

УГЛЕРОДНЫЕ И КРЕМНЕЗОЛЬНЫЕ НАНОСОСТАВЫ В ЗАЩИТЕ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ ОТ БОЛЕЗНЕЙ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ***А.М. ШПАНЕВ¹ ✉, Е.С. ДЕНИСЮК¹, О.А. ШИЛОВА², К.Н. СЕМЕНОВ³,
Г.Г. ПАНОВА¹**

Яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) — основная зернофуражная культура, ежегодно занимающая около 40 % посевных площадей на Северо-Западе России. В последние годы в мировой и отечественной науке обозначился явный интерес к использованию в защите растений наноматериалов и нанотехнологий, который обусловлен их уникальными свойствами и высокой эффективностью в низких концентрациях. В настоящей работе впервые показано влияние углеродных и кремнезольных наносоставов на семенную инфекцию, а также поражение растений ярового ячменя корневыми гнилями и листовыми болезнями. Показано, что более сильный защитный эффект проявился при применении наносоставов на сорте ярового ячменя Атаман с более длительным периодом вегетации и большей восприимчивостью к основным болезням. Впервые установлено наличие аддитивного эффекта при комбинированной обработке семян и вегетирующих растений наносоставами с химическими или биологическими фунгицидами с потенциальной возможностью снижения дозировки последних. Нашей целью было изучение эффективности новых композиций на основе углеродных и кремнезольных наноматериалов в защите ярового ячменя от болезней на Северо-Западе Российской Федерации. Исследования проводили на экспериментальной базе Меньковского филиала ФГБНУ АФИ (Гатчинский р-н, Ленинградская обл.) в 2017-2018 годах. На первом этапе исследований в 2017 году была изучена эффективность двух перспективных наносоставов для защиты ярового ячменя от корневых гнилей и листовых болезней. На разных по срокам вегетации сортах Ленинградский и Атаман были заложены два опыта — по обработке наносоставами посевного материала и вегетирующих растений. Кремнезольная композиция НКТэос была синтезирована по оригинальной золь-гель технологии (на основе кислотного гидролиза с последующей поликонденсацией тетраэтилового эфира ортокремниевой кислоты или тетраэтоксисилана, с добавками в золь растворов солей макро- и микроэлементов и допантов — шихты детонационного наноалмаза, легированной бором, или диоксида титана в форме анатаза). Подготовку наносостава на основе производных фуллерена с метионином или треонином осуществляли посредством растворения в воде соединений микроэлементов и добавления 0,001 % (при обработке семян) или 0,00001 % (при некорневой обработке) раствора аминокислотного производного фуллерена C₆₀ с треонином или с метионином. Варианты опыта включали совместное применение наносоставов с химическими и биологическими фунгицидами, а также фунгицидов с кремнийсодержащим хелатным микроудобрением. Зараженность зерна фитопатогенами определяли с использованием питательных сред. Учет развития корневых гнилей проводили в фазы всходов, кушения, выхода в трубку и колошения, листовых болезней — в фазу начала колошения ячменя, далее через 10, 20 и 30 сут. На втором этапе исследований в 2018 году оценивали эффективность технологической схемы применения новых наносоставов в защите ярового ячменя сорта Ленинградский от болезней. Опыт включал два блока: с обработкой наносоставами семенного материала, с обработкой семян и вегетирующих растений. Показано, что изученные наносоставы в чистом виде оказались малоэффективны в защите ярового ячменя от корневых гнилей и листовых болезней. Снижение развития корневых гнилей на раннеспелом сорте Ленинградский не превышало 5,3 %, на сорте Атаман составляло 15,3-57,7 % ($p < 0,05$). Развитие основного заболевания культуры — гельминтоспориозных пятнистостей на двух верхних листьях растений ячменя сорта Ленинградский снижалось на 16-22 %, сорта Атаман — на 20-42 % ($p < 0,05$). Исходя из полученных результатов опыта с обработкой посевного материала можно предположить, что влияние кремнезольной композиции более длительно, поскольку распространялось на развитие гельминтоспориозных пятнистостей листьев (снижение пораженности на 7,5-15,4 % относительно контроля, $p < 0,05$), и обусловлено способностью активизировать метаболизм и иммунитет растений, тогда как действие наносостава на основе аминокислотного производного фуллерена C₆₀ с метионином в большей степени проявляется за счет снижения семенной инфекции и первичных признаков заражения в период появления всходов ячменя. Наилучшим вариантом защиты ярового ячменя от болезней корневой системы и листового аппарата признана комбинированная обработка семян кремнезольным наносоставом и химическим фунгицидом Иншур Перформ, КС в сочетании с 3-кратной обработкой вегетирующих

* Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального бюджетного государственного научного учреждения «Агрофизический научно-исследовательский институт» из средств Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, этап № 0667-2019-0013 в части обеспечения проведения вегетационных и полевых экспериментов и при частичной финансовой поддержке РФФИ № 15-29-05837офи_м в части создания биологически активных угле-родных и кремнезольных наносоставов и изучения их влияния на физиологическое состояние растений.

растений наносоставом на основе аминокислотного производного фуллера C_{60} с треонином и однократной — химическим фунгицидом Зантара, КЭ. Снижение нормы применения химического препарата целесообразно только в условиях ожидаемого слабого проявления болезней. Высокую биологическую и хозяйственную эффективность, сопоставимую с результатом фунгицидной обработки со 100 % нормой применения препарата, обеспечивало комбинированное использование микроудобрения КХМ-Г и фунгицида (50 % норма применения), а также наносостава на основе аминокислотного производного фуллера C_{60} с метионином и фунгицида (50 % норма применения).

Ключевые слова: яровой ячмень, корневые гнили, листовые болезни, средства защиты растений, фунгициды, наноматериалы, фуллерен C_{60} , аминокислотные производные, метионин, треонин, кремнезоли, тетраэтоксисилан, допанты, шихта детонационного наноалмаза, диоксид титана, анатаз.

В последние годы в мировой и отечественной науке обозначился явный интерес к использованию в сельском хозяйстве наноматериалов и нанотехнологий, обусловленный их уникальными свойствами и высокой эффективностью в низких концентрациях (1-3). За счет малых размеров и электронейтральности наноматериалы легко проникают через мембрану клетки, а вследствие значительной удельной поверхности имеют большую реакционную способность (4-6). К перспективным наноматериалам, потенциально способным повысить устойчивость растений к стрессорам биотической и абиотической природы, относят углеродные и кремнезольные наносоставы (7-8).

Углеродные наносоставы представляют собой композиции на основе водорастворимых производных фуллера C_{60} или C_{70} и ряда микроэлементов, а также физиологически активных соединений (9, 10). В последнее время растет число новых синтезированных амино-, карбокси-, полигидрокси- и других производных фуллеренов, представляющих собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из четного числа трехкоординированных атомов углерода (11). Со времени своего открытия в 1985 году, отмеченного Нобелевской премией по химии за 1994 год, фуллерены и их производные все шире используются в технике, в медицинской химии для создания на их основе лекарственных веществ, в косметологии (12-14).

Мезопористые носители на основе кремнезема, так называемые мезопористые силикатные материалы, стали объектом многочисленных исследований, с тех пор как компания «Mobil Oil» (США) в 1992 году осуществила синтез мезопористых материалов диоксида кремния с упорядоченной структурой мезопор, узким распределением пор по размеру, высокой удельной поверхностью (15, 16). В отличие от уже известной в то время микропористой структуры цеолитов (диаметр пор около 1,5 нм), мезопористые материалы имеют размер пор около 3-5 нм. Этот класс материалов послужил прототипом для дальнейшей разработки нанопористых структур на основе кремнезема, в том числе созданных по оригинальной золь-гель технологии (17) кремнезольных матриц с включением органических молекул, наноразмерных частиц металлов, их оксидов, наноалмазов, углеродных нанотрубок, обеспечивающих усиление функциональных характеристик кремнезелей.

В Агрофизическом научно-исследовательском институте (АФИ) совместно с сотрудниками Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета (ПСПбГМУ), Института химии силикатов (ФГБУН ИХС РАН) разработаны биологически активные наносоставы: комплексные микроудобрения на основе водорастворимых производных фуллеренов C_{60} (18, 19), а также кремнезольные наноконпозиции на основе тетраэтоксисилана с введенными в их состав растворами макро- и микроэлементов, допированных шихтой детонационного наноалмаза или диоксидом титана в форме

анатаза (20-22). Водные суспензии детонационного наноалмаза или шихты представляют особый интерес как прекурсоры композиционных материалов или как биологически активные добавки, поскольку коллоидные углеродные наночастицы в водной дисперсионной среде наиболее химически активны (23). Наряду с этим детонационный наноалмаз и его шихта, легированная бором, а также ряд наночастиц металлов (намагниченное железо, алюминий, медь, золото, серебро, кремний, цинк и оксид цинка, диоксид титана, оксид церия и др.) обладают биоцидными свойствами в отношении бактерий, вирусов и микромицетов. Их включение в состав кремнезольей перспективно для усиления фитопротекторной функции (24-26).

В основу создания препаратов были положены следующие принципы: экологическая безопасность, простота технологического процесса, низкая себестоимость, эффективность в малых дозах и доступность растениям. В регулируемых и полевых условиях установлено влияние некорневой обработки наносоставами на основе производных фуллеренов на рост, развитие, продуктивность зерновых и ряда овощных культур, их устойчивость к окислительному стрессу (18, 19), а также показана способность образовывать пленку (оболочку) вокруг семени при обработке семян кремнезольями на основе тетраэтоксисилана (21, 22). Присутствие на поверхности семян оболочки с подобранным качественным и количественным составом компонентов обеспечивала стимуляцию роста растений на начальных этапах их развития (21, 22).

С наличием свойств иммуномодуляторов и адаптогенов связаны большие перспективы использования полученных наносоставов в защите культурных растений от фитопатогенов. Получены первые сведения, касающиеся положительного влияния обработки семян ярового ячменя производными фуллерена C_{60} с метионином и треонином, а также их наносоставами на устойчивость растений к поражению возбудителем корневой гнили *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) Drechsler ex Dastur (20). При этом механизм их воздействия не связан с регулированием численности микроорганизмов на поверхности семян. По всей видимости, он обусловлен способностью активировать метаболизм и антиоксидантные способности растений (20). В то же время выявлено, что золь-гель композиции способны повышать устойчивость растений к поражению фитопатогенами не только за счет активации иммунитета растений, но и посредством регуляции численности микроорганизмов, в том числе потенциально патогенных, на поверхности семян (20).

