических и физиологических групп. Составы сред и методика

описаны в литературных источниках (Теппер и др., 2004; Нетрусов и др., 2005).

Одновременно с проведением микробиологического анализа оценивали энергию прорастания, всхожесть, ростовые характеристики семян, обработанных кремнезольями, по стандартной методике (Методика..., 2009).

Оценку влияния предпосевной обработки семян ярового ячменя сорта Ленинградский кремнезольными наноконпозициями и аминокислотными производными фуллерена C₆₀ с метионином и с цистеином на устойчивость к возбудителю корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) проводили по следующей методике, описанной в «Методические...», (1976). Для опытов использовали дерново-подзолистую почву, увлажненную до 50–60% от полной влагоёмкости. Исследования проводили в трехкратной повторности. Для заражения, в 500-мл пластиковые стаканы вносили мицелий *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.). В каждый стакан вносился мицелий с ¼ чашки Петри. Стаканы выдерживали 3-е суток в помещении с температурой 24°C. Затем для равномерного распределения мицелия почва тщательно перемешивалась и увлажнялась. В каждый стакан высевалось по 12 семян ярового ячменя сорта Ленинградский. Стаканы помещали в световой комнате под люминесцентные лампы, с режимом 16 часов день, 8 часов ночь. Учет проводили на 20-е сутки. Подсчитывали число растений в каждом стакане, измеряли массу надземной части растения, визуально оценивали степень поражения каждого растения, давали оценку поражения в баллах по шкале Гоймана (Гойман, 1954). По завершении каждого вегетационного опыта измеряли биометрические показатели роста растений: общую массу и массу листьев, корней, стеблей, оценивали основные показатели продуктивности.

Статистическую обработку данных проводили с применением программ Excel 2010 и Statistica 8 («Stat-Soft, Inc.» США). Определяли средние значения изучаемых показателей, доверительные интервалы, коэффициенты вариации. Достоверность различий между вариантами оценивали методами параметрической (t-критерий Стьюдента) статистики.

Различия между вариантами считали достоверными при $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее были определены состав и концентрации компонентов кремнезелей на основе тетраэтоксисилана (ТЭОС) – Si(OEt)₄ (pH 2–3 или 7–8), а также технология их синтеза (Панова и др., 2017; Шилова и др., 2017; 2018), при которых отмечается их положительное влияние на прорастание семян, рост и развитие различных культурных растений на примере ярового ячменя выявлена тенденция к повышению устойчивости растений к возбудителю корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) (Панова и др., 2017).

Для усиления фитопротекторных свойств кремнезелей на основе ТЭОС, в их состав введена фоточувствительная добавка – диоксид титана в форме анатаза, а также детонационный наноалмаз (ДНА) и его шихта, легированная бором (АШ с В). По результатам исследований в ходе проведения микровегетационных экспериментов при проращивании семян растений ярового ячменя сорта Ленинградский, предварительно обработанных кремнезольями на основе 1% и 20% масс. ТЭОС с М, легированных ДНА, или АШ с В или диоксидом титана в форме анатаза, и их выращивании на протяжении 20 суток в присутствии возбудителя корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) в корнеобитаемой среде показано, что кремнезоли на основе 20 масс. % ТЭОС (pH 7-8) с М, 2,5 масс.% ДНА, а также на основе 1 масс.% ТЭОС (pH 2–3) с М, 0,1 масс.% TiO₂ оказывали существенный фитопротекторный эффект (табл. 1). Растения в данных вариантах по массе не отличались от таковых в незараженном контроле. Балл поражения по шкале Гоймана составлял соответственно 0 и 1, число выживших растений – 75% и 125% соответственно. Обработка семян кремнезолом на основе 20 масс.% ТЭОС (pH 7-8) с М и 0,1 масс.% TiO₂, а также суспензией 2,5 масс.% ДНА с М в присутствии фитопатогена способствовала формированию растений не отличающихся по массе от растений незараженного контроля. Балл поражения по шкале Гоймана составлял единицу. Однако выживаемость растений в данных вариантах в присутствии патогена была низкой – 38% и 43 %, соответственно.

Таблица 1. Влияние предпосевной обработки семян ярового ячменя сорта Ленинградский кремнезольями на основе ТЭОС с различными добавками на устойчивость растений к возбудителю корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) Drechsler ex Dastur

Вариант опыта	Число выживших растений		Масса одного растения				Балл поражения по шкале Гоймана (Гойман, 1954)
	без заражения фитопатогеном, шт.	с заражением фитопатогеном, шт.	без заражения		с заражением		
			г	% от контроля	г	% от контроля	
							% от фонового контроля (незараженные растения в каждом варианте обработки)

контроль	10	5	50*	0,31	100	0,24*	77*	77*	2
1	4	1	25*	0,30	97	0,18*	58*	60*	2
2	5	5	100	0,35	113	0,24*	77*	69*	1
3	2	1	50*	0,29	94	0,12*	39*	41*	2
4	4	5	125*	0,31	100	0,28	90	90	1
5	7	3	43*	0,28	90	0,27	87	96	1
6	4	2	50*	0,20*	65*	0,16*	52*	80*	1
7	8	6	75*	0,28	90	0,31	100	111	0
8	8	3	38*	0,34	110	0,33	107	97	1
9	5	4	80*	0,23*	74*	0,22*	71*	96	1
10	9	5	56*	0,44*	142*	0,23*	74*	52*	2

