БИОТЕХНОЛОГИЯ, 2024, том 40, № 4, с. 84–95

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОПРЕПАРАТОВ

УДК 58.04

ВОДНЫЕ ДИСПЕРСИИ ФУЛЛЕРЕНА C_{60} И ФУЛЛЕРЕНОВЫХ СМЕСЕЙ КАК БИОПРЕПАРАТЫ ДЛЯ РОСТОСТИМУЛЯЦИИ РАСТЕНИЙ

© 2024 г. О. В. Ямскова[1], Д. В. Курилов[2], О. А. Щуклина[3, *], М. М. Ильин[1], А. А. Горюнков[4]

[1]*"Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук", Москва, 119991 Россия*

[2]*"Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского Российской академии наук", Москва, 119991 Россия*

[3]*"ФБГУН Главный ботанический сад им Н.В. Цицина РАН", Москва, 127276 Россия*

[4]*"Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова", Химический факультет, Москва, 119991 Россия*

*****e-mail: oashuklina@gmail.com*

Поступила в редакцию 21.02.2024 г.
После доработки 11.06.2024 г.
Принята к публикации 20.06.2024 г.

Изучено ростостимулирующее воздействие, оказываемое биопрепаратами на основе водных дисперсий или коллоидных растворов фуллерена C_{60}, а также фуллеренсодержащих субстанций, получаемых при его производстве (фуллеренового экстракта и фуллереновой сажи), на растения в результате обработки семенного материала сельскохозяйственных культур. В лабораторных и полевых экспериментах продемонстрирован ростостимулирующий эффект, проявившийся благодаря обработке фуллерен-содержащими водными дисперсиями семян (как свежих, так и залежавшихся, либо обладающих низкой всхожестью) на примерах важных в продовольственном отношении сельскохозяйственных культур, таких как яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сортов "Лада" и "Воевода", озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта "Рубежная", яровой овес (*Avena sativa* L.) сорта "Скакун", яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта "Вереск", озимая рожь (*Secale cereale* L.) сорта "Орловская", тыква твердокорая (*Cucurbita pepo* L.) сортов "Улыбка" и "Мускатная", а также горох посевной (*Pisum sativum* L.) сорта "Фараон". В полевых опытах на примере озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта "Рубежная" продемонстрировано повышение урожайности и зимостойкости растений, увеличение веса и количества зерен в колосе в результате предпосевной обработки семян фуллеренсодержащими водными дисперсиями. В настоящем исследовании в рамках предлагаемого для сельскохозяйственного производства перспективного биотехнологического подхода на разнообразных примерах семенного материала при обработке экологически безопасными биопрепаратами, представляющими собой водные дисперсии фуллеренсодержащих соединений, продемонстрирована эффективность, универсальность и воспроизводимость оказываемого ростостимулирующего воздействия.

Ключевые слова: фуллерен C_{60}, фуллереновый экстракт, фуллереновая сажа, водная дисперсия, ростостимуляция, обработка семян, противовирусная активность, сельскохозяйственные культуры, урожайность

DOI: 10.56304/S0234275824040124

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что углеродные наноматериалы, такие как нанотрубки [1, 2], фуллерен C_{60}, C_{70} и их производные [3] проявляют биологическую активность, которая выражается в ингибировании [4] либо стимулировании проращивания семян, роста проростков, а также оказывает влияние на показатели урожайности [5, 6] ряда сельскохозяйственных культур [7, 8]. В настоящее время назрела потребность в новых экологически безопасных регуляторах роста (РР) растений, применяя которые можно обеспечивать прирост биомассы, увеличивать урожайность растений [9]. Ценным качеством, определяющим возможность использования РР в биотехнологических процессах сельскохозяйственного производства, является его экологическая безопасность [10]. Наряду с негативными процессами эрозии и истощения почв, их загряз-

Список сокращений: ВД – водная дисперсия, ВТМ – вирус табачной мозаики, ИУК – индол-3-уксусная кислота, МАЛДИ – матрично-активированная лазерная десорбция-ионизация, НМ – наноматериалы, ОФ ВЭЖХ – обращенно-фазовая жидкостная хроматография, РР – регуляторы роста, СФн – фулереновая сажа, УЗ – ультразвук, Фн – фуллерен C_{60}, ЭФн – фуллереновый экстракт, DCTB – [(2*E*)-3-(4-*трет*-бутилфенил)-2-метил-2- пропенилиден]малононитрил.

нение химическими регуляторами роста в результате накопления этих веществ в почве при внесении в среду обитания растения в качестве сухого удобрения, жидкой корневой подкормки или посредством опрыскивания зеленой массы может привести к непригодности посевных площадей для выращивания важных в продовольственном отношении сельскохозяйственных культур [11]. Стоимость и трудоемкость получения из доступных источников являются важными факторами, влияющими на эффективность использования РР растений в сельскохозяйственном производстве [12].

Поиск эффективных и экологически безопасных РР в современных условиях ведения сельского хозяйства позволяет обеспечить возможность применения химических веществ, оказывающих действие на развитие растения, его метаболические процессы, биомассу его различных частей и урожайность. Особый интерес в данной области представляют химические соединения с наименьшей токсичностью для живых организмов, в частности, к таковым относятся фуллерены C_{60}, C_{70} и их производные.