В настоящее время ведется широкое изучение перспектив использования нанопрепаратов в защите растений от вредных организмов (27-28). В Северо-Западном регионе России такие исследования востребованы для многих сельскохозяйственных культур, в том числе для ярового ячменя, который ежегодно занимает около 40 % посевных площадей (29).

В настоящей работе впервые показано влияние углеродных и кремнезольных наносоставов на семенную инфекцию, а также поражение растений ярового ячменя корневыми гнилями и листовыми болезнями. Показано, что более сильный защитный эффект проявился при применении наносоставов на сорте ярового ячменя Атаман с более длительным периодом вегетации и большей восприимчивостью к основным болезням. Впервые установлено наличие аддитивного эффекта при комбинированной обработке семян и вегетирующих растений наносоставами с химическими или биологическими фунгицидами с потенциальной возможностью снижения дозировки последних.

Нашей целью было изучение эффективности новых композиций на

основе углеродных и кремнезольных наноматериалов в защите ярового ячменя от болезней на Северо-Западе Российской Федерации.

Методика. Исследования проводили на экспериментальной базе Меньковского филиала ФГБНУ АФИ (Гатчинский р-н, Ленинградская обл.) в 2017-2018 годах. Почва опытных полей — дерново-слабоподзолистая супесчаная. Мощность пахотного слоя — 23 см, содержание органического вещества — 0,70-0,77 %, подвижных соединений фосфора и калия (по Кирсанову) — соответственно 266-298 и 153-167 мг/кг, рН_{KCl} 5,1-5,7.

На первом этапе работы в 2017 году оценивали эффективность двух перспективных наносоставов для защиты ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) от корневых гнилей и листовых болезней. В соответствии с методическими указаниями (30) на разных по срокам вегетации сортах Ленинградский (64-75 сут) и Атаман (79-98 сут) были заложены два опыта: по обработке наносоставами посевного материала и вегетирующих растений.

Варианты опыта по оценке эффективности предпосевной обработки семян наносоставами были следующими: 1 — контроль (обработка водой); 2 — Иншур Перформ, КС (Insure™ Perform, «BASF», Германия; 0,4 л/т); 3 — Иншур Перформ, КС (0,2 л/т); 4 — кремнезольная композиция на основе 1 масс.% тетраэтоксисилана с макро- и микроэлементами и шихтой детонационного наноалмаза (НКтэос) (1,0 л/т); 5 — композиция производного фуллерена с метионином и микроэлементами (НФм) (1,0 л/т); 6 — НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т); 7 — НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,2 л/т); 8 — НФм (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т); 9 — НФм (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,2 л/т); 10 — Витаплан, СП (группа компаний «АгроБиоТехнология», Россия; 20 г/т); 11 — НКтэос (1,0 л/т) + Витаплан, СП (20 г/т); 12 — НФм (1,0 л/т) + Витаплан, СП (20 г/т).

Кремнезольная композиция НКтэос была синтезирована по оригинальной золь-гель технологии (21, 22) на основе кислотного гидролиза с последующей поликонденсацией тетраэтилового эфира ортокремниевой кислоты (ТЭОС), с добавками в золь растворов солей макро- и микроэлементов и допантов — шихты детонационного наноалмаза, легированной бором, или диоксида титана в форме анатаза. Состав кремнезольей: 1 об.% ТЭОС + раствор микроэлементов (рН 2-3) + 0,1 % шихты в форме анатаза с бором или 0,1 % TiO₂. В состав раствора макро- и микроэлементов входили соединения N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, B, Zn, Cu и Mn (21, 22). Шихта детонационного наноалмаза обогащалась бором непосредственно в процессе взрыва *in situ* и содержала 0,96 % бора, 14,7 % детонационного наноалмаза, 80,84 % неалмазных форм углерода и 0,96 % несоразмерных примесей (25).

Подготовку наносостава на основе производных фуллерена с треонином (НФтр) или метионином (НФм) осуществляли посредством растворения в воде соединений микроэлементов и добавления 0,001 % (при обработке семян) или 0,00001 % (при некорневой обработке) раствора аминокислотного производного фуллерена C₆₀ с треонином или метионином (9).

Концентрации золя, как и растворов аминокислотных производных фуллерена C₆₀ с треонином или метионином (10,0 мг/л при обработке семян и 0,1 мг/л при обработке вегетирующих растений), были выбраны по результатам оценки реакций растений в вегетационных экспериментах на агробиополигоне ФГБНУ АФИ (19-21).

В качестве химического фунгицида для обработки семян (эталон) использовали препарат Иншур Перформ, КС, расход рабочей жидкости — 10 л/т. В продолжение наших предыдущих исследований (31, 32) опыт

включал вариант с протравливанием посевного материала биофунгицидом Витаплан, СП.

Предпосевную обработку семян ячменя осуществляли разработанным ранее способом (21). Семена замачивали при постоянном перемешивании с помощью магнитной мешалки UED-20 («UED Group», Россия) в воде (контроль) или в растворе кремнезоля в течение 10 мин, после чего высушивали при комнатной температуре на воздухе до высыхания и затем при 30 °С в течение 50 мин в сушильном шкафу ШС-80-01 МК СПУ (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия). Обработанные семена хранили при комнатной температуре в течение 2 сут перед посевом. Обработка семенного материала химическими и биологическими препаратами осуществлялась с помощью установки Nege 11 («Wintersteiger AG», Австрия), предназначенного для влажного протравливания малых партий семян.

Размер делянки в опыте составлял 2 м², размещение рандомизированное, повторность 4-кратная. Предшественником была озимая рожь (*Secale cereale* L.) сорта Славия. Посев осуществляли вручную.

В этом и всех описанных далее опытах обработка почвы включала зяблевую вспашку и предпосевную культивацию. Перед посевом вносили аммиачную селитру из расчета 60 кг/га д.в., в фазу кушения ячменя проводили обработку гербицидом Секатор, ВДГ (Sekator, «Bayer CropScience», Германия; 0,15 кг/га). Норма высева — 5 млн всхожих семян/га. Учет урожая состоял из отбора снопов с учетной площадки 1 м² на каждой делянке в фазу полной спелости ярового ячменя. В лабораторных условиях определяли основные элементы структуры урожая: густоту продуктивного стеблестоя, массу зерна с колоса и массу 1000 зерен.

Зараженность зерна фитопатогенами определяли с использованием питательных сред (33). Учет развития корневых гнилей проводили согласно соответствующим методическим указаниям (30) на 30 растениях с каждой делянки в фазы всходов, кушения, выхода в трубку и колошения.

Схема опыта по оценке эффективности обработки вегетирующих растений наносоставами была следующей: 1 — контроль (обработка растений водой); 2 — Зантара, КЭ (Zantara, «Bayer CropScience», Германия; 0,8 л/га); 3 — Зантара, КЭ (0,4 л/га); 4 — кремнийсодержащее хелатное микроудобрение КХМ-Г (3,0 л/га); 5 — НФм (1,0 л/га); 6 — НФтр (1,0 л/га); 7 — КХМ-Г (3,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,8 л/га); 8 — КХМ-Г (3,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,4 л/га); 9 — НФм (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,8 л/га); 10 — НФм (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,4 л/га); 11 — НФтр (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,8 л/га); 12 — НФтр (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,4 л/га).

Кремнийсодержащее хелатное микроудобрение КХМ-Г, разработанное в ФГБНУ АФИ (34), — экологически безопасный биостимулятор и индуктор устойчивости растений, основными действующими компонентами которого служат кремний, микроэлементы и хелатирующий агент (гумусовые кислоты, выделенные из верхового торфа низкой степени разложения). Массовая доля гумусовых кислот составляла 0,12, Fe — 9,7, В — 2,07, Mn — 1,66, Si — 5,33, Cu — 1,60, Co — 1,76, Zn — 1,66, Mo — 3,85, S — 8,17 %. Обработку проводили с нормой применения рабочей жидкости 300 л/га.

В качестве эталона использовали химический фунгицид для обработки вегетирующих растений Зантара, КЭ, расход рабочей жидкости — 300 л/га. Повторность обработок для микроудобрения и наносоставов — 3-кратная, начиная с фазы кушения с интервалом 7 сут, для химического фунгицида — однократная в фазу начала колошения ячменя.

Размер делянки составлял 10 м², размещение рандомизированное,

повторность 4-кратная, предшественник — озимая рожь сорта Славия. Посев осуществляли сеялкой Lemken soliter («Lemken GmbH & Co. KG», Германия), норма высева — 5 млн всхожих семян/га. Растения обрабатывали с помощью ранцевого опрыскивателя Solo 475P («Solo Kleinmotoren GmbH», Германия).

Учеты развития листовых болезней проводили в фазу начала колошения ячменя, далее через 10, 20 и 30 сут на 10 стеблях в трех местах на каждой делянке в соответствии с методическими указаниями (30)

На втором этапе исследований в 2018 году оценивали эффективность технологической схемы применения новых наносоставов в защите ярового ячменя сорта Ленинградский от болезней. Опыт включал два блока: первый — с обработкой наносоставами семенного материала, второй — с обработкой семян и вегетирующих растений.

Блок А включал варианты с обработкой семян препаратами и вегетирующих растений — водой: 1 — контроль (обработка семян водой) + вода; 2 — Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) + вода; 3 — Иншур Перформ, КС (0,2 л/т) + вода; 4 — НКтэос (1,0 л/т) + вода; 5 — НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) + вода; 6 — НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,2 л/т) + вода.

Блок Б составляли варианты с обработкой семян препаратами и вегетирующих растений — раствором наносостава на основе аминокислотного производного фуллерена C₆₀ с треонином (НФтр) в выбранной ранее концентрации 0,1 мг/л: 7 — обработка семян водой + обработка растений НФтр (1,0 л/га); 8 — Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) + НФтр (1,0 л/га); 9 — Иншур Перформ, КС (0,2 л/т) + НФтр (1,0 л/га); 10 — НКтэос (1,0 л/т) + НФтр (1,0 л/га); 11 — НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) + НФтр (1,0 л/га); 12 — НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) + НФтр (1,0 л/га).