Примечание: варианты обработки семян водными растворами веществ в течение 12 часов: контроль – дистиллированная вода; 1 – 20% ТЭОС (рН 2-3)+макро- и микроэлементы (М); 2 – 20% ТЭОС (рН 7-8)+М; 3 – 20% ТЭОС (рН 2-3) +М+2,5 сусп. ДНА в воде; 4 – 20% ТЭОС (рН 7-8)+М+2,5 сусп. ДНА в воде; 5 – 2,5 сусп. ДНА+М в воде; 6 – 20% ТЭОС (рН 2-3)+М + 0,1TiO₂; 7 – 1% ТЭОС (рН 2-3) +М+ 0,1TiO₂; 8 – 20% ТЭОС (рН 7-8) + М+0,1TiO₂; 9 – 1% ТЭОС (рН 7-8) + М+0,1TiO₂; 10 – 0,1TiO₂+М; * – значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости.

Микробиологический анализ поверхности семян ярового ячменя показал, что обработка их кремнезолью на основе 1 масс.% и 20 масс.% ТЭОС (рН 2-3 и рН 7-8) с М приводит преимущественно к снижению численности микроорганизмов различных групп, включая и мицелиальные грибы (табл. 2). При этом значимое нарушение соотношения численности спорообразующих бактерий и остальных микроорганизмов наблюдается при обработке семян 1 масс.% и 20 масс.% ТЭОС (рН 7-8) с М. Учитывая влияние на энергию прорастания, всхожесть семян и ростовые характеристики проростков, а также воздействие на микроорганизмы на поверхности семян кремнезоль – 1 масс.% ТЭОС (рН 2-3) с М можно выделить в качестве перспективного для дальнейшего изучения и усовершенствования. Добавление в состав данного кремнезоля глицерина и диоксида титана способствовало более благоприятному для растений изменению численного состава микроорганизмов на поверхности обработанных семян – уменьшалось количество микромицетов и увеличивалась численность бактерий, функционально полезных для растений (табл. 2). Данная композиция кремнезоля показала наиболее высокую эффективность в защите ярового ячменя от корневых гнилей по сравнению с влиянием кремнезолью: 1 масс.% ТЭОС (рН 2-3) с М с и без добавки глицерина; а также 0,1 масс.% TiO₂ с М (табл. 3). Следует отметить большую выраженность положительного влияния указанных композиций кремнезолью на устойчивость к корневым гнилям у восприимчивого сорта ячменя Атаман (табл. 3).

Среди созданных кремнезолью более высокую ростстимулирующую способность в отношении

растений проявляют 20 масс.% ТЭОС (рН 7-8) с М, 0,1 масс.% TiO₂, а также 1 масс.% и 20 масс.% ТЭОС (рН 2-3 или 7-8) с М, легированные 0,1 масс.% шихтой детонационного наноалмаза с добавкой бора; фитопротекторную – 20 масс. % ТЭОС (рН 7-8) с М, 2,5 масс.% ДНА и 1 масс.% ТЭОС (рН 2-3) с М, 0,1 масс.% TiO₂, а также 1 масс. % ТЭОС (рН 2-3) с М, глицерином и 0,1 масс.% TiO₂.

Оценка биологических свойств синтезированных аминокислотных производных фуллерена C₆₀ с треонином, с метионином, с цистеином и с гистидином показала, что они не обладают фунгистатической, фунгицидной, бактериостатической и бактерицидной способностью в отношении фитопатогенов: возбудителя сосудистого бактериоза капусты *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (штамм 5212) и возбудителя фузариоза *Fusarium graminearum* Schwabe. Так, оптическая плотность суспензии клеток *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* в присутствии каждой из указанных производных фуллерена во всем диапазоне испытуемых концентраций (0,01; 0,1; 10; 25; 50; 100; 150; 200 мг л⁻¹) достоверно не отличалась от контроля, в то время как эталонный вариант вещества с бактерицидными свойствами – тритон X-100 (конечная концентрация 0.1%) – вызывал значимое снижение оптической плотности бактериальной суспензии (табл. 4). Прорастание спор гриба *Fusarium graminearum* Schwabe в присутствии указанных производных фуллеренов не отличалось от такового в контроле и происходило с частотой 92-95%, давая хорошо заметные проростковые гифы.