Создание высокоэффективных экологически безопасных препаратов для повышения продуктивности и устойчивости агро- и экосистем – актуальная научно-прикладная задача, имеющая международное значение в свете решения проблем земледелия на территории страны, включающей зоны рискованного земледелия, подверженные резким климатическим изменениям [13]. В минувшее десятилетие наметилась тенденция, связанная с изучением влияния, оказываемого наноматериалами (НМ) на рост и развитие растений [7, 8, 14–16]. К классу НМ, используемых в качестве РР растений можно отнести фуллерен C_{60} и смеси гомологичных фуллеренов (присутствующие в составе их водных дисперсий).

Целью настоящей работы явилось исследование водных дисперсий (ВД), или коллоидных растворов, получаемых на основе индивидуального фуллерена C_{60} (Фн), а также фуллеренсодержащих субстанций, получаемых из отходов производства фуллерена C_{60} – фуллеренового экстракта (ЭФн) и фулереновой сажи (СФн), содержащих смеси гомологичных фуллеренов, – биопрепаратов, имеющих перспективы использования в качестве эффективных и экологически безопасных РР растений и проращивания семян важных в продовольственном отношении сельскохозяйственных культур.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Индивидуальные фуллерены C_{60}, C_{70} (чистоты 99.9% и 99.8% соответственно), а также фуллереновый экстракт (ЭФн, содержащий 65–75% C_{60}, 20–25% C_{70} и примеси высших фуллеренов) и фуллереновая сажа (СФн, содержащая 65–75% C_{60}, 20–25% C_{70}, а также примеси высших фуллеренов и примеси полимеризованных фуллеренов) были преобретены в ООО “Фуллерен-Центр”, Россия.

В качестве биологических объектов для исследований использовали растения табака культурного (*Nicotiana tabacum* L.) сорта XhantiNN (урожай 2017 г., всхожесть 85%), выращенные в лаборатории искусственного климата (ЛИК Всероссийского научно-исследовательского института фитопатологии), а также семена сельскохозяйственных культур, таких как яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта “Лада” (урожай 2014 г., всхожесть 40%); яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта “Лада” (урожай 2018 г., всхожесть 99%); яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта “Воевода” (урожай 2017 г., всхожесть 99%), озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта “Рубежная” (урожай 2018 г., всхожесть 99%); яровой овес (*Avena sativa* L.) сорта “Скакун” (урожай 2019 г., всхожесть 50%); яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта “Вереск” (урожай 2019 г., всхожесть 80%); озимая рожь (*Secale cereale* L.) сорта “Орловская” (урожай 2019 г., всхожесть 99%); тыква твердокорая (*Cucurbita pepo* L.) сортов “Улыбка” (урожай 2019 г., всхожесть 95%) и “Мускатная” (урожай 2019 г., всхожесть 95%), а также горох посевной (*Pisum sativum* L.) сорта “Фараон” (урожай 2019 г., всхожесть 100%).

Эксперименты на растительных объектах проводили в ноябре 2019 г., и на этом основании все семена урожая 2019 г. можно считать свежими, а остальные семена – старыми (залежавшимися). Испытания на яровой пшенице сорта “Воевода” проводили в ноябре 2017 г., а на озимой пшенице сорта “Рубежная” – в сентябре 2019 г., и на этом основании семена указанных культур можно считать свежими. В работе использовали семенной материал, полученный в рамках ГЗ 122042500074-5 из коллекции отдела Отдаленной гибридизации Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН (ГБС РАН).

Вирус табачной мозаики (ВТМ) был предоставлен из коллекции патогенов растений Всероссийского научно-исследовательского института фитопатологии (ВНИИ фитопатологии).

Исходные (насыщенные) ВД, приготовлены на основе Фн, ЭФн или СФн при обработке ультразвуком (УЗ), оказываемом на гетерогенную систему, состоящую из равных объемов насыщенного органического (толуольного или *о*-ксилольного) раствора соответствующих фуллеренсодержащих компонентов и дистиллированной воды. Воздействие УЗ (с рабочей частотой 42 кГц и мощностью 50 Вт) осуществляли в течение 6 ч в ультразвуковой ванне (CODYSON CD-7810A, Китай). Затем водную фазу (ВД, или водный коллоидный раствор) в делительной воронке отделяли от органической фазы. После чего через ВД пропускали ток аргона со

скоростью 0.1 мл/мин в течение 8 ч с целью удаления остатков органического растворителя. Концентрацию приготовленной исходной (насыщенной) ВД Фн определяли гравиметрическим (весовым) анализом с использованием так называемого метода выделения, состоящего в упаривании воды из аликвоты ВД (при $T = 20$°C и атмосферном давлении) и измерении веса (взвешивании) полученного сухого остатка C_{60}; состав и концентрации исходных (насыщенных) ВД ЭФн и ВД СФн определяли гравиметрическим (весовым) анализом и обращенно-фазовой жидкостной хроматографией (ОФ ВЭЖХ).