Подготовку наносоставов, обработку ими семян и растений проводили теми же способами, что и в предыдущих опытах. Повторность обработок растений наносоставами — 3-кратная, начиная с фазы кущения, с интервалом 7 сут. Размер делянки в опыте составлял 2 м², размещение рандомизированное, повторность 4-кратная. Предшественник — озимая пшеница сорта Московская 56. Посев осуществляли вручную. Растения обрабатывали с помощью ранцевого опрыскивателя Solo 475P.

Статистическую обработку полученных данных осуществляли с использованием дисперсионного анализа в программе Statistica 6.0 («StatSoft, Inc.», США). При расчетах применяли методы параметрической статистики на основе средних значений (M) и стандартных ошибок средних ($\pm SEM$), 95 % доверительных интервалов, наименьшей существенной разности НСР при $p < 0,05$ (НСР₀₅).

Результаты. Семенная инфекция выступает в качестве первичного очага заражения корневой системы растений. Фитоэкспертиза посевного материала показала наличие аддитивного эффекта от комбинированного использования химического фунгицида Иншур Перформ, КС в полной норме применения с испытуемыми углеродными и кремнезольными наносоставами в отношении гриба *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) Drechsler ex Dastur — основного возбудителя гельминтоспориозно-фузариозной корневой гнили (табл. 1). Кроме того, была отмечена высокая эффективность кремнезольной композиции в отношении грибов рода *Fusarium* (85,7–100 %). Эффекты от применения биопрепарата Витаплан, СП, в том числе совместно с наносоставами, были нестабильными и касались в основном

грибов *Fusarium* spp. и *Alternaria* spp. Полученные результаты согласуются с опубликованными ранее данными о практическом отсутствии биоцидного эффекта изучаемых углеродных и кремнезольных композиций в отношении *C. sativus* (20).

1. Эффективность обработки семян ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) двух сортов наносоствами, химическим, биологическим фунгицидами и их комбинациями в защите от семенной инфекции ($n = 10$, $M \pm SEM$; Ленинградская обл., 2017 год)

| Вариант | Сорт | Микобиота | | | | | |
|---|-------------------------|-----------------------------|-------|----------------------|-------|------------------------|-------|
| | | патогенная | | | | сапротрофная | |
| | | <i>Cochliobolus sativus</i> | | <i>Fusarium</i> spp. | | <i>Alternaria</i> spp. | |
| | | Р, % | БЭ, % | Р, % | БЭ, % | Р, % | БЭ, % |
| 1. Контроль (вода) | Л | 23,0±3,26 | | 3,3±0,87 | | 37,0±5,24 | |
| | А | 47,0±4,87 | | 7,0±2,04 | | 41,0±6,02 | |
| 2. Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) | Л | 8,0±2,22 | 65,2 | 0,0 | 100,0 | 4,0±0,79 | 89,2 |
| | А | 29,0±4,41 | 38,3 | 0,0 | 100,0 | 19,0±5,25 | 53,7 |
| 3. Иншур Перформ, КС (0,2 л/т) | Л | 22,0±2,98 | 4,3 | 0,0 | 100,0 | 13,0±2,88 | 64,9 |
| | А | 43,0±4,68 | 8,5 | 9,0±2,54 | 0,0 | 38,0±4,54 | 7,3 |
| 4. НКтэос (1,0 л/т) | Л | 40,0±4,75 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 34,0±4,87 | 8,1 |
| | А | 45,0±5,25 | 4,3 | 1,0±0,25 | 85,7 | 48,0±5,81 | 0,0 |
| 5. НФм (1,0 л/т) | Л | 48,0±5,98 | 0,0 | 6,0±1,94 | 0,0 | 17,0±2,91 | 54,1 |
| | А | 43,0±4,75 | 8,5 | 5,0±1,65 | 28,6 | 47,0±5,64 | 0,0 |
| 6. НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) | Л | 2,0±0,31 | 91,3 | 0,0 | 100,0 | 27,0±5,04 | 27,0 |
| | А | 29,0±4,47 | 38,3 | 0,0 | 100,0 | 8,0±2,34 | 80,5 |
| 7. НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,2 л/т) | Л | 17,0±2,88 | 26,1 | 0,0 | 100,0 | 16,0±2,88 | 56,8 |
| | А | 52,0±5,03 | 0,0 | 2,0±0,38 | 71,4 | 18,0±3,05 | 56,1 |
| 8. НФм (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) | Л | 5,0±1,14 | 78,3 | 0,0 | 100,0 | 15,0±2,54 | 59,5 |
| | А | 22,0±3,05 | 53,2 | 4,0±0,95 | 42,9 | 6,0±1,85 | 85,4 |
| 9. НФм (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,2 л/т) | Л | 21,0±3,47 | 8,7 | 3,0±0,74 | 9,1 | 7,0±2,03 | 81,1 |
| | А | 57,0±5,54 | 0,0 | 10,0±3,01 | 0,0 | 4,0±0,86 | 90,2 |
| 10. Витаплан, СП (20 г/т) | Л | 12,0±2,61 | 47,8 | 0,0 | 100,0 | 14,0±2,54 | 62,2 |
| | А | 54,0±5,35 | 0,0 | 9,0±2,74 | 0,0 | 25,0±4,05 | 39,0 |
| 11. НКтэос (1,0 л/т) + Витаплан, СП (20 г/т) | Л | 41,0±4,44 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 19,0±3,02 | 48,6 |
| | А | 59,0±5,89 | 0,0 | 3,0±0,65 | 57,1 | 35,0±4,88 | 14,6 |
| 12. НФм (1,0 л/т) + Витаплан, СП (20 г/т) | Л | 24,0±3,35 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 32,0±4,45 | 13,5 |
| | А | 85,0±8,61 | 0,0 | 4,0±0,84 | 42,9 | 4,0±0,78 | 90,2 |
| | НСР05 (сорт) | 4,44 | | 2,10 | | 5,25 | |
| | НСР05 (препараты) | 5,35 | | 3,03 | | 7,02 | |
| | НСР05 (сорт, препараты) | 5,91 | | 4,21 | | 8,10 | |

Примечание. Л — Ленинградский, А — Атаман; Р — пораженность, БЭ — биологическая эффективность. В каждой пробе исследовали по 10 зерен. Подробное описание вариантов опыта см. в разделе «Методика».

Первичные симптомы поражения всходов ярового ячменя корневыми гнилями слабее всего проявились при обработке семян химическим протравителем в полной норме применения. Отсутствие защитного эффекта уже на этом этапе просматривалось в вариантах с обработкой семян кремнезольным наносоством НКтэос, а также биопрепаратом в отдельности и совместно с испытуемыми наносоствами (рис. 1). В то же время на обоих сортах ячменя было отмечено снижение первичной инфекции корневых гнилей при обработке семян наносоством на основе фуллерена С₆₀ с метионином (24,9 и 28,2 %), и еще в большей степени в комбинации с химическим протравителем (55,7 и 39,0 %).

Последующая оценка развития корневых гнилей показала, что наиболее сильный и продолжительный защитный эффект обеспечивала обработка семян химическим препаратом Иншур Перформ, КС в дозе 0,4 л/т. Его эффективность составляла 100; 76,3; 35,3 % и 100; 84,6; 47,2 % соответственно на сортах Ленинградский и Атаман в фазы кущения, стеблевания и колошения. Двукратное снижение дозировки приводило к значительной потере эффективности этого химического препарата на сорте Ленинградский.

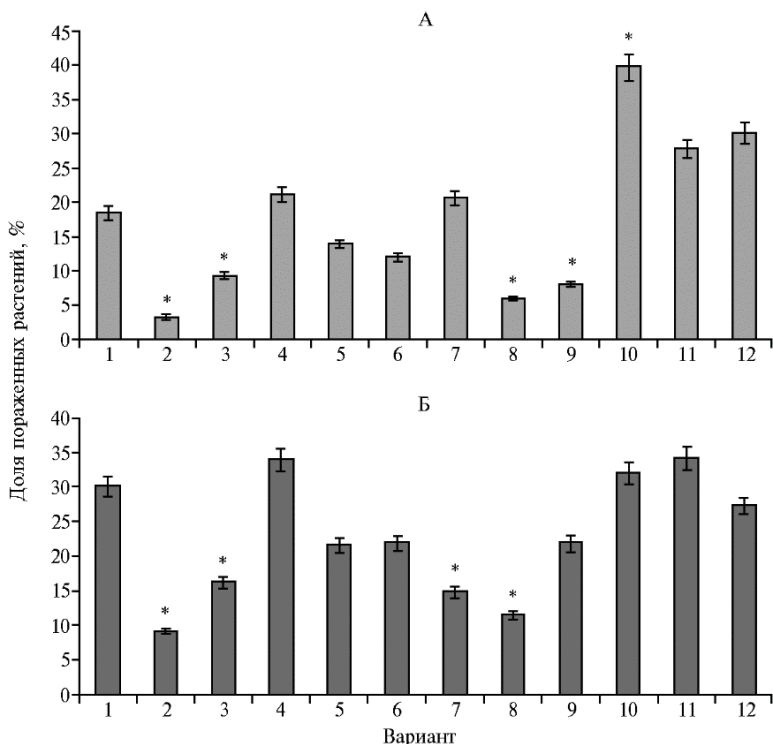


Рис. 1. Проявление первичных симптомов поражения растений ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сортов Ленинградский (А) и Атаман (Б) корневыми гнилями при обработке семян наносоствами, химическим, биологическим фунгицидами и их комбинациями: 1 — контроль (вода); 2 — Иншур Перформ, КС (0,4 л/т); 3 — Иншур Перформ, КС (0,2 л/т); 4 — кремнезольная композиция НКтэос (1,0 л/т); 5 — композиция производного фуллера с метионином и микроэлементами НФм (1,0 л/т); 6 — НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т); 7 — НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,2 л/т); 8 — НФм (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т); 9 — НФм (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,2 л/т); 10 — Витаплан, СП (20 г/т); 11 — НКтэос (1,0 л/т) + Витаплан, СП (20 г/т); 12 — НФм (1,0 л/т) + Витаплан, СП (20 г/т) ($n = 4$, $M \pm SEM$; Ленинградская обл., 2017 год). В каждой пробе исследовали по 30 растений. Подробное описание вариантов опыта см. в разделе «Методика».