Таблица 2. Численность микроорганизмов основных таксономических и функциональных физиологических групп на поверхности семян ярового ячменя сорта Ленинградский, предварительно обработанного кремнезолью на основе 1 масс% и 20 масс.% ТЭОС с добавками различных веществ, а также их суспензиями

Составы для обработки семян	Количество эпифитных микроорганизмов**×1000, КОЕ /г семян
-----------------------------	-----------------------------------------------------------

	бактерии, использующие органические формы азота ¹	бактерии, использующие минеральные формы азота ²	споро-образующие бактерии ³	актиноциеты ⁴	микромикеты ⁵	дрожжи ⁶
контроль (вода) – 1	300	8,5	133,5	0	0,0085	0,075
кремнезоль: 1 масс. % ТЭОС (рН 2–3) с макро- и микроэлементами (+М)	145*	67*	30*	0	0,0015*	0,0035*
кремнезоль: 20 масс. % ТЭОС (рН 2–3) +М	56,5*	5*	1,9*	0	0,0015*	0,0015*
кремнезоль: 1 масс. % ТЭОС (рН 7–8) +М	169*	2,5*	500*	0	0,005*	0*
кремнезоль: 20 масс. % ТЭОС (рН 7–8) +М	0,5*	0,065*	120,5	0	0*	0*
кремнезоль: 20 масс. % ТЭОС (рН 2–3) +М + 0,1 масс. % шихты детонационного наноалмаза, легированной В	137*	0,5*	30*	0	0,0015*	0*
0,1 масс. % шихты детонационного наноалмаза, \легированной В + М	500*	1,5*	75,5*	0	0,0015*	0,015*
контроль (вода) – 2	155	491	0,020	0,005	0,085	0
глицерин + М	232*	777*	0,005*	0	0,115*	0
0,1% диоксид титана (TiO ₂) + М	211*	421	0,005*	0	0,085	0
кремнезоль: 1 масс. % ТЭОС (рН 2–3) + М	232*	1245*	0,010*	0	0,055*	0
кремнезоль: 1 масс. % ТЭОС (рН 2–3) + М + глицерин	1211*	1003*	0,020	0	0,045*	0
кремнезоль: 1 масс. % ТЭОС (рН 2–3) +М + глицерин+0,1% TiO ₂	1376*	1550*	0,021	0,095*	0,065*	0

Примечание: расшифровка составов для обработки семян * – значение достоверно отличается от контрольного на 5%-м уровне значимости; ** – определение численности микроорганизмов осуществляли методом высева на твердые (глубинный (ТГ) или поверхностный посев (ТП)) или жидкие питательные среды (ЖС) (Теппер с соавт., 1987; Практикум по микробиологии 2005); ¹ – количество микроорганизмов на капустном агаре (ТГ), ² – на крахмало-аммиачном агаре (ТГ), ³ – на смеси сусло-агара и рыбо-пептонного агара (ТГ), ⁴ – на крахмало-аммиачном агаре (ТГ), ⁵ – на подкисленном сусло-агаре (ТП), ⁶ – на подкисленном сусло-агаре (ТП).

Таблица 3. Влияние предпосевной обработки семян ярового ячменя кремнезолями на основе ТЭОС с различными добавками на устойчивость растений к возбудителю корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) Drechsler ex Dastur

Варианты обработки семян	Число выживших растений, % от контроля без заражения	Масса одного растения				Балл поражения по шкале Гоймана (Гойман, 1954)
		без заражения		с заражением		
		г	% от контроля	г	% от контроля	
Ячмень сорта Ленинградский						
контроль	82*	0,061	100	0,050*	82*	4
1	94	0,026*	43*	0,042*	69*	3
2	71*	0,051	83	0,042*	69*	2
3	68*	0,047*	77*	0,047*	77*	2
4	71*	0,098*	161*	0,039*	64*	1
5	79*	0,046*	75*	0,100*	164*	2
Ячмень сорта Атаман						
контроль	125*	0,020	100	0,013*	65*	3
1	125*	0,040*	200*	0,058*	290*	2
2	83	0,017	85	0,034*	170*	3
3	83	0,050*	250*	0,033*	165*	1
4	67*	0,052*	260*	0,049*	245*	1
5	83	0,033*	165*	0,050*	250*	2

Примечание: контроль – дистил. вода; 1 – глицерин (Г) + макро- и микроэлементы (М); 2 – 0,1% диоксид титана (TiO₂) + М; 3 – 1 масс. % ТЭОС (рН 2–3) + М; 4 – 1 масс. % ТЭОС (рН 2–3) + М + Г; 5 – 1 масс. % ТЭОС (рН 2–3) + М + Г + 0,1% TiO₂; * – значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости.

Таблица 4. Изменение оптической плотности (OD₆₃₀) бактериальной суспензии штамма 5212 *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* при воздействии фуллеренов

Препараты	OD ₆₃₀	OD ₆₃₀ 1 час	OD ₆₃₀ 2 часа	OD ₆₃₀ 3 часа	Снижение OD ₆₃₀ за 3 часа (%)
	концентрация фуллеренов 0,01 мг л ⁻¹				
C ₆₀ с метионином	1,06	1,04	1,01	0,99	5,69
C ₆₀ с цистеином	1,01	0,99	0,97	0,96	5,45
C ₆₀ с гистидином	1,02	0,97	0,94	0,92	7,44
C ₆₀ с треонином	1,00	0,96	0,94	0,90	10,00
вода	1,03	1,01	0,97	0,96	7,08
трипон Х-100 (0,1%)**	1,03	0,97	0,81	0,61	40,66*
концентрация фуллеренов 200 мг л ⁻¹					
C ₆₀ с метионином	1,27	1,24	1,23	1,24	2,45
C ₆₀ с цистеином	1,22	1,19	1,18	1,18	2,97
C ₆₀ с гистидином	1,27	1,25	1,27	1,25	2,20
C ₆₀ с треонином	1,32	1,30	1,27	1,24	6,10
вода	1,24	1,21	1,19	1,20	2,51
трипон Х-100 (0,1%)**	1,37	1,31	1,07	0,85	37,82*