Пробоподготовку и ОФ ВЭЖХ-анализ ВД ЭФн или ВД СФн осуществляли следующим образом. Анализируемую ВД при 20°C и атмосферном давлении упаривали досуха, и затем сухой остаток растворяли в *о*-ксилоле. Гомологичные фуллерены (C_{60} и C_{70}) разделяли ОФ ВЭЖХ с применением хроматографа Agilent 1100 (Agilent, Германия) и аналитической колонки с неподвижной фазой Kromasil C18 (150 × 2.1 мм × 5 мкм) (Kromasil, Швеция); подвижная фаза: смесь дихлорметана и ацетонитрила (в соотношении 4 : 1 (v/v)), со скоростью потока 0.15 мл/мин. Колонку термостатировали при 20°. Детектирование осуществляли с использованием диодно-матричного УФ-детектора ВЭЖХ системы Agilent 1100. Анализируемые фуллерены детектировали при длинах волн 254, 328, 340 и 378 нм. Регистрирование сигнала детектора и обработку хроматографических данных проводили с использованием программного обеспечения Leochem 8.03RUS 3D-LC (Leochem, Китай).

Масс-спектры матрично-активированной лазерной десорбции-ионизации (МАЛДИ) регистрировали в режиме отрицательных ионов с использованием рефлекторного времяпролетного масс-спектрометра Bruker AutoFlex II (США), оборудованного азотным лазером (с длиной волны 337 нм и импульсом 1 нс). В качестве матрицы использовали 2-[(2*E*)-3-(4-*трет*-бутилфенил)-2-метил-2-пропенилиден]малононитрил (DCTB, чистота ≥99%, Fluka, США); пробоподготовку проводили методом высушенной капли с использованием растворов DCTB и аналита в толуоле; соотношение аналит/матрица составляло 1 : 1000.

Семена табака культурного (*Nicotiana tabacum* L.) сорта Xanthi NN высевали в горшки с почвой. Через 2 недели после появления всходов, растения табака пересаживали в индивидуальные горшки (объемом 400 мл) и выращивали в ЛИК в условиях 16-часовой продолжительности дня и температуре 24°C (днем) и 18°C (ночью). Для дальнейших опытов использовали растения в фазе 5–6 листьев. Для опытов по противовирусной активности отбирали по 5 листьев с разных растений. Левую половину листа обрабатывали порошком карборунда (Волжский абразивный завод, Россия) [17] и 60 мкл ВД Фн, взятую в концентрациях 10^{-6} или 10^{-9} М, а также суспензией клеток вируса табачной мозаики (ВТМ) с концентрацией 10 мкг/мл в водном буферном растворе 0.01 М, Трис-HCl (pH 7.5). Правую половину листа обрабатывали порошком карборунда и 60 мкл смеси, содержащей равные объемы дистиллированной воды и суспензии клеток ВТМ. Для заражения использовали сок растения табака, инфицированного ВТМ, разбавленный в 10 тысяч раз дистиллированной водой (при этом предварительно подбирали концентрацию инокулюма таким образом, чтобы при нанесении 30–50 мкл водной суспензии вируса на листе образовывалось от 40 до 100 некрозов). Обработанные листья помещали во влажную камеру при температуре 22°C. Количество некрозов, образовавшихся в ответ на инокуляцию ВТМ, подсчитывали отдельно для каждой половины листа через 3–4 сут.

Семена гороха посевного сорта “Фараон” предварительно обрабатывали (замачивали) в течение 2 ч в присутствии исследуемых фуллеренсодержащих ВД, после чего переносили на фильтровальную бумагу в чашки Петри, и далее – проращивали на свету в течение 8 сут при температуре 23°C. Наблюдаемые физиологические показатели (всхожесть, энергия прорастания и длина корешка) регистрировали и учитывали как среднее арифметическое значений, получаемых в трех повторностях. В каждой из повторностей проращивали по 100 шт. семян. Длину корешка и лабораторную всхожесть определяли на 8 сутки. Показатель энергии прорастания – на 4 сутки. Измерение показателей всхожести и энергии прорастания проводили в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 12038–84 [18].

Семена яровой пшеницы сорта “Лада” урожая 2014 и 2018 г. и озимой ржи сорта “Орловская” помещали в чашки Петри (по 50 шт.), располагая на фильтровальной бумаге, смоченной фуллеренсодержащей ВД. Добавляли по 5 мл соответствующей ВД, затем чашки Петри помещали в климатическую камеру MLR-352H Sanyo (Panasonic, Япония), где были установлены следующие экспериментальные режимы: плотность фотосинтетического фотонного потока, равная 14 мкмоль/м$^2 \cdot$ с; температура 7°C (ночью) и 12°C (днем); продолжительность светового дня – 10 ч.

В экспериментах с семенами яровых овса сорта (“Скакун”) и ячменя сорта “Вереск” (по 100 шт.) проращивание осуществляли при комнатной температуре. В контрольных экспериментах использовали дистиллированную воду.

Семена яровой пшеницы сорта “Лада” урожая 2014 г. (50 шт.) проращивали в течение 1 сут при комнатной температуре (20°C) до появления проростков, а затем переносили в климатическую камеру с вышеуказанными параметрами режима.

Условия проращивания варьировались в зависимости от используемых в эксперименте семян злаковых культур, имеющих различные показатели всхожести и сроки хранения.