* Различия с контролем статистически значимы при $p < 0,05$.

2. Эффективность обработки семян ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) двух сортов наносоствами, химическим, биологическим фунгицидами и их комбинациями в защите растений от корневых гнилей в разные фазы развития культуры ($n = 4$, $M \pm SEM$; Ленинградская обл., 2017 год)

| Вариант | Сорт | Фаза развития культуры | | | | | |
|---|------|------------------------|-------|-------------|-------|-----------|-------|
| | | кущение | | стеблевание | | колошение | |
| | | R, % | БЭ, % | R, % | БЭ, % | R, % | БЭ, % |
| 1. Контроль (вода) | Л | 1,4±0,63 | | 3,8±0,64 | | 6,8±2,05 | |
| | А | 1,1±0,66 | | 2,6±0,96 | | 7,2±1,58 | |
| 2. Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) | Л | 0,0 | 100,0 | 0,9±0,43 | 76,3 | 4,4±1,55 | 35,3 |
| | А | 0,0 | 100,0 | 0,4±0,27 | 84,6 | 3,8±2,05 | 47,2 |
| 3. Иншур Перформ, КС (0,2 л/т) | Л | 1,0±0,70 | 28,6 | 1,3±0,52 | 65,8 | 7,3±1,94 | 0,0 |
| | А | 0,0 | 100,0 | 0,3±0,36 | 88,5 | 4,5±2,50 | 37,5 |
| 4. НКтэос (1,0 л/т) | Л | 1,9±0,20 | 0,0 | 3,6±1,24 | 5,3 | 9,5±3,55 | 0,0 |
| | А | 1,1±0,52 | 0,0 | 1,1±0,40 | 57,7 | 6,1±1,45 | 15,3 |
| 5. НФм (1,0 л/т) | Л | 2,0±0,67 | 0,0 | 3,6±0,78 | 5,3 | 8,6±1,53 | 0,0 |
| | А | 0,7±0,27 | 36,4 | 1,7±0,75 | 34,6 | 6,1±1,26 | 15,3 |
| 6. НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) | Л | 0,8±0,44 | 42,9 | 1,4±0,84 | 63,2 | 7,0±1,96 | 0,0 |
| | А | 0,0 | 100,0 | 1,2±0,33 | 53,8 | 6,8±1,47 | 5,5 |
| 7. НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,2 л/т) | Л | 1,9±0,13 | 0,0 | 4,3±0,96 | 0,0 | 7,0±2,17 | 0,0 |
| | А | 0,0 | 100,0 | 0,7±0,42 | 73,1 | 6,1±1,23 | 15,3 |
| 8. НФм (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) | Л | 0,4±0,26 | 71,4 | 1,1±0,48 | 71,1 | 3,8±1,37 | 44,1 |
| | А | 0,0 | 100,0 | 0,6±0,04 | 76,9 | 4,7±2,43 | 34,7 |

| | | | | | | | |
|--|---|----------|-------|----------|------|-----------|------|
| 9. НФм (1,0 л/т) + Иншур | Л | 1,2±0,80 | 14,3 | 2,0±0,46 | 47,4 | 7,6±2,59 | 0,0 |
| Перформ, КС (0,2 л/т) | А | 1,6±0,57 | 0,0 | 1,1±0,18 | 57,7 | 4,8±1,07 | 33,3 |
| 10. Витаплан, СП (20 г/т) | Л | 1,9±1,48 | 0,0 | 5,5±1,53 | 0,0 | 7,8±2,23 | 0,0 |
| | А | 0,7±0,54 | 36,4 | 1,8±0,76 | 30,8 | 5,0±0,67 | 30,6 |
| 11. НКтэос (1,0 л/т) + Витаплан, СП (20 г/т) | Л | 2,7±2,01 | 0,0 | 3,2±0,92 | 15,8 | 9,0±1,55 | 0,0 |
| | А | 0,0 | 100,0 | 1,2±0,38 | 53,8 | 7,4±1,96 | 0,0 |
| 12. НФм (1,0 л/т) + Витаплан, СП (20 г/т) | Л | 2,1±0,82 | 0,0 | 3,7±1,21 | 2,6 | 15,9±8,10 | 0,0 |
| | А | 1,1±0,74 | 0,0 | 0,9±0,51 | 65,4 | 7,6±3,19 | 0,0 |
| НСР05 (сорт) | | 0,49 | | 0,63 | | 1,92 | |
| НСР05 (препарат) | | 1,20 | | 1,41 | | 4,90 | |
| НСР05 (сорт, препарат) | | 1,74 | | 2,03 | | 7,36 | |

Примечание. Л — Ленинградский, А — Атаман; Р — развитие, БЭ — биологическая эффективность. В каждой пробе исследовали по 30 растений. Подробное описание вариантов опыта см. в разделе «Методика».

Защитный эффект обработки семян наносоставами четко проявился на сорте Атаман и в зависимости от фазы развития культуры составил 15,3–57,7 % для кремнезольной композиции НКтэос, 15,3–36,4 % — для НФм. Нестабильный, преимущественно более высокий защитный эффект отмечали при совместном применении биопрепарата с наносоставами по сравнению с вариантом, когда обработку проводили только биопрепаратом (табл. 2). Однако варианты с биопрепаратом были менее эффективны, чем варианты комбинированного использования наносоставов с фунгицидом Иншур Перформ, КС.

3. Эффективность обработки вегетирующих растений ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) двух сортов наносоставами, микроудобрением, химическим фунгицидом и их комбинациями в защите растений от гельминтоспориозных пятнистостей листьев ($n = 4$, $M \pm SEM$; Ленинградская обл., 2017 год)

| Вариант | Сорт | Фаза развития культуры | | | |
|--|------|------------------------|-------|-------------------|-------|
| | | налив зерна | | молочная спелость | |
| | | Р, % | БЭ, % | Р, % | БЭ, % |
| 1. Контроль (вода) | Л | 8,0±0,57 | | 37,9±6,58 | |
| | А | 11,6±0,88 | | 12,8±1,98 | |
| 2. Зантара, КЭ (0,8 л/га) | Л | 4,9±1,79 | 38,8 | 11,7±1,11 | 69,1 |
| | А | 2,5±0,76 | 78,4 | 3,4±0,49 | 73,4 |
| 3. Зантара, КЭ (0,4 л/га) | Л | 6,2±1,49 | 22,5 | 14,9±2,71 | 60,7 |
| | А | 3,2±0,40 | 72,4 | 4,8±0,95 | 62,5 |
| 4. КХМ-Г (3,0 л/га) | Л | 6,8±0,62 | 15,0 | 33,1±4,19 | 12,7 |
| | А | 12,7±1,61 | 0,0 | 8,8±1,96 | 31,3 |
| 5. НФм (1,0 л/га) | Л | 6,5±0,73 | 18,8 | 32,0±1,30 | 15,6 |
| | А | 11,9±1,25 | 0,0 | 10,2±0,54 | 20,3 |
| 6. НФтр (1,0 л/га) | Л | 7,5±1,25 | 6,3 | 29,7±4,53 | 21,6 |
| | А | 12,5±1,10 | 0,0 | 7,4±0,28 | 42,2 |
| 7. КХМ-Г (3,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,8 л/га) | Л | 4,8±1,19 | 40,0 | 12,4±1,52 | 67,3 |
| | А | 1,9±0,31 | 83,6 | 3,2±0,40 | 75,0 |
| 8. КХМ-Г (3,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,4 л/га) | Л | 5,5±0,82 | 31,3 | 15,3±1,90 | 59,6 |
| | А | 2,2±0,33 | 81,0 | 4,2±0,67 | 67,2 |
| 9. НФм (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,8 л/га) | Л | 4,1±0,92 | 48,8 | 9,0±0,82 | 76,3 |
| | А | 2,5±0,60 | 78,4 | 4,4±1,62 | 65,6 |
| 10. НФм (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,4 л/га) | Л | 5,6±2,92 | 30,0 | 14,4±2,05 | 62,0 |
| | А | 2,3±0,58 | 80,2 | 4,8±0,61 | 62,5 |
| 11. НФтр (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,8 л/га) | Л | 4,4±1,11 | 45,0 | 10,3±0,87 | 72,8 |
| | А | 1,8±0,10 | 84,5 | 3,3±0,21 | 74,2 |
| 12. НФтр (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,4 л/га) | Л | 4,4±0,62 | 45,0 | 12,6±1,53 | 66,8 |
| | А | 2,2±0,27 | 81,0 | 3,6±0,20 | 71,9 |
| НСР05 (сорт) | | 1,27 | | 2,41 | |
| НСР05 (препараты) | | 2,68 | | 5,45 | |
| НСР05 (сорт, препараты) | | 2,78 | | 5,56 | |

Примечание. Л — Ленинградский, А — Атаман; Р — развитие, БЭ — биологическая эффективность. В каждой пробе исследовали по 30 растений. Подробное описание вариантов опыта см. в разделе «Методика».

Обработка вегетирующих растений ячменя наносоставами НФм и НФтр оказалась низкоэффективной по отношению к гельминтоспориозным пятнистостям листьев: для сорта Ленинградский — соответственно 15,6

и 21,6 %, для сорта Атаман — 20,3 и 42,2 %. Слабый защитный эффект отмечался при обработке растений микроудобрением КХМ-Г, стабильно высокий — в тех вариантах, где применение микроудобрения и указанных выше наноставов дополнялось фунгицидной обработкой препаратом Зантара, КЭ (табл. 3). Слабое развитие мучнистой росы (1,1 и 1,6 %) и ринхоспориоза (0,1 и 1,4 %), наблюдаемое на обоих сортах ярового ячменя в 2017 году, не позволило достоверно оценить эффективность изучаемых составов и препаратов на пораженность листового аппарата растений этими заболеваниями.