Примечание: ** – трипон Х-100 – эталонное вещество с бактерицидными свойствами; * – значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости

Однако в микровегетационных экспериментах при выращивании ярового ячменя под искусственными источниками света в течение 20 суток в присутствии в корнеобитаемой среде возбудителя корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) выявлено, что предпосевная обработка семян в растворе С₆₀ с метионином или С₆₀ с треонином (концентрация 10 мг л⁻¹) и наносоставами на его основе способствовала формированию в зараженном варианте биомассы растений на 7% или 9–28% выше, чем в незараженных контролях соответственно. При этом масса растений в контрольных зараженных вариантах в двух экспериментах снижалась на 23% и 36% соответственно, а в варианте с обработкой С₆₀ с цистеином – на 19% (табл. 5). Относительно фоновых

незараженных контролей снижение биомассы во всех вариантах опыта составило 7–24%.

Таким образом, созданные аминокислотные производные фуллерена С₆₀ с метионином и с треонином и наносоставы на их основе повышают устойчивость растений к фитопатогенным микроорганизмам вследствие активизации защитных систем самих растений, а не в результате прямого воздействия на фитопатогены. Кремнезольные наносоставы, очевидно, потенциально способны повышать устойчивость растений к поражению фитопатогенами не только за счет активизации иммунитета растений, но и посредством регуляции численности микроорганизмов на поверхности семян, в том числе, опосредованно, и потенциально патогенных.

Таблица 5. Влияние предпосевной обработки семян ярового ячменя сорта Ленинградский синтезированными аминокислотными производными С₆₀ с метионином, С₆₀ с цистеином, С₆₀ с треонином и разработанными наносоставами на его основе на устойчивость растений к возбудителю корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) Drechsler ex Dastur (два эксперимента)

Варианты опыта	Число выживших растений			Масса одного растения					Балл поражения по шкале Гоймана (Гойман, 1954)
	без заражения фитопатогеном, шт.	б заражением фитопатогеном, шт.	% от фонового контроля (незараженные растения)	без заражения		с заражением		% от фонового контроля (незараженные растения в каждом варианте обработки)	
				г	% от контроля	г	% от контроля		
Контроль-1	10	5	50*	0,31	100	0,24*	77*	77*	2
С ₆₀ с метионином	9	6	67*	0,42*	136*	0,33	107	79*	2
С ₆₀ с цистеином	11	6	55*	0,32	103	0,25*	81*	78*	2
Контроль-2	12	8	67*	0,94	100	0,60*	64*	63*	3
С ₆₀ с треонином	11	12	109	1,09*	116*	1,02	109	93	1
Наносостав 1 на основе С ₆₀ с треонином	10	12	120*	1,40*	149*	1,07*	114*	76*	1
Наносостав 2 на основе С ₆₀ с треонином	12	12	100	1,57	167*	1,20	128*	76*	1

Примечание: варианты обработки семян водными растворами веществ в течение 12 часов: контроль-1 и контроль-2 – дистиллированная вода в первом и во втором эксперименте; растворы С₆₀ с аминокислотой в концентрации 1,0 мг л⁻¹ воды; наносоставы 1 и 2 – (Отчет по проекту № 15-29-05837 офи_м за 2016); * – значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости.

ВЫВОДЫ

В серии лабораторных и вегетационных экспериментов установлено, что новые синтезированные аминокислотные производные фуллера С₆₀ с метионином, с цистеином, с треонином и с гистидином не обладают фунгистатической, фунгицидной, бактериостатической и бактерицидной способностью в отношении фитопатогенов: возбудителя сосудистого бактериоза капусты *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (штамм 5212) и возбудителя фузариоза *Fusarium graminearum* Schwabe., но повышают (фуллерен С₆₀ с треонином и с метионином) устойчивость растений к возбудителю корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.), по всей видимости, вследствие активизации защитных систем самих растений, а не в результате прямого воздействия на фитопатогены.

Выявлено, что кремнеземные золь-гель композиции способны повышать устойчивость растений к поражению фитопатогенами не только за счет активизации иммунитета растений, но и посредством регуляции численности микроорганизмов на поверхности семян, в том числе потенциально патогенных.

Показано, что усовершенствование состава кремнезоль на основе 1 масс. % и 20 масс. % тетраэтоксисилана (ТЭОС) (рН 2–3 и 7–8) с макро- и микроэлементами (М) путем введения диоксида титана (TiO₂) в форме анатаза, детонационного

наноалмаза (ДНА) или его шихты, легированной бором (АШ с В), а также глицерина обеспечивало усиление их фитопротекторных свойств и существенно повышало устойчивость ярового ячменя к поражению возбудителем корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) после обработки семян. При этом положительное влияние на выживаемость растений и их дальнейшее развитие оказывали варианты кремнезоль: 20 масс. % ТЭОС (рН 7–8) с М, 2,5 масс. % ДНА и 1 масс. % ТЭОС (рН 2–3) с М, 0,1 масс. % TiO₂, а также 1 масс. % ТЭОС (рН 2–3) с М, глицерином и 0,1 масс. % TiO₂.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований: проект № 15-29-05837 офи_м.