Исследование типа воздействия (стимулирующего либо ингибирующего), оказываемого со стороны ВД Фн на процесс проращивания семян яровой пшеницы сорта "Воевода", а также сравнительный анализ наблюдаемых ростовых показателей со значениями, получаемыми в случае использования в качестве РР водного раствора гетероауксина (индол-3-уксусной кислота, ИУК, 5.7×10^{-5} М), осуществляли по методике проращивания в рулонах фильтровальной бумаги в соответствии с ГОСТом 12038–84 [18]. Так, семена промывали стерильной дистиллированной водой и инкубировали в течение 16–18 ч в присутствии ВД Фн или дистиллированной воды (контроль), причем в расчете на 200 шт. семян брали 50 мл ВД или дистиллированной воды. Затем семена раскладывали в линию на полоски фильтровальной бумаги и накрывали такой же полоской фильтровальной бумаги, смоченной соответствующей фуллеренсодержащей ВД или дистиллированной водой (в контрольном опыте), поверх которой накладывали полоску полиэтилена, и всю конструкцию сворачивали в рулон. Рулоны ставили вертикально в стеклянные стаканы и помещали в термостат при температуре 22–25°С на 7 сут. При проращивании семян не допускали подсыхания рулонов. По истечении указанного срока регистрировали значения длин побегов и корней.

Статистический анализ полученных экспериментальных данных проведен с применением *t*-критерия Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0.05$ (расчеты выполнены с использованием программного обеспечения STATISTICA 6.0, StatSoft Inc.).

Семена тыквы твердокорой сортов "Мускатная" и "Улыбка" (по 20 шт.) предварительно замачивали в течение 2 ч в присутствии 5 мл фуллеренсодержащих ВД. Затем семена переносили в чашки Петри, помещая на подложки из фильтровальной бумаги, смоченной соответствующей ВД, и проращивали на свету в течение 8 сут при температуре 25°С. По истечении указанного срока регистрировали наблюдаемые физиологические показатели, учитывая их как среднее арифметическое значений, получаемых в трех повторностях.

Для полевого опыта семена озимой пшеницы сорта "Рубежная" предварительно замачивали в течение 5 ч при дневном освещении в присутствии ВД Фн (с концентрацией 10^{-9} М) или дистиллированной воды (контроль).

В полевом опыте на 10 м^2 посевной площади брали 200 г семенного материала и 200 мл соответствующей фуллеренсодержащей ВД (в предположении, что в указанной совокупности будет высеяно не менее 5 млн шт. всхожих семян на гектар).

После проведенной предпосевной обработки семена озимой пшеницы сорта "Рубежная" просушивали и производили посев в открытый грунт на опытном участке Отдела отдаленной гибридизации ГБС им. Н.В. Цицина РАН (Московская область) на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве (с применением сеялки СН-16 (Россия) в рекомендуемые для г. Москвы и Московской области сроки [19]. Посев семян в соответствии с методикой полевого опыта осуществляли в 5-кратной повторности, размещая их друг относительно друга рандомизированном (случайном) порядке. Сбор урожая производили с применением селекционного комбайна Сампо-500 (Sampo, Финляндия) в период вегетативной фазы полной спелости.

Предварительно была отобрана пробная партия снопов пшеницы с целью проведения учета биологической урожайности и структуры урожая по методике Госсорткомиссии [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении эксперимента по проращиванию семян яровой пшеницы сорта "Воевода" в присутствии ВД Фн, подбирали такую концентрацию Фн, которая оказалась бы оптимальной для эффективного стимулирующего воздействия, оказываемого на рост корней и проростков на ранних стадиях вегетации. Для обработки (замачивания) семян были использованы следующие концентрации ВД Фн 10^{-6}, 10^{-9} и 10^{-12} М. Данные, полученные в эксперименте, представлены в табл. 1.

Для использования в последующих экспериментах выбрана концентрация ВД Фн, равная 10^{-9} М, наиболее эффективно оказывающая ростостимулирующее воздействие, что подтверждено эмпирическими данными по ростовым характеристикам.

Ростостимулирующее действие, оказываемое ВД Фн в выбранной концентрации, тестировали при проращивании семян яровой пшеницы сорта "Воевода" в рулонах. В качестве контроля использовали дистиллированную воду и водный раствор ИУК (5.7×10^{-5} М). Полученные в этом эксперименте данные приведены в табл. 2.

В лабораторном опыте по проращиванию семян пшеницы ярового сорта "Воевода" в рулонах в течение 7 или 10 дней выявлено выраженное ростостимулирующее воздействие, проявившееся в статистически значимом увеличении длин корней и проростков при замачивании семян в ВД Фн (с концентрациями 10^{-6} или 10^{-9} М). Кроме того, оценка ростостимулирующего эффекта, проведенная на основе сравнения наблюдаемых значений ростовых показателей при использовании для обработки семян раствора традиционного РР (гетероауксин) и ВД Фн, свидетельствовала о перспективности применения последнего.