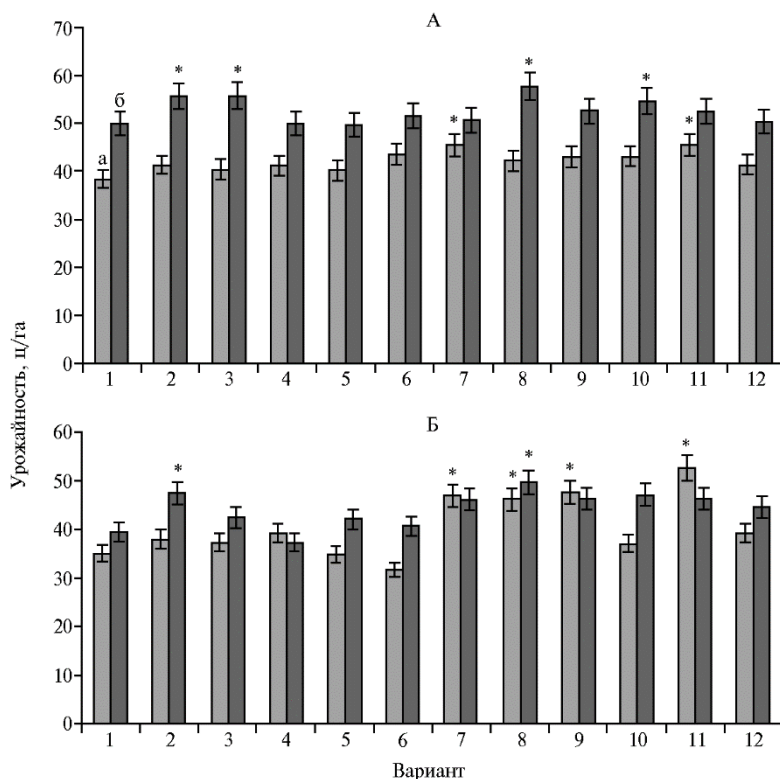


Рис. 2. Урожайность ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сортов Ленинградский (а) и Атаман (б) при обработке семенного материала (А) или вегетирующих растений (Б) растворами наноставов, КХМ-Г, химического, биологического фунгицида и их комбинациями ($n = 4$, $M \pm SEM$; Ленинградская обл., 2017 год).

А: 1 — контроль (вода); 2 — Иншур Перформ, КС (0,4 л/т); 3 — Иншур Перформ, КС (0,2 л/т); 4 — кремнезольная композиция НКтэос (1,0 л/т); 5 — композиция производного фуллерена с метионином и микроэлементами НФм (1,0 л/т); 6 — НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т); 7 — НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,2 л/т); 8 — НФм (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т); 9 — НФм (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,2 л/т); 10 — Витаплан, СП (20 г/т); 11 — НКтэос (1,0 л/т) + Витаплан, СП (20 г/т); 12 — НФм (1,0 л/т) + Витаплан, СП (20 г/т).

Б: 1 — контроль (вода); 2 — Зантара, КЭ (0,8 л/га); 3 — Зантара, КЭ (0,4 л/га); 4 — кремнийсодержащее хелатное микроудобрение КХМ-Г (3,0 л/га); 5 — НФм (1,0 л/га); 6 — композиция производного фуллерена с треонином и микроэлементами НФтр (1,0 л/га); 7 — КХМ-Г (3,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,8 л/га); 8 — КХМ-Г (3,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,4 л/га); 9 — НФм (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,8 л/га); 10 — НФм (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,4 л/га); 11 — НФтр (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,8 л/га); 12 — НФтр (1,0 л/га) + Зантара, КЭ (0,4 л/га).

Площадь для отбора каждой пробы составляла 1 м². Подробное описание вариантов см. в разделе «Методика».

Анализ элементов структуры урожая ярового ячменя показал, что обработка посевного материала изучаемыми препаратами имела наиболее сильное влияние на густоту продуктивного стеблестоя. При использовании

химических препаратов на яровом ячмене сорта Ленинградский число продуктивных стеблей в посеве возрастало на 11 %, наносоставов — на 5-12 %, их комбинации — на 8-17 %, биофунгицида и его смесей с наносоставами — на 10-15 %.

Урожайность ярового ячменя сорта Ленинградский в контроле с необработанными семенами составила 38,4 ц/га, в вариантах с протравливанием повышалась на 5-18 % (рис. 2). Наибольший хозяйственный эффект наблюдался при обработке семенного материала комбинациями из НКтэос и химического фунгицида (повышение на 14 и 18 % относительно контроля при нормах расхода фунгицида соответственно 0,2 и 0,4 л/т), а также НКтэос и биопрепарата Витаплан, СП (на 19 %). Достаточно высокая урожайность была зафиксирована в вариантах с применением отдельно биопрепарата (на 112 %) и комбинаций с наносоставом НФм и химическим протравителем (на 110 и 112 % при нормах расхода фунгицида соответственно 0,2 и 0,4 л/т).

На сорте Атаман были получены несколько иные данные. Во-первых, этот сорт оказался более урожайным, во-вторых, наибольший и статистически значимый хозяйственный эффект (повышение урожайности) на нем показала обработка семян химическим препаратом (112 % относительно контроля) и комбинацией НФм и химического фунгицида в дозе 0,4 л/т (116 % относительно контроля). Следует отметить отсутствие хозяйственного эффекта при обработке семян только наносоставами.

Некорневая обработка вегетирующих растений наносоставами НФм и НФтр не приводила к росту урожайности ярового ячменя сорта Ленинградский, тогда как микроудобрение КХМ-Г повышало ее на 12 % относительно контроля. Высокий хозяйственный эффект показали варианты, где внесение микроудобрений КХМ-Г сопровождалось последующей обработкой фунгицидом. В этом случае наблюдалось превышение отдельного эффекта, оказываемого микроудобрением или фунгицидом. То же отмечалось при обработке растений наносоставами и фунгицидом Зантара, КЭ. Превышение контроля по урожайности составило 6 и 35 % в вариантах с применением НФм и фунгицида Зантара, КЭ при нормах расхода 0,4 и 0,8 л/га, 11 и 50 % — в вариантах с применением НФтр и фунгицида Зантара, КЭ при тех же нормах расхода.

Хозяйственный эффект от однократной обработки растений ячменя сорта Атаман фунгицидом Зантара, КЭ в зависимости от нормы применения препарата (0,4 и 0,8 л/га) составил соответственно 8 и 20 %, в то время как от обработки микроудобрением КХМ-Г и фунгицидом — 17 и 26 %, НФм и фунгицидом — 17 и 19 %, НФтр и фунгицидом — 13 и 17 %, что указывает на существенное повышение эффективности обработки фунгицидом в половинной дозе под влиянием разработанных кремнийсодержащих микроудобрений КХМ-Г и наносоставов. Более низкий хозяйственный эффект отмечался в вариантах, где было предусмотрено применение только микроудобрения КХМ-Г или углеродных наносоставов.

Наиболее объективным показателем при оценке влияния обработки вегетирующих растений фунгицидами служит масса 1000 зерен. Согласно полученным значениям, у растений ячменя сорта Ленинградский совместное применение микроудобрения КХМ-Г и фунгицида в дозе 0,4 и 0,8 л/га повышало этот показатель на 9 и 17 % относительно контроля. По влиянию на массу 1000 зерен сорта Атаман выделялись варианты некорневой обработки фунгицидом (повышение относительно контроля на 110 и 112 % при нормах применения соответственно 0,4 и 0,8 л/га) и комбинированного применения НФм с фунгицидом (на 111 и 112 %).

По результатам исследований 2017 года были выявлены наиболее действенные варианты обработки для защиты ярового ячменя от болезней, которые в 2018 году включили в изучение эффективности технологической схемы применения наносоставов. Для усиления защитного эффекта при обработке семян в состав НКтэос дополнительно к шихте детонационного наноалмаза был добавлен 0,1 % диоксид титана в форме анатаза (22).

По данным фитоэкспертизы, обработка семян ярового ячменя сорта Ленинградский кремнезольным наносоставом приводила к снижению зараженности фузариевыми грибами на 43,7 % и альтернариозом на 23,5 %, но не оказывала влияния на основного возбудителя корневых гнилей — гриб *C. sativus* (табл. 4).

4. Эффективность обработки семян ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Ленинградский наносоставом, химическим фунгицидом и их комбинациями в защите от семенной инфекции ($n = 10$, $M \pm SEM$; Ленинградская обл., 2018 год)

| Вариант | Микобиота | | | | | |
|---|-----------------------------|-------|----------------------|-------|------------------------|-------|
| | патогенная | | | | сапротрофная | |
| | <i>Cochliobolus sativus</i> | | <i>Fusarium</i> spp. | | <i>Alternaria</i> spp. | |
| | Р, % | БЭ, % | Р, % | БЭ, % | Р, % | БЭ, % |
| 1. Контроль (вода) | 6,0±1,35 | | 16,0±2,05 | | 81,0±5,41 | |
| 2. Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) | 4,0±1,08 | 33,3 | 13,0±1,96 | 18,7 | 39,0±4,87 | 51,9 |
| 3. Иншур Перформ, КС (0,2 л/т) | 3,0±0,88 | 50,0 | 18,0±2,25 | 0,0 | 45,0±4,98 | 44,4 |
| 4. НКтэос (1,0 л/т) | 17,0±2,31 | 0,0 | 9,0±1,87 | 43,7 | 62,0±5,14 | 23,5 |
| 5. НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) | 13,0±1,45 | 0,0 | 13,0±2,41 | 18,7 | 53,0±4,52 | 34,6 |
| 6. НКтэос (1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (0,2 л/т) | 8,0±2,06 | 0,0 | 14,0±2,87 | 12,5 | 71,0±6,42 | 12,3 |
| НСР ₀₅ | 1,51 | | 3,53 | | 12,46 | |

Примечание. Р — пораженность, БЭ — биологическая эффективность. В каждой пробе исследовали по 10 зерен. Подробное описание вариантов опыта см. в разделе «Методика».