Семена ярового ячменя Ленинградский и Атаман получены из коллекции ФГБНУ ФИЦ ВИР, а штаммы изучаемых в работе фитопатогенов – из коллекций ВНИИ фитопатологии и ФГБНУ ФИЦ ВИР

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гойман Э. Инфекционные болезни растений. М.: Изд. Ил, 1954.
- Долматов В. Ю. Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение / М-во образования Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. технол. ин-т (техн. ун-т), ФГУП Спец. конструкт.-технол. бюро «Технолог». Санкт - Петербург: Професионал, 2011. 534 с.
- Забегалов Н. В., Дабахова Е. В. Влияние кремнийсодержащего нанопрепарата на урожайность и содержание кремния в зерновых культурах // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 12. С. 22–24.
- Игнатов А.Н. Генетическое разнообразие фитопатогенных ксантомонад вида *Xanthomonas campestris* и устойчивость к ним растений семейства Brassicaceae. Диссер. док биол. наук Москва, 2006
- Исакова А. А., Сафонов А. В., Александровская А. Ю., Галушко Т. Б., Инденбом А. В., Спицын Б. В. Влияние модифицирования поверхности наноалмазов на взаимодействие с бактериями *Pseudomonas putida* K12 // Физикохимия поверхности и защита материалов, 2017. Т. 53. № 2, С. 137–140.
- Каплуненко В. Г., Косинов Н. В., Бовсуновский А. Н. Нанотехнологии в сельском хозяйстве // Зерно. 2008. № 4(25). С. 47–54.
- Методика выполнения измерений всхожести семян и длины корней проростков высших растений для определения токсичности техногенно загрязненных почв М-П-2006 / Федеральный реестр ФР.1.39.2006.02264. Санкт-Петербург, 2009. 16 с.
- Методические указания по изучению устойчивости зерновых культур к корневым гнилям. Л.: ВАСХНИЛ, ВИР, 1976.
- Нетрусов А. И., Егорова М. А., Захарчук Л. М. Практикум по микробиологии / Ред. А. И. Нетрусова. М.: Изд. Центр «Академия», 2005. 608 с.
- Панова Г. Г., Канаеш Е. В., Семенов К. Н., Чарыков Н. А., Хомяков Ю. В., Аникина Л. М., Артемьева А. М., Корнюхин Д. Л., Вертебный В. Е., Синявина Н. Г., Удалова О. Р., Куленова Н. А., Блохина С. Ю. Производные фуллерена стимулируют продукционный процесс, рост и устойчивость к окислительному стрессу у растений пшеницы и ячменя. // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 1. С. 38–49. DOI: 10.15389/agrobiology.2018.1.38rus
- Панова Г. Г., Шилова О. А., Хамова Т. В., Аникина Л. М., Артемьева А. М., Корнюхин Д. Л., Удалова О. Р., Гусакова Л. П., Синявина Н. Г., Блохина С. Ю., Долматов В. Ю. Влияние наноконпозиционной кремнезольной оболочки на поверхности семян на начальные этапы развития растений // Агрофизика. 2017. № 2. С. 30–39.
- Полищук С. Д., Назарова А. А., Степанова И. А. Куцкир М. В., Чурилов Д. Г. Биологически активные препараты на основе наноразмерных частиц металлов в сельскохозяйственном производстве // Нанотехника. 2014. № 1(37). С. 72–81.
- Сёмина Ю. В., Щербакова Л. А., Слезина М. П., Одинцова Т. И. Исследование активности экстрактов семян *Chenopodium album* и культуральной жидкости *Fusariumsambucinum* против некоторых фитопатогенных грибов // Сельскохозяйственная биология. 2016. № 5. С. 739–745.
- Теплер Е. В., Шильникова В. К., Переверзева Г. И. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2004. 256 с.
- Федоренко В. Ф., Бухлагин Д. С., Голубев И. Г., Неменуцкая Л. А. Повышение урожайности сельскохозяйственных культур применением нанотехнологий. 2013. М.: ФГБНУ «Росинформагротех». 96 с.
- Филатова Л. Б. Лемкина Л. М. Кононова Л. И. Полюдова Т. В. Коробов В. П. Антибактериальное действие катионного пептида варнерина опосредовано активацией аутолитических систем атакуемых бактерий // Вестник Пермского университета. 2010. Вып. 1. С. 32–35.
- Фолманис Г. Е., Коваленко Л. В. Наноразмерные биологически активные материалы // Нанотехнологии: наука и производство. 2009. № 2(3). С. 58–59.
- Хамова Т. В., Шилова О. А., Власов Д. Ю., Рябушева Ю. В., Михальчук В. М., Иванов В. К., Франк-Каменецкая О. В., Маругин А. М., Долматов В. Ю. Биоактивные покрытия для каменных материалов на основе эпоксилоксановых зольей, модифицированных наноалмазами // Неорганические материалы. 2012. Т. 48. № 7. С. 803–810.
- Шилова О. А., Хамова Т. В., Панова Г. Г., Аникина Л. М. Способ предпосевной обработки семян ячменя. Патент РФ на изобретение № 2 618 143 от 02.02.2016. Опубликовано: 02.05.2017 Бюл. № 13.
- Шилова О. А., Хамова Т. В., Панова Г. Г., Аникина Л. М., Артемьева А. М., Кирюхин Д. Л. Использование золь гель технологии для обработки семян ячменя // Физика и химия стекла. 2018. Т. 44. № 1. С. 39–47. DOI: 10.1134/S108765961801011X.
- Azam A., AS., Ahmed M., Oves M. S. Khan and A. Memic Size-dependent antimicrobial properties of CuO nanoparticles against Grampositive and-negative bacterial strains. // Int. J. Nanomed., 2012, no. 7, pp. 3527–3535.
- Fedorenko V. F., Buklagin D. S., Golubev I. G., Nemenushchaya L. A. // Nanotechnologies in Russia, 2015, t. 10, no. 3–4, pp. 318–324.
- Huang, S., Wang, L., Liu, L. et al. Nanotechnology in agriculture, livestock, and aquaculture in China. A review // Agron. Sustain. Dev., 2015, no. 35, pp. 369. DOI: 10.1007/s13593-014-0274-x.
- Kah M., Hofmann T. Nanopesticide research: Current trends and future priorities. // Environment International, 2014, no. 63, pp. 224–35. DOI: 10.1016/j.envint.2013.11.015.