Таблица 1. Ростовые показатели и эффект стимуляции роста относительно контроля (дистиллированной воды), полученные в эксперименте по проращиванию семян яровой пшеницы сорта “Воевода” при их обработке (замачивании) различными концентрациями ВД Фн

Table 1. Growth parameters and growth-stimulating effect relative to the control (distilled water), obtained as result of WD Fn seeds treatment (soaking) during the germination of spring wheat seeds of the “Voevoda” variety

Концентрация Фн (в ВД), М	Энергия прорастания и лабораторная всхожесть*, %	Длина проростков, см	Прирост длины проростков, %	Длина корней, см	Прирост длины корней, %
1×10^{-6}	92	6.30 ± 0.21	127.4**	12.07 ± 0.4	114.5**
1×10^{-9}	96	7.24 ± 0.22	128.9**	12.25 ± 0.46	130.9**
1×10^{-12}	97	6.18 ± 0.35	94.4	8.97 ± 0.59	112.7
Контроль	93	5.53 ± 0.23	–	9.5 ± 0.25	–

Примечание. * – энергия прорастания и лабораторная всхожесть имеют равные значения.** – статистически значимая разница между контрольными и опытными величинами.
Note. * – germination energy and germination index are equal. ** – difference between control and experimental values is statistically significant.

Таблица 2. Ростовые показатели и эффект стимуляции роста (относительно контрольных опытов), полученные в эксперименте по проращиванию сеян яровой пшеницы сорта “Воевода” при их замачивании в присутствии ВД Фн (10^{-9} М)

Table 2. Growth parameters and growth-stimulating effect relative to the controls, obtained as result of WD Fn (10^{-9} M) seeds treatment (soaking) during the germination of spring wheat seeds of the “Voevoda” variety

Соединение	Энергия прорастания, %	Лабораторная всхожесть, %	Длина проростков, см	Прирост длины проростков, %	Длина корней, см	Прирост длины корней, %
Фн	94	98	15.69 ± 0.59	110.3*	8.97 ± 0.37	125.1*
ИУК (контроль)	96	98	14.11 ± 0.63	99.2	8.11 ± 0.25	113.1*
Вода дистиллированная (контроль)	95	96	14.22 ± 0.48	–	7.17 ± 0.4	–

Примечание: * – статистически значимая разница между контрольными и опытными величинами.
Note: * – difference between control and experimental values is statistically significant.

Эффект, заключающийся в увеличении доли (%) проросших семян в сравнении с контрольным опытом (в присутствии дистиллированной воды), продемонстрирован в эксперименте по проращиванию семян гороха посевного сорта “Фараон” и тыквы твердокорой сортов “Улыбка” и “Мускатная”. В случаях упомянутых сельскохозяйственных культур в результате обработки семян в присутствии фуллерен-содержащей ВД увеличение доли проросших семян происходило в установленные сроки, причем в случае гороха посевного зарегистрировано также и увеличение (в сравнении с контролем) длины проростка.

Для тестирования присущих Фн свойств противовирусной активности [21, 22], которые потенциально могут играть роль важного фактора, способствующего ростостимуляции, листья табака культурного обрабатывали ВД Фн с концентрациями, равными 10^{-6} и 10^{-9} М в условиях заражения растений ВТМ. Согласно результатам эксперимента, при указанных концентрациях ВД Фн статистически значимых различий по среднему количеству некрозов на подвергнутых заражению частях листа растения не отмечено. Встречаемость (количество) некрозов на обработанных и необработанных фуллеренсодержащим препаратом (контрольных) зараженных листовых пластинах в случае обработки ВД Фн с концентрацией 10^{-6} М составила соответственно 60.3 ± 5.4 и 63.7 ± 6.8, тогда как при концентрации ВД Фн 10^{-9} М таковые значения составили соответственно 53.4 ± 4.9 и 59.3 ± 6.4.

Таким образом, на основании анализа полученных экспериментальных данных сделан вывод о том, что обработка растений табака культурного ВД Фн (с концентрациями 10^{-6} и 10^{-9} М) приводит лишь к незначительному снижению количества наблюдаемых некрозов, возникающих в результате заражения ВТМ. При этом разница в наблюдаемых значениях показателей в опытных и контрольных экспериментах находится в пределах доверительного интервала.

Таблица 3. Составы и концентрации фуллеренсодержащих ВД, использованных в экспериментах
Table 3. Compositions and concentrations of fullerenecontaining WDs used in the experiments

ВД	Состав и концентрация фуллерен-содержащей ВД, М
1	$(C_{60}) = 2.0 \times 10^{-6}$
2	$(C_{60}) = 2.0 \times 10^{-9}$
3	Смеси фуллеренов из ЭФн (содержание (%) C_{60} и C_{70} – соответственно 72.4 и 22.7) $(C_{60}) = 2.0 \times 10^{-6}$ и $(C_{70}) = 9.9 \times 10^{-7}$
4	Смеси фуллеренов из ЭФн (содержание (%) C_{60} и C_{70} – соответственно 72.4 и 22.7) $(C_{60}) = 2.0 \times 10^{-9}$ и $(C_{70}) = 9.9 \times 10^{-10}$
5	СФн (без аморфного углерода): $(C_{60}) = 7.7 \times 10^{-6}$ М (содержание (%) C_{60} 75.2)
6	СФн (без аморфного углерода): $(C_{60}) = 7.7 \times 10^{-9}$ М (содержание (%) C_{60} 75.2)

Результат, проведенного предварительного эксперимента продемонстрировал проявляемое в очень незначительной степени противовирусное воздействие со стороны ВД Фн, что не позволяет пока говорить о перспективе его применения в качестве биопрепарата для защиты растений. В этой связи, однако, важно отметить, что снижение количества наблюдаемых некрозов листьев табака культурного при обработке ВД Фн более корректным было бы связывать не с проявлением противовирусной активности фуллерена C_{60}, а с увеличением устойчивости растений к неблагоприятным факторам благодаря их обработке ВД Фн.