В условиях сильного поражения растений корневыми гнилями в 2018 году, вызванного продолжительным засушливым периодом начального развития культуры, отмечалось слабое и недолгое влияние обработки семян химическим фунгицидом Иншур Перформ, КС на развитие заболевания (табл. 5). При комбинированной обработке семян наносоставом НКтэос и химическим фунгицидом эффективность защиты в отношении корневых гнилей повышалась до 10,1-21,5 % относительно контроля, но только при полной норме применения препарата Иншур Перформ, КС. Еще более сильный эффект (снижение развития корневых гнилей на 13,9-35,4 % относительно контроля) просматривался в варианте с обработкой семян кремнезольным наносоставом и химическим препаратом в полной норме применения с последующей 3-кратной обработкой вегетирующих растений НФтр.

5. Эффективность обработки семян и вегетирующих растений ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Ленинградский наносоставами, химическим фунгицидом и их комбинациями в защите растений от корневых гнилей ($n = 4$, $M \pm SEM$; Ленинградская обл., 2018 год)

| Вариант опыта | Фаза развития культуры | | | | | |
|--|------------------------|-------|-------------|-------|-----------|-------|
| | кущение | | стеблевание | | колошение | |
| | Р, % | БЭ, % | Р, % | БЭ, % | Р, % | БЭ, % |
| 1. Контроль (вода) | 30,2±3,35 | | 34,0±2,68 | | 44,5±8,28 | |
| 2. Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + вода (растения 300 л/га) | 25,5±4,07 | 15,6 | 28,8±1,99 | 15,3 | 40,0±3,81 | 10,1 |
| 3. Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + вода (растения 300 л/га) | 30,4±6,85 | 0,0 | 32,0±4,32 | 5,9 | 42,2±4,87 | 5,2 |
| 4. НКтэос (семена 1,0 л/т) + вода (растения 300 л/га) | 29,4±1,83 | 2,6 | 33,6±9,09 | 1,2 | 45,0±8,11 | 0,0 |

| | | | | | | |
|---|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
| 5. НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + вода (растения 300 л/га) | 24,2±6,27 | 19,9 | 26,7±7,66 | 21,5 | 40,0±3,81 | 10,1 |
| 6. НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + вода (растения 300 л/га) | 30,8±3,49 | 0,0 | 34,3±7,04 | 0,0 | 39,8±8,67 | 10,6 |
| 7. Вода (семена) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 38,5±8,15 | 0,0 | 43,9±6,51 | 0,0 | 53,5±5,93 | 0,0 |
| 8. Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 25,0±4,45 | 17,2 | 28,7±2,68 | 15,6 | 39,3±2,25 | 11,7 |
| 9. Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 29,5±8,05 | 2,3 | 29,2±2,89 | 14,1 | 44,9±2,78 | 0,0 |
| 10. НКтэос (семена 1,0 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 24,3±4,31 | 19,5 | 39,0±5,54 | 0,0 | 48,8±4,53 | 0,0 |
| 11. НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 19,5±3,68 | 35,4 | 22,2±8,16 | 34,7 | 38,3±7,64 | 13,9 |
| 12. НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 31,2±5,58 | 0,0 | 34,4±7,32 | 0,0 | 46,0±4,26 | 0,0 |
| НСР ₀₅ | 13,61 | | 14,49 | | 16,94 | |

Примечание. R — развитие, БЭ — биологическая эффективность. В каждой пробе исследовали по 30 растений. Подробное описание вариантов опыта см. в разделе «Методика».

В 2018 году проявился существенный защитный эффект обработки семян фунгицидами в отношении гельминтоспориозных пятнистостей листьев (табл. 6). В вариантах с протравливанием посевного материала препаратом Иншур Перформ, КС развитие гельминтоспориоза в зависимости от дозы применения снижалось на 20,0-32,2 % (0,4 л/т) и 17,5-32,9 % (0,2 л/т) относительно контроля. При предпосевной обработке кремнезольным наносоставом развитие заболевания снижалось на 7,5-15,4 %.

6. Эффективность обработки семян и вегетирующих растений ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Ленинградский наносоставами, химическим фунгицидом и их комбинациями в защите растений от гельминтоспориозных пятнистостей листьев (n = 4, M±SEM; Ленинградская обл., 2018 год)

| Вариант | Фаза развития растений | | | |
|---|------------------------|-------|-------------------|-------|
| | налив зерна | | молочная спелость | |
| | R, % | БЭ, % | R, % | БЭ, % |
| 1. Контроль (вода) | 4,0±0,34 | | 14,3±2,42 | |
| 2. Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + вода (растения 300 л/га) | 3,2±0,16 | 20,0 | 9,7±0,33 | 32,2 |
| 3. Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + вода (растения 300 л/га) | 3,3±0,19 | 17,5 | 9,6±1,45 | 32,9 |
| 4. НКтэос (семена 1,0 л/т) + вода (растения 300 л/га) | 3,7±0,38 | 7,5 | 12,1±1,77 | 15,4 |
| 5. НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + вода (растения 300 л/га) | 2,8±0,25 | 30,0 | 11,0±1,08 | 23,1 |
| 6. НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + вода (растения 300 л/га) | 3,2±0,24 | 20,0 | 13,2±0,86 | 7,7 |
| 7. Вода (семена) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 3,6±0,16 | 10,0 | 12,5±0,72 | 12,6 |
| 8. Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 2,9±0,35 | 27,5 | 8,5±1,02 | 40,6 |
| 9. Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 3,2±0,67 | 20,0 | 10,0±1,39 | 30,1 |
| 10. НКтэос (семена 1,0 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 2,8±0,37 | 30,0 | 11,5±1,41 | 19,6 |
| 11. НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 2,9±0,23 | 27,5 | 9,9±0,35 | 30,8 |
| 12. НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га) | 3,7±0,48 | 7,5 | 12,1±0,62 | 15,4 |
| НСР ₀₅ | 0,94 | | 3,40 | |

Примечание. R — развитие, БЭ — биологическая эффективность. В каждой пробе исследовали по 30 растений. Подробное описание вариантов опыта см. в разделе «Методика».

Некорневая обработка вегетирующих растений наносоставом НФтр приводила к снижению развития гельминтоспориоза относительно контроля на 10,0-12,6 %, на фоне обработки семян кремнезольным наносоставом — на 19,6-30,0 % (см. табл. 6). В других вариантах также отмечалось положительное влияние обработки НФтр, дополняющее защитный эффект от протравливания семенного материала. При обработке семян химическим препаратом Иншур Перформ, КС и 3-кратной обработке вегетирующих

растений наносоставом НФтр развитие гельминтоспориоза снижалось относительно контроля на 27,5-40,6 % при 100 % норме применения и на 20,0-30,1 % — при 50 % норме применения.

Высокая продуктивность растений ярового ячменя была характерна для вариантов с обработкой семян, а также семян и вегетирующих растений испытываемыми наносоставами. Превышение контроля по массе зерна с колоса в обоих этих вариантах составляло 9 %. По густоте продуктивного стеблестоя выделялся (на 15 % выше значений в контроле) вариант, предусматривающий последовательную обработку семян кремнезольным наносоставом и химическим препаратом Иншур Перформ, КС (0,4 л/т) с дальнейшей 3-кратной обработкой вегетирующих растений наносоставом НФтр.

Анализируя полученную в опыте урожайность можно сделать вывод об отсутствии достоверных различий между контролем и изучаемыми вариантами по обработке семян и вегетирующих растений ярового ячменя (рис. 3).

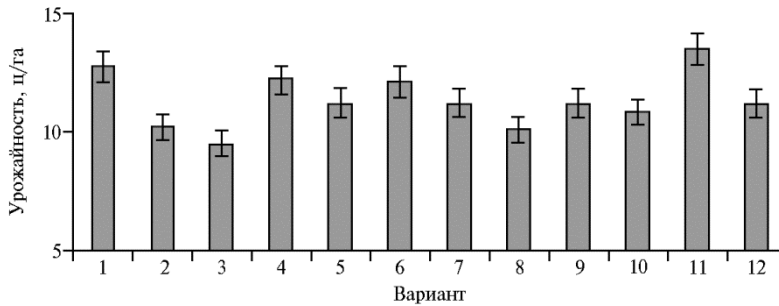


Рис. 3. Урожайность растений ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Ленинградский при обработке семенного материала и вегетирующих растений наносоставами, химическим фунгицидом и их комбинациями: 1 — контроль (вода), 2 — Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + вода (растения 300 л/га), 3 — Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + вода (растения 300 л/га), 4 — НКтэос (семена 1,0 л/т) + вода (растения 300 л/га), 5 — НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + вода (растения 300 л/га), 6 — НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + вода (растения 300 л/га), 7 — вода (семена) + НФтр (растения 1,0 л/га), 8 — Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га), 9 — Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га), 10 — НКтэос (семена 1,0 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га), 11 — НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,4 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га), 12 — НКтэос (семена 1,0 л/т) + Иншур Перформ, КС (семена 0,2 л/т) + НФтр (растения 1,0 л/га) ($n = 4$, $M \pm SEM$; Ленинградская обл., сорт Ленинградский, 2018 год). Площадь для отбора каждой пробы составляла 1 м². Подробное описание вариантов см. в разделе «Методика».

Изначально углеродные и кремнезольные наносоставы рассматривались в качестве регуляторов роста растений и их применение в сельском хозяйстве было нацелено на повышение количества и качества урожая, достигаемое за счет увеличения полевой всхожести, интенсивности фотосинтеза и продукционного процесса (35-37). При этом отмечалась их способность к повышению устойчивости растений к стрессорам биотической и абиотической природы, в том числе к действию вредных организмов (38, 39). Результаты наших исследований указывают в целом на слабые и во многих случаях статистически недостоверные эффекты обработки семян и вегетирующих растений углеродными и кремнезольными наносоставами в защите ярового ячменя от корневых гнилей и листовых болезней. Объяснить это можно их направленным действием не на патоген, атакующий растительные клетки, а на активацию метаболизма и иммунитета растений, что подтверждается фактическими данными зарубежных исследований (40, 41). В то же время в наших опытах можно отметить выраженный биоцидный

эффект кремнезольного наносостава в отношении семенной инфекции, а именно грибов рода *Fusarium*. Еще один важный вывод касается больших перспектив использования углеродных и кремнезольных композиций на сортах ярового ячменя с длительным периодом вегетации, которые в большей степени подвержены влиянию фитопатогенов. Один из возможных способов усиления протекторного эффекта заключается в совместном применении изучаемых наносоставов и химических препаратов, предназначенных для защиты культурных растений от фитопатогенов. При этом за счет выраженного аддитивного эффекта открывается возможность существенного снижения норм применения фунгицидов, что было доказано на примере совместного использования биологических и химических препаратов в защите ярового ячменя от болезней (32).