- Khan M. R. and Rizvi T. F. Nanotechnology: Scope and Application in Plant Disease Management // *Plant Pathology Journal*, 2014, no. 13 (3), pp. 214–231.
- Khot, L.R., S. Sankaran, J. M. Maja, R Ehsani, E. W. Schuster, Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. // *Crop Prot.*, 2012, no. 35, pp. 64–70.
- Kumar V, Yadav S. K. Plant-mediated synthesis of silver and gold nanoparticles and their applications // *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2009, no. 84, pp. 151–157.
- Nuruzzaman Md., Rahman M., Liu Y., Naidu R. Nanoencapsulation, Nano-Guard for Pesticides: A New Window for Safe Application // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, no. 64(7). DOI: 10.1021/acs.jafc.5b05214.
- Panova G. G., Ktitirova I. N., Skobeleva O. V., Sinjavina N. G., Charykov N. A., Semenov K. N. Impact of polyhydroxy fullerene (fullerol or fullerenol) on growth and biophysical characteristics of barley seedlings in favourable and stressful conditions // *Plant Growth Regulation*, 2016, v. 79(3), pp. 309–317.
- Prasad R., Kumar V., Prasad K. S. Nanotechnology in sustainable agriculture: Present concerns and future aspects // *African Journal of Biotechnology*, 2014, v. 13(6), pp. 705–713. DOI: 10.5897/AJBX2013.13554.
- Prasad R., Swamy V. S. Antibacterial activity of silver nanoparticles synthesized by bark extract of *Syzygium cumini*. // *J. Nanopart*, 2013. DOI: 10.1155/2013/431218.
- Semenov K. N., Meshcheriakov A. A., Charykov N. A., Dmitrenko M. E., Keskinov V. A., Murin I. V., Panova G. G., Sharoyko V. V., Kanash E. V., Khomyakov Yu. V. Physico-chemical and biological properties of C60-l-hydroxyproline water solutions // *RSC Adv.*, 2017, v. 7, pp. 15189–15200. DOI: 10.1039/C6RA26621E.
- Semenov K. N., Andrusenko E. V., Charykov N. A., Litasova E. V., Panova G. G., Penkova A. V., Murin I. V., Piotrovskiy L. B. Carboxylated fullerenes: physico-chemical properties and potential applications // *Progress in Solid State Chemistry*, 2017, v. 47–48, pp. 19–36. DOI: 10.1016/j.progsolidstchem.2017.09.001
- Schrand A. M., Ciftan Hens S. A., Shenderova O. A. Nanodiamond Particles: Properties and Perspectives for Bioapplications // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2009, no. 34, pp 8–74.
- Young K. J. Antifungal activity of silver ions and nanoparticles on phytopathogenic fungi. // *Plant Dis.*, 2009, no. 93(10), pp. 1037–1043.