Исследовано влияние, оказываемое обработкой биопрепаратами на основе ВД (с различными концентрациями), содержащими как индивидуальный Фн (C_{60}), так и смеси гомологичных фуллеренов, присутствующих в фуллереновом экстракте (ЭФн) и фуллереновой саже (без аморфного углерода, СФн на процесс прорастания семян зерновых сельскохозяйственных культур (в том числе образцы старых (залежавшихся) семян или семян с низкой всхожестью). Семена подвергали обработке (замачивали) различными фуллеренсодержащими ВД, компонентные составы и концентрации которых приведены в табл. 3. При тестировании в экспериментах с биологическими объектами; в качестве контроля использовали дистиллированную воду.

Компонентные составы смесей фуллеренов (в ЭФн и СФн) определены масс-спектрометрией с использованием метода МАЛДИ. Результаты анализа представлены на рис. 1*a* (для ЭФн) и 1*b* (для СФн). В составе фуллеренсодержащих смесей подтверждено присутствие фуллеренов C_{60}, C_{70} и C_{84}, которым соответствуют пики (*m/z*) 720.0, 840.0 и 1008.0 (с преобладанием в смеси фуллерена C_{60}; пики (*m/z*) 736.0 и 856.0 соответствуют ионам окисленных форм фуллеренов ($C_{60}O$ и $C_{70}O$), а пики (*m/z*) 970.1 и 1090.1 соответствуют анионным комплексам ($[C_{60}\cdot DCTB]^-$ и $[C_{70}\cdot DCTB]^-$), которые образуются соответствующими фуллеренами с веществом из матрицы в результате лазерной абляции в процессе масс-спектрометрического анализа.

В табл. 4 и на рис. 2 представлены результаты экспериментов по проращиванию старых (залежавшихся) семян (урожая 2014 г.), свежих семян (урожая 2018 или 2019 гг.) и свежих семян злаковых культур с низкой всхожестью, обработанных фуллеренсодержащими ВД, полученными на основе индивидуального Фн, а также ЭФн или СФн. Вес проростков определяли: на *5-й ; **7-й; и ***10-й день проращивания.

Поскольку в эксперименте использованы семена культур не только с высокой, но и с пониженной всхожестью, и в ряде случаев образование проростка происходило в сроки, превышающие установленный ГОСТом 12038–84 трехдневный период, то в качестве сравнения приведены доли семян, образовавших проростки на 3-й день после начала формирования стебля. Все эксперименты проводились в трех повторностях, ошибка измерений составляла не более, чем 15%.

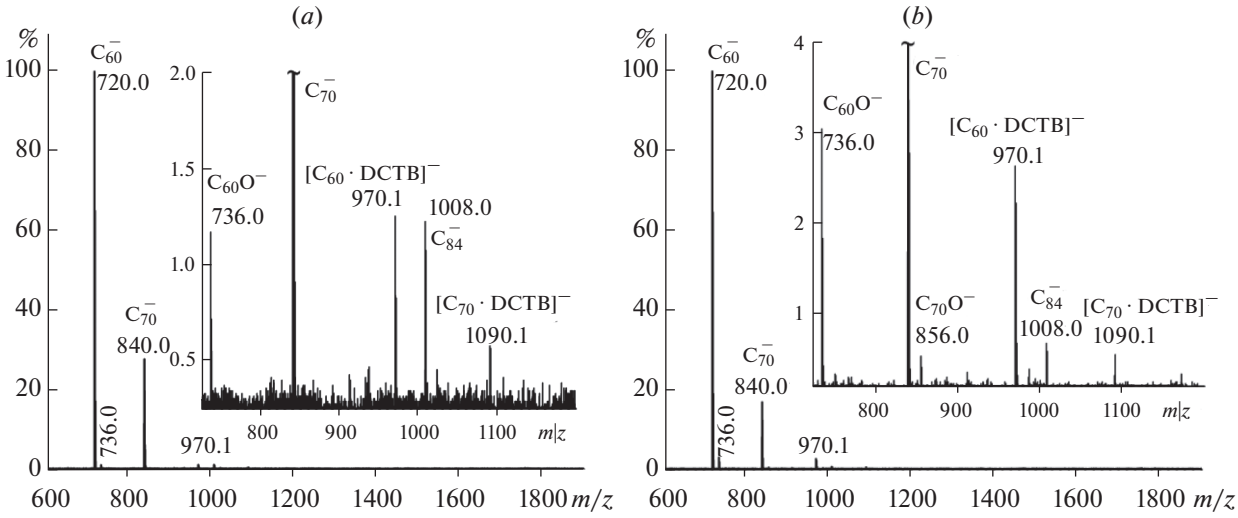

Рис. 1. Масс-спектры МАЛДИ отрицательных ионов образцов ЭФн (*a*) и СФн (*b*). На вставках показано увеличенное изображение фрагмента спектра в диапазоне *m/z* 725–1200 Да.
Fig. 1. Negative ion MALDI mass spectra of samples EFn (*a*) and SFn (*b*). The insets show a magnified image of a fragment of the spectrum in the range *m/z* 725–1200 Da.