Полученные нами данные указывают на определенные перспективы использования новых углеродных и кремнезольных наносоставов в защите ярового ячменя от болезней с целью снижения пестицидной нагрузки при возделывании этой культуры в Северо-Западном регионе России. Показана высокая эффективность комбинированного применения наносоставов с химическими или биологическими фунгицидами, аддитивно усиливающих защитный эффект последних с потенциальной возможностью снижения их дозировки. Необходимо продолжать исследования для научно обоснованного подбора наиболее эффективных комбинаций наносоставов и пестицидов и усовершенствования технологических схем их применения.

Таким образом, наносоставы, применяемые в чистом виде, оказывали слабое и недостоверное влияние на развитие корневых гнилей на раннеспелом сорте ячменя Ленинградский (0-5,3 %), более выраженное и стабильное — на среднепозднем сорте Атаман (15,3-57,7 %, $p < 0,05$). При предпосевной обработке семян кремнезольным наносоставом на основе 1 масс.% ТЭОС (тетраэтоксисилан, рН 2-3) с макро- и микроэлементами и 0,1 % диоксидом титана наблюдалось снижение развития гельминтоспориозных пятнистостей листьев на 7,5-15,4 % ($p < 0,05$). Наиболее продолжительным и выраженным защитным эффектом в отношении корневых гнилей характеризовался вариант с комбинированной обработкой семян кремнезольным наносоставом и химическим фунгицидом Иншур Перформ, КС, дополненной некорневой обработкой вегетирующих растений наносоставом на основе аминокислотного производного фуллерена С₆₀ с треонином. Для защиты ярового ячменя от гельминтоспориозных пятнистостей изучаемые наносоставы в чистом виде также были малоэффективны: развитие симптомов на двух верхних листьях снижалось у сортов Ленинградский и Атаман соответственно на 16-22 и 20-42 % ($p < 0,05$). При обработке семян кремнезольной композицией и вегетирующих растений наносоставом на основе аминокислотного производного фуллерена С₆₀ с треонином отмечалось снижение развития гельминтоспориоза на 19,6-30,0 % ($p < 0,05$), что было равнозначно обработке семян и растений химическим препаратом Иншур Перформ, КС в половинной норме применения. Высокий защитный эффект на обоих сортах достигался при комбинированном 3-кратном применении наносостава НФтр и однократном — химического фунгицида Зантара, КЭ, а также микроудобрения КХМ-Г и химического фунгицида Зантара, КЭ. Наилучшим вариантом защиты ярового ячменя от болезней корневой системы и листового аппарата признана комбинированная обработка семян кремнезольным наносоставом и химическим фунгицидом Иншур Перформ, КС в сочетании с 3-кратной обработкой вегетирующих растений наносоставом на основе аминокислотного производного фуллерена

C₆₀ с треонином и однократной химическим фунгицидом Зантара, КЭ. Снижение нормы применения химического препарата целесообразно только в условиях ожидаемого слабого проявления болезней, поскольку приводит к существенной потере эффективности и сокращению сроков защитного периода. Высокую биологическую и хозяйственную эффективность, сопоставимую с результатом фунгицидной обработки со 100 % нормой применения препарата, обеспечивало комбинированное использование микроудобрения КХМ-Г и фунгицида (50 % норма применения), а также наносоства на основе аминокислотного производного фуллера C₆₀ с метионином и фунгицида (50 % норма применения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Frew A., Weston L.A., Reynolds O.L., Gurr G.M. The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. *Annals of Botany*, 2018, 121(7): 1265-1273 (doi: 10.1093/aob/mcy009).
2. Polischuk S.D., Churilov G.I., Churilov D.G., Borychev S.N., Byshov N.V., Koloshein D.V., Cherkasov O.V. Biologically active nanomaterials in production and storage of arable crops. *International Journal of Nanotechnology*, 2019, 16(1-3): 133-146 (doi: 10.1504/ijnt.2019.102400).
3. Kalenska S., Novytska N., Stolyarchuk T., Kalenskyi V., Garbar L., Sadko M., Shutiy O., Sonko R. Nanopreparations in technologies of plants growing. *Agronomy Research*, 2021, 19(Special Issue 1): 795-808 (doi: 10.15159/ar.21.017).
4. Федоренко В.Ф., Бухлагин Д.С., Голубев И.Г., Неменушая Л.А. *Повышение урожайности сельскохозяйственных культур применением нанотехнологий. Научное издание.* М., 2013.
5. 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): 72-81.
6. Забегалов Н.В., Дабахова Е.В. Влияние кремнийсодержащего нанопрепарата на урожайность и содержание кремния в зерновых культурах. *Достижения науки и техники АПК*, 2011, 12: 22-24.
7. Хорошилов А.А., Павловская Н.Е., Бородин Д.Б., Яковлева И.В. Фотосинтетическая продуктивность и структура урожая яровой пшеницы под влиянием нанокремния в сравнении с биологическим и химическим препаратами. *Сельскохозяйственная биология*, 2021, 56(3): 487-499 (doi: 10.15389/agrobiology.2021.3.487rus).
8. Семина С.А., Гаврюшина И.В., Никулина Е.В. Влияние кремнийсодержащих препаратов на формирование урожайности зерна кукурузы. *Агрехимический вестник*, 2020, 4: 62-66.
9. 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 Advances*, 2017, 7: 15189-15200 (doi: 10.1039/c6ra26621e).
10. Panova G.G., Serebryakov E.B., Semenov K.N., Charykov N.A., Shemchuk O.S., Andrusenko E.V., Kanash E.V., Khomyakov Y.V., Shpanev A.M., Dulneva L.L., Podolsky N.E., Sharoyko V.V. Bioactivity study of the C₆₀-L-threonine derivative for potential application in agriculture. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 2019: 2306518 (doi: 10.1155/2019/2306518).
11. Mahadeva Swamy H.M., Asokan R. *Bacillus thuringiensis* as 'Nanoparticles' — a perspective for crop protection. *Nanoscience & Nanotechnology-Asia*, 2013, 3(1): 102-105 (doi: 10.2174/22106812112029990006).
12. Cooke J., Leishman M.R. Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. *Functional Ecology*, 2016, 30(8): 1340-1357 (doi: 10.1111/1365-2435.12713).
13. Abdel-Haliem M.E.F., Hegazy H.S., Hassan N.S., Naguib D.M. Effect of silica ions and nanosilica on rice plants under salinity stress. *Ecological Engineering*, 2017, 99: 282-289 (doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.11.060).
14. Пиотровский Л.Б., Литасова Е.В., Думпис М.А. Зачем нам сегодня нужны фуллерены? *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*, 2019, 17(2): 5-15 (doi: 10.17816/RCF1725-15).
15. Kresge C.T., Leonowicz M.E., Roth W.J., Vartuli J.C., Beck J.S. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism. *Nature*, 1992, 359(6397): 710-712 (doi: 10.1038/359710A0).
16. Beck J.S., Vartuli J.C., Roth W.J., Leonowicz M.E., Kresge C.T., Schmitt K.D., Chu C. T.-W., Olson D.H., Sheppard E.W., McCullen S.B., Higgins J.B., Schlenker J.L. A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates. *J. Am. Chem. Soc.*, 1992, 114(27): 10834-10843 (doi: 10.1021/ja00053a020).
17. Shilova O.A. Synthesis and structure features of composite silicate and hybrid TEOS-derived thin films doped by inorganic and organic additives. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 2013, 68(3): 387-410