REFERENCES

- Gojman E. H. *Infekcionnye bolezni rastenij*. [Infectious diseases of plants]. Moscow: Izd. II, 1954, 610 p.
- Dolmatov V. Yu. *Detonacionnye nanoalmazy. Poluchenie, svoystva, primeneniye*. [Detonation nanodiamonds. Reception, properties, application]. M-vo obrazovaniya Ros. Federacii, S.-Peterb. gos. tehnol. in-t (tehn. un-t), FGUP Spec. konstrukt.-tehnol. byuro «Tehnolog». Sankt-Peterburg: Professional, 2011. 534 p.
- Zabegalov N. V., Dabahova E. V. Vliyanie kremniisoderzhashego nanopreparata na urozhainost' i sodержanie kremniya v zernovykh kul'turah [Influence of silicon-containing nanopreparation on yield and silicon content in cereals] // *Dostizheniya nauki i tehniki APK*, 2011, no. 12, pp. 22–24.
- Ignatov A. N. *Geneticheskoe raznoobrazie fitopatogennykh ksantomonad vida Xanthomonas campestris i ustoychivost' k nim rastenii semeystva Brassicaceae*. Dissert. dokt. biol. nauk [The genetic diversity of phytopathogenic xanthomonas of the species Xanthomonas campestris and the resistance of plants of the family Brassicaceae. Dissert. dokt. biol. sci.] Moskva, 2006.
- Isakova A. A., Safonov A. V., Aleksandrovskaya A. Yu., Galushko T. B., Indenbom A. V., Spitsyn B. V. Vliyanie modifitsirovaniya poverhnosti nanoalmazov na vzaimodeystvie s bakteriyami *Pseudomonas putida* K12 [Influence of surface nanodiamonds modification on interaction with bacteria *Pseudomonas putida* K12] *Fizikohimiya poverhnosti i zashita materialov*, 2017, v. 53, no. 2, pp. 137–140.
- Kaplunenko V. G., Kosinov N. V., Bovsunovskiy A. N. Nanotekhnologii v sel'skom khozyaystve [Nanotechnologies in agriculture] // *Zerno*, 2008, no. 4(25), pp. 47–54.
- Metodika vypolneniya izmerenij vskhozhesti semyan i dliny kornej prorostkov vysshih rastenij dlya opredeleniya toksichnosti tekhnogennno zagryaznennykh pochv. [Method of measurements of seed germination and root length of higher plants seedlings to determine the toxicity of technogenically polluted soil]. M-P-2006 / Federal'nyy reestr FR.1.39.2006.02264. Sankt-Peterburg, 2009. 16 p.
- Metodicheskie ukazaniya po izucheniyu ustoychivosti zernovykh kul'tur k kornevym gnilyam / Grigor'ev M. F. [Methodical instructions of studying the stability of grain crops to root rot]. Leningrad: VIR, 1976, 59 p.
- Netrusov A. I., Yegorova M. A., Zakharchuk L. M. *Praktikum po mikrobiologii* [Practical methods of microbiology] / Red. A. I. Netrusova. Moscow: Izd. Tsentr «Akademiya», 2005. 608 p.
- Panova G. G., Semenov K. N., Shilova O. A. Homyakov Yu. V., Anikina L. M., Charykov N. A., Artem'eva A. M., Kanash E. V., Hamova T. V., Udalovala O. R. Vodorastvorimye proizvodnye fullerenov i kremnezol'nye nanokompozitsii kak perspektivnye nanomaterialy dlya ispol'zovaniya v rastenievodstve [Water-soluble derivatives of fullerenes and silica-nanocomposites as promising nanomaterials for applying in crop production] // *Agrofizika*, 2015, no. 4, pp. 37–48.
- Panova G. G., Shilova O. A., Khamova T. V., Anikina L. M., Artem'eva A. M., Korniyukhin D. L., Udalovala O. R., Gusakova L. P., Sinyavina N. G., Blokhina S. YU., Dolmatov V. YU. Vliyaniye nanokompozitsionnoy kremnezol'noy obolochki na poverkhnosti semyan na nachal'nyye etapy razvitiya rasteniy [Influence of nanocomposite silica shell on the seed surface on the initial stages of plant development] // *Agrofizika*, 2017, no. 2, pp. 30–39.