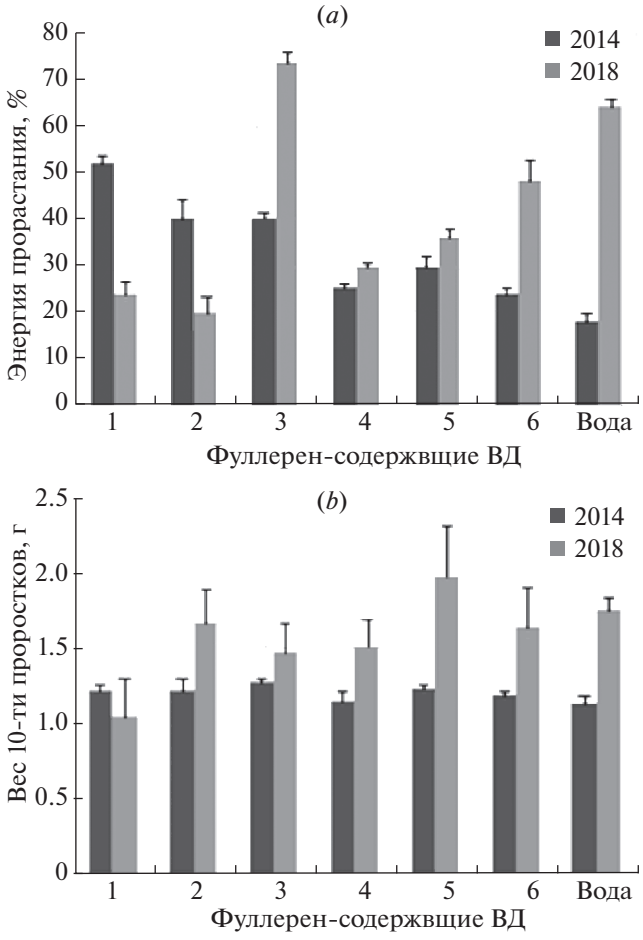

Рис. 2. Влияние обработки семян яровой пшеницы сорта “Лада” урожаев 2014 и 2018 гг. с использованием фуллерен-содержащих ВД, приведеннызх в табл 3. *a* – Энергия прорастания, *b* – суммарный вес проростков на 10 день прорашивания.
Fig. 2. The effect of seed treatment of spring wheat variety “Lada” of the 2014 and 2018 harvests using fullerenecontaining WDs, ptesented in Table 3. *a* – Germination energy, *b* – total weight of seedlings on the 10th day of germination.

Таблица 4. Доля семян, образовавших корни и проростки, а также веса 10 проростков, зарегистрированные при проращивании семян злаковых культур в присутствии фуллеренсодержащих ВД
Table 4. Proportions of seeds that formed roots and seedlings, as well as the weights of 10 seedlings, acquired during the germination of cereal seeds using fullerenecontaining WDs

ВД[a)]	Доля семян, образовавших проростки[b)], %	Доля семян, образовавших корни на 3 день проращивания, %	Вес 10 проростков, г
Яровой ячмень сорта “Вереск” (урожай 2019 г., всхожесть 80%)			
1	68	47	1.56**
2	49	41	1.71
3	58	30	1.63
4	68	33	1.38
5	48	37	1.81
6	51	36	2.06
Вода (дистиллированная), контроль	50	36	1.78
Яровой овес сорта “Скакун” (урожай 2019 г., всхожесть 50%)			
1	31	8	3.26*
2	36	13	3.11
3	16	13	3.32
4	29	12	2.77
5	27	12	3.79
6	37	13	2.28
Вода (дистиллированная), контроль	35	12	2.33
Озимая рожь сорта “Орловская” (урожай 2019 г., всхожесть 99%)			
1	98	71	1.14**
2	94	68	1.19
3	94	68	1.16
4	98	52	1.13
5	94	58	1.05
6	95	60	1.13
Вода (дистиллированная), контроль	94	61	1.17
Яровая пшеница сорта “Лада” (урожай 2018 г., всхожесть 99%)			
1	24	90	1.31***
2	20	89	1.31
3	74	97	1.27
4	30	84	1.31
5	36	97	1.23
6	48	100	1.15
Вода (дистиллированная), контроль	64	97	1.13

Примечание. [a)] Нумерация ВД приведена в соответствии с данными табл. 3.
[b)] Доля семян, образовавших проростки на 3 день после начала проращивания семени.
Время проращивания семян * – 5 день, ** – 7 день, *** – 10 день.
Note. [a)] WD numering corresponds to one presented in table 3.
[b)] Proportions of seeds that formed seedlings on the 3rd day after the start of seed germination.
Time of seed germination * – 5th day, ** – 7th day, *** – 10th day.