- (doi: 10.1007/s10971-013-3026-5).
18. Panova G.G., Ktitorova 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, 79(3): 309-317 (doi: 10.1007/s10725-015-0135-x).
 19. Панова Г.Г., Канаш 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, 53(1): 38-49 (doi: 10.15389/agrobiology.2018.1.38rus).
 20. Панова Г.Г., Семенов К.Н., Шилова О.А., Корнюхин Д.Л., Шпанев А.М., Аникина Л.М., Хамова Т.В., Артемьева А.М., Канаш Е.В., Чарыков Н.А., Удалова О.Р., Галушко А.С., Журавлева А.С., Филиппова П.С., Кудрявцев Д.В., Блохина С.Ю. Влияние углеродных и кремнезольных наноматериалов на устойчивость ярового ячменя к заболеванию корневыми гнилями. *Агрофизика*, 2018, 3: 48-58.
 21. Shilova, O.A., Khamova, T.V., Panova, G.G., Artem'eva, A.M., Korniyukhin, D.L. Using the sol-gel technology for the treatment of barley. *Glass Physics and Chemistry*, 2018, 44(1): 25-32 (doi: 10.1134/S108765961801011X).
 22. Shilova O.A., Khamova T.V., Panova G.G., Korniyukhin D.L., Anikina L.M., Artemyeva A.M., Udalova O.R., Galushko A.S., Baranchikov A.E. Synthesis and research of functional layers based on titanium dioxide nanoparticles and silica sols formed on the surface of chinese cabbage. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2020, 93(1): 25-34 (doi: 10.1134/S1070427220010036).
 23. Shvidchenko A.V., Eidelman E.D., Vul' A.Ya., Kuznetsov N.M., Stolyarova D.Yu., Belousov S.I., Chvalun S.N. Colloids of detonation nanodiamond particles for advanced applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, 268: 64-81 (doi: 10.1016/j.cis.2019.03.008).
 24. 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, 34(1-2): 18-74 (doi: 10.1080/10408430902831987).
 25. Dolmatov V.Yu., Ozerin A.N., Kulakova I.I., Bochechka O.O., Lapchuk N.M., Myllymdki V., Vehanen A. Detonation nanodiamonds: new aspects in the theory and practice of synthesis, properties and applications. *Russian Chemical Reviews*, 2020, 89(12): 1428-1462 (doi: 10.1070/RCCR4924).
 26. 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, 53(2): 137-140.
 27. Panyuta O., Belava V., Fomaidi S., Kalinichenko O., Volkogon M., Taran N. The effect of pre-sowing seed treatment with metal nanoparticles on the formation of the defensive reaction of wheat seedlings infected with the eyespot causal agent. *Nanoscale Research Letters*, 2016, 11: 92 (doi: 10.1186/s11671-016-1305-0).
 28. Pandey S., Giri K., Kumar R., Mishra G., Raja Rishi R. Nanopesticides: opportunities in crop protection and associated environmental risks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 2016, 88(1): 1287-1308 (doi: 10.1007/s40011-016-0791-2).
 29. Архипов М.В., Данилова Т.А., Сеницына С.М. Состояние и перспективы развития зерновой отрасли в Северо-Западном федеральном округе. В сб.: *Научное обеспечение развития производства зерна на Северо-Западе России*. СПб, 2014: 4-15.
 30. *Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве*. СПб, 2009.
 31. Рогожников Е.С., Шпанев А.М. Эффективность применения биофунгицида Витаплан на яровом ячмене в условиях северо-запада Нечерноземной зоны. *Вестник защиты растений*, 2016, 3(89): 140-142.
 32. Shpanev A.M., Denisjuk E.S. Efficiency of microbial preparations based on *Bacillus subtilis* and *Trichoderma harzianum* for the protection of spring barley from diseases in Northwestern Russia. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2020, 56(9): 930-939 (doi: 10.1134/S0003683820090082).
 33. *ГОСТ 12044-93. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями*. М., 1993.
 34. Аникина Л.М., Панова Г.Г. *Кремнийсодержащее хелатное микроудобрение и способ его получения. Патент на изобретение 2515389 (РФ). Заявл. 29.08.2012 г. Опубл. 10.05.2014. Бюл. № 13*.
 35. Janmohammadi M., Sabaghnia N., Ahadnezhad A. Impact of silicon dioxide nanoparticles on seedling early growth of lentil (*Lens culinaris* Medik.) genotypes with various origins. *Agriculture & Forestry*, 2015, 61(3): 19-33 (doi: 10.17707/AgricultForest.61.3.02).
 36. Qi M., Liu Y., Li T. Nano-TiO₂ improve the photosynthesis of tomato leaves under mild heat stress. *Biological Trace Element Research*, 2013, 156: 323-328 (doi: 10.1007/s12011-013-9833-2).
 37. Khodakovskaya M.V., Kim B.-S., Kim J.N., Alimohammadi M., Dervishi E., Mustafa T.,

- Cernigla C.E. Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Nano-micro Small*, 2013, 9(1): 115-123 (doi: 10.1002/sml.201201225).
38. Kim Y.-H., Khan A.L., Waqas M., Lee I.-J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 510 (doi: 10.3389/fpls.2017.00510).
39. Jo Y.-Ki, Kim B.H., Jung G. Antifungal activity of silver ions and nanoparticles on phytopathogenic fungi. *Plant Disease*, 2009, 93(10): 1037-1043 (doi: 10.1094/PDIS-93-10-1037).
40. Zhang Y., Qi G.Y., Yao L., Huang L., Wang J., Gao W. Effects of metal nanoparticles and other preparative materials in the environment on plants: from the perspective of improving secondary metabolites. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(4): 916-933 (doi: 10.1021/acs.jafc.1c05152).
41. Ayoub H.A., Khairy M., Elsaid S., Rashwan F.A., Abdel-Hafez H.F. Pesticidal activity of nanostructured metal oxides for generation of alternative pesticide formulations. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(22): 5491-5498 (doi: 10.1021/acs.jafc.8b01600).

¹ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт,

195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14,
e-mail: ashpanev@mail.ru ✉, mitek1604@yandex.ru, gaiane@inbox.ru;

²ФГБУН Институт химии силикатов

им. И.В. Гребенщикова РАН,

199034 Россия, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2,
e-mail: olgashilova@bk.ru;

³ФГБОУ ВО Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет

им. академика И.П. Павлова,

197022 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, 6-8,
e-mail: semenov1986@yandex.ru

Поступила в редакцию
19 мая 2022 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2022, V. 57, № 3, pp. 441-459

CARBON AND SILICA NANOSTRUCTURES IN THE PROTECTION OF SPRING BARLEY FROM DISEASES IN THE NORTH-WEST RUSSIA

A.M. Shpanev¹ ✉, E.S. Denisyuk¹, O.A. Shilova², K.N. Semenov³, G.G. Panova¹

¹Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail ashpanev@mail.ru (✉ corresponding author), mitek1604@yandex.ru, gaiane@inbox.ru;

²Institute of Silicate Chemistry RAS (ICHS), St. Petersburg, nab. Makarova, 2, 199034 Russia, e-mail olgashilova@bk.ru;

³Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, St. Petersburg, ul. L'va Tolstova, 6-8, 197022 Russia, e-mail semenov1986@yandex.ru

ORCID:

Shpanev A.M. orcid.org/0000-0003-4346-318X

Semenov K.N. orcid.org/0000-0003-2239-2044

Denisyuk E.S. orcid.org/0000-0003-0663-1316

Panova G.G. orcid.org/0000-0002-1132-9915

Shilova O.A. orcid.org/0000-0002-3856-9054

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Supported financially by the Agrophysical Research Institute from the Fundamental Scientific Research Program of the State Academies of Sciences for 2013-2020, stage No. 0667-2019-0013 in terms of ensuring the conduct of vegetation and field experiments and with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research No. 15-29-05837of_i_m in terms of creating biologically active carbon and silica-sol nanocompositions and studying their effect on the physiological state of plants

Received May 19, 2022

doi: 10.15389/agrobiology.2022.3.441eng

Abstract

Spring barley (*Hordeum vulgare* L.) is the main grain fodder crop, annually occupying about 40 % of the sown area in the North-West Russia. In recent years, there has been a clear interest in the world and domestic science to use of nanomaterials and nanotechnologies in plant protection, which is due to their unique properties and high efficiency at low concentrations. In this work, for the first time, the effect of carbon and silica sol nanocompositions on seed infection, damage to spring barley plants by root rot and leaf diseases is shown. It was determined that a stronger protective effect was manifested when using nanocompositions on the spring barley variety Ataman with a longer growing season and more susceptible to major diseases. For the first time, an additive effect has been established that enhances the protective functions of chemical or biological fungicides with the possibility of reducing their dosage when combined with nanocomposites in the treatment of seeds and vegetative

plants. Our goal was to study the effectiveness of new compositions based on carbon and silica sol nanomaterials in protecting spring barley from diseases in the North-West Russia. The studies were carried out at the experimental base of the Menkovsky branch of the Agrophysical research institute (Gatchinsky District, Leningrad Province) in 2017-2018. At the first stage of research in 2017, the effectiveness of two promising nanocompositions for the protection of spring barley from root rot and leaf diseases was studied. Two experiments were carried out on Leningradsky and Ataman varieties of spring barley with different vegetation periods: on the treatment of seed material and vegetative plants with nanocompositions. The silica sol composition of NKteos was synthesized according to the original sol-gel technology based on acid hydrolysis followed by polycondensation of tetraethyl ester of ortho-silicic acid or tetraethoxysilane, with the addition of macro- and microelements salts solutions and dopants — a charge of detonation nanodiamond doped with boron, or a titanium dioxide in the form of anatase to the sol. Preparation of a nanocomposition based on fullerene derivatives with methionine or threonine was carried out by dissolving microelement compounds in water and adding 0.001 % (for seed treatment) or 0.00001 % (for foliar treatment) solution of the amino acid derivative of C₆₀ fullerene with threonine or with methionine. Experiment variants also included the combined use of nanocompositions with chemical and biological fungicides, as well as fungicides with silicon-containing chelated microfertilizer. Grain contamination with phytopathogens was determined using nutrient media. The development of root rot was assessed in the phases of germination, tillering, budding and heading, leaf diseases — in the beginning of barley earing, then in 10, 20 and 30 days. At the second stage of research in 2018, the effectiveness of the technological scheme for the use of new nanocompositions in the protection of spring barley of the Leningradsky variety from diseases was evaluated. The experiment included two blocks: the treatment with nanocompositions of seeds, the treatment of seeds and vegetative plants. It is shown that the studied nanocompositions in their pure form turned out to be ineffective in protecting spring barley from root rot and leaf diseases. The decrease in the development of root rot on the early ripe variety Leningradsky did not exceed 5.3 %, on the variety Ataman it was 15.3-57.7 % ($p < 0.05$). The development of the main disease of the crop — helminthosporium spots on the two upper leaves of barley plants of the Leningradsky variety decreased by 16-22 %, of the Ataman variety — by 20-42 % ($p < 0.05$). The results of seed treatment allow us to assume that the effect of the silica sols composition is longer, since it extended to the development of helminthosporium leaf spots (decrease in damage by 7.5-15.4 %, $p < 0.05$ compared to control) and is due to the ability to activate plant metabolism and immunity. The effect of the nanocomposition based on the fullerene C₆₀-methionine derivative is more apparent due to a decrease in seed infection and primary signs of infection during the emergence of barley seedlings. The most effective for the protection of spring barley from root and leaf diseases was the combined treatment of seeds with a silica sol nanocomposition and the chemical fungicide Insure™ Perform, KS, followed by a triple treatment of vegetative plants with a nanocomposition based on a C₆₀-threonine derivative and a single treatment with the chemical fungicide Zantara, CE. Reducing the dose of a chemical preparation is advisable only if a weak manifestation of the disease is expected. High biological and economic efficiency, comparable to the result of fungicidal treatment with 100 % application rate of the preparation, was ensured by the combined use of silicon containing chelate microfertilizer SCM-G and fungicide (50 % application rate), as well as nanocomposition based of the C₆₀ fullerene amino acid derivatives with methionine and fungicide (50 % application rate).

Keywords: *Hordeum vulgare* L., spring barley, root rot, leaf diseases, plant protection products, fungicides, nanomaterials, fullerene C₆₀, amino acid derivatives, C₆₀ with methionine, C₆₀ with threonine, silica sol, tetraethoxysilane, dopants, charge of detonation nanodiamond, titanium dioxide, anatase.