- Polishchuk S. D., Nazarova A. A., Stepanova I. A., Kutsir M. V., Churilov D. G. Biologicheski aktivnyye preparaty na osnove nanorazmernykh chastits metallov v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Biologically active preparations based on nanosized metal particles in agricultural production] // *Nanotekhnika*, 2014, no. 1(37), pp. 72–81.
- Semin YU V., Shcherbakov L. A., Slezin M. P., Odintsov T. I. Issledovaniye aktivnosti ekstraktov semyan *Chenopodium album* i kul'tural'noy zhidkosti *Fusariumsambucinum* protiv nekotorykh fitopatogennykh gribov [Study of the activity of seed extracts of *Chenopodium album* and *Fusariumsambucinum* culture fluid against some phytopathogenic fungi] // *Sel'khozbiologiya*, 2016, no 5, pp 739–745.
- Tepper Ye. V., Shil'nikova V. K., Pereverzeva G. I. *Praktikum po mikrobiologii* [Practical methods of microbiology]. Moscow: Drofa, 2004. 256 P.
- Fedorenko V. F., Bukhlagin D. S., Golubev I. G., Nemenushchaya L. A. Povysheniye urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur primeneniye nanotekhnologiy [Increase in the yield of agricultural crops using nanotechnology]. Moscow: FGBNU «Rosinformagrotekh», 2013. 96 p.
- Filatova L. B., Lemkina L. M., Kononova L. I., Polyudova T. V., Korobov V. P. Antibakterial'noye deystviye kationnogo peptida varnerina oposredovano aktivatsiyey autoliticheskikh sistem atakuyemykh bakteriy [The antibacterial effect of the cationic peptide varnerina is mediated by the activation of autolytic systems of attacked bacteria] // *Vestnik Permskogo universiteta*, 2010, vyp. 1, pp. 32–35.
- Folmanis G. Ye., Kovalenko L. V. Nanorazmernyye biologicheski aktivnyye materialy [Nanoscale Biologically Active Materials] // *Nanotekhnologii: nauka i proizvodstvo*, 2009, no. 2(3), pp. 58–59.
- Khamova T. V., O. A. Shilova, Vlasov D. Yu., Ryabusheva Yu. V., Mikhail'chuk V. M., Ivanov V. K., Frank-Kamenetskaya O. V., Marugin A. M., Dolmatov V. YU. Bioaktivnyye pokrytiya dlya kamennykh materialov na osnove epoksisiloksanovykh zoley, modifitsirovannykh nanoalmazami [Bioactive coatings for stone materials based on epoxysiloxane sols modified with nanodiamonds] // *Neorganicheskiye materialy*, 2012, t. 48, no. 7, pp. 803–810.
- Shilova O. A., Khamova T. V., Panova G. G., Anikina L. M. *Sposob predposevnoy obrabotki semya yachmeny* [Metod of pre-treating processing of barley seeds]. Patent RF na izobreteniyе, no. 2 618 143 ot 02.02.2016. Opublikovano: 02.05.2017 Byul., no. 13.
- Azam A., AS., Ahmed M., Oves M. S. Khan and A. Memic Size-dependent antimicrobial properties of CuO nanoparticles against Grampositive and-negative bacterial strains. // *Int. J. Nanomed.*, 2012, no. 7, pp. 3527–3535.
- Fedorenko V. F., Bukhlagin D. S., Golubev I. G., Nemenushchaya L. A. // *Nanotechnologies in Russia*, 2015, t. 10, no. 3–4, pp. 318–324.
- Huang, S., Wang, L., Liu, L. et al. Nanotechnology in agriculture, livestock, and aquaculture in China. A review // *Agron. Sustain. Dev.*, 2015, no. 35, pp. 369. DOI: 10.1007/s13593-014-0274-x.
- Kah M., Hofmann T. Nanopesticide research: Current trends and future priorities. // *Environment International*, 2014, no. 63, pp. 224–35. DOI 0.1016/j.envint.2013.11.015.
- Khan M. R. and Rizvi T. F. Nanotechnology: Scope and Application in Plant Disease Management // *Plant Pathology Journal*, 2014, no. 13 (3), pp. 214–231.
- Khot, L. R., S. Sankaran, J. M. Maja, R. Ehsani, E. W. Schuster, Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. // *Crop Prot.*, 2012, no. 35, pp. 64–70.
- Kumar V, Yadav S. K. Plant-mediated synthesis of silver and gold nanoparticles and their applications // *J. Chem. Technol. Biotechnol*, 2009, no. 84, pp. 151–157.
- Nuruzzaman Md., Rahman M. M., Liu Y., Naidu R. Nanoencapsulation, Nano-Guard for Pesticides: A New Window for Safe Application // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, no. 64(7). DOI: 10.1021/acs.jafc.5b05214.
- Panova G. G., Ktirova I. N., Skobeleva O. V., Sinjavina N. G., Charykov N. A., Semenov K.N. Impact of polyhydroxy fullerene (fullerol or fulleranol) on growth and biophysical characteristics of barley seedlings in favourable and stressful conditions // *Plant Growth Regulation*, 2016, v. 79(3), pp. 309–317.
- Prasad R., Kumar V., Prasad K. S. Nanotechnology in sustainable agriculture: Present concerns and future aspects // *African Journal of Biotechnology*, 2014, v. 13(6), pp. 705–713. DOI: 10.5897/AJBX2013.13554.
- Prasad R., Swamy V. S. Antibacterial activity of silver nanoparticles synthesized by bark extract of *Syzygium cumini*. // *J. Nanopart*, 2013. DOI: 10.1155/2013/431218.
- Semenov K. N., Meshcheriakov A. A., Charykov N. A., Dmitrenko M. E., Keskinov V. A., Murin I. V., Panova G. G., Sharoyko V. V., Kanash E. V., Khomyakov Yu. V. Physico-chemical and biological properties of C60-l-hydroxyproline water solutions // *RSC Adv.*, 2017, v. 7, pp. 15189–15200. DOI: 10.1039/C6RA26621E.
- Semenov K. N., Andrusenko E. V., Charykov N. A., Litasova E. V., Panova G.G., Penkova A.V., Murin I.V., Piotrovskiy L.B. Carboxylated fullerenes: physico-chemical properties and potential applications // *Progress in Solid State Chemistry*, 2017, v. 47–48, pp. 19–36. DOI: 10.1016/j.progsolidstchem.2017.09.001
- Schrand A. M., Ciftan Hens S. A., Shenderova O. A. Nanodiamond Particles: Properties and Perspectives for Bioapplications // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2009, no. 34, pp. 18–74.
- Young K.J. Antifungal activity of silver ions and nanoparticles on phytopathogenic fungi // *Plant Dis.*, 2009, no. 93(10), pp. 1037-1043.
- Shilova, O. A., Khamova, T. V., Panova, G. G. et al. Using the Sol–Gel Technology for the Treatment of Barley Seeds // *Glass Phys Chem.*, 2018, no. 44, p. 26. DOI:10.1134/S108765961801011X.