Таблица 5. Показатели энергии прорастания, всхожести и длины проростков, зарегистрированные в эксперименте по проращиванию семян гороха посевного сорта “Фараон” с использованием фуллеренсодержащей ВД 2 (нумерация ВД приведена в соответствии с данными табл. 3)
Table 5. Values of germination energy, germination index and length of seedlings obtained in an experiment on germination of pea seeds of the “Pharaoh” variety using fullerenecontaining WD 2 (numbering for WD is given in accordance with the data in Table 3)

Обработка семян	Энергия прорастания на 3 день, %	Лабораторная всхожесть на 7 день, %	Длина корешка на 3 день, см
ВД 2	100	100	3.80 ± 1.24
Вода (дистиллированная), контроль	88	90.3	3.30 ± 0.67

Таблица 6. Показатели энергии прорастания, зарегистрированные в экспериментах по проращиванию семян тыквы твердокорой сортов “Улыбка” и “Мускатная” с использованием фуллеренсодержащей ВД 2 (нумерация ВД приведена в соответствии с данными табл. 3)
Table 6. Values of germination energy obtained in the experiment on the germination of summer pumpkin seeds of the varieties “Ulybka” and “Muskatnaya” using fullerenecontaining WD 2 (numbering for WD is given in accordance with the data in Table 3)

Сорт тыквы твердокорой	Обработка семян	Энергия прорастания, %		
		Срок проращивания		
		5 день	10 день	15 день
“Улыбка”	ВД 2	15.0	42.5	55.0
	Вода (дистиллированная), контроль	11.3	38.1	53.8
“Мускатная”	ВД 2	43.3	56.7	73.3
	Вода (дистиллированная), контроль	20.0	50.0	86.7

Из экспериментальных данных, представленных в табл. 4, следует, что в ряде случаев наблюдаются повышенные (в сравнении с контролем) значения ростовых показателей, продемонстрированные на примерах семян яровых ячменя и овса, а также озимой ржи, обработанные ВД Фн, ВД ЭФн или ВД СФн. Для яровых растений, пшеницы сорта “Лада” и овса сорта “Скакун” степень оказываемого ростостимулирующего воздействия (для всех тестируемых фуллеренсодержащих ВД) определяли по показателю веса 10 проростков. Так, в частности, при обработке фуллеренсодержащими ВД свежих семян яровой пшеницы сорта “Лада” наблюдали уменьшение показателей энергии прорастания, но увеличение веса проростков. В случае старых (залежавшихся) семян яровой пшеницы сорта “Лада” обработка фуллерен-содержащими ВД стимулировала рост проростков и увеличение доли проросших семян на 3-й день.

Обработка ВД Фн (в концентрации 10^{-9} М) других сельскохозяйственных культур, таких как горох посевной и тыква твердокорая, способствовала более высоким ростовым показателям, в сравнении с контролем (табл. 5 и 6).

Полевой опыт и регистрацию данных по урожайности осуществляли на семенном материале озимой пшеницы сорта “Рубежная” при использовании для предпосевной обработки ВД Фн (с концентрацией 10^{-9} М). Полученные в полевом опыте продукционные показатели структуры урожая приведены в табл. 7.

В полевом опыте продемонстрировано увеличение показателей урожайности озимой пшеницы сорта “Рубежная”, семена которой подвергались предпосевной обработке ВД Фн (с концентрацией 10^{-9} М). В сравнении с контролем, значения почти всех регистрируемых ростовых показателей (показателей структуры урожая), таких как длина растений (на момент сбора урожая), количество стеблей и колосьев в растении, количество зерен и колосков в колосе, масса зерна в одном колосе оказались повышенными.

Вышеупомянутые результаты полевого опыта на примере озимой пшеницы сорта “Рубежная” позволили сделать вывод об эффективности применения биопрепарата ВД Фн для предпосевной обработки с целью повышения урожайности.

Необходимо отметить, что использование в экспериментах биопрепаратов на основе не только ин-

Таблица 7. Продукционные показатели озимой пшеницы сорта “Рубежная”, полученные в полевом опыте
Table 7. Production characteristics for winter wheat variety “Rubezhnaya”, obtained in a field experiment

Номер опытного образца	Растений на 1 м пог., шт.	Высота растения, см	На одно растение, шт.		Длина колоса, см	Колосков в колосе, шт.	Зерен в колосе, шт.	Масса зерна в колосе, г	Масса зерна в растении, г	Суммарно солома и мякина, г		Растений на $м^2$, шт.	Масса зерна на $м^2$, г
			стеблей	колосьев						в одном растении	на 1 м пог.		
Вода (дистиллированная), контроль													
I	56	68.3	1.0	1.0	4.9	10.5	19.9	0.9	0.9	0.8	47.5	373.5	350.8
II	57	60.2	1.0	1.0	4.2	9.3	14.7	0.6	0.6	0.7	38.1	380.2	220.8
III	47	70.7	1.1	1.1	5.8	12.3	28.2	1.3	1.4	1.0	46.3	313.5	442.9
IV	51	75.1	1.2	1.2	5.5	12.1	23.2	1.0	1.2	1.2	60.5	340.2	430.2
V	51	80.2	1.4	1.4	6.6	13.0	28.1	1.4	1.9	1.6	79.6	340.2	627.0
Среднее	**52.4**	**70.9**	**1.1**	**1.1**	**5.4**	**11.4**	**22.8**	**1.0**	**1.2**	**1.0**	**54.4**	**349.5**	**414.3**
ВД Фн													
I	59	63.5	1.1	1.1	4.6	11.6	19.8	0.9	0.9	0.7	39.0	393.5	369.5
II	61	68.6	1.0	1.0	4.6	9.7	19.4	0.9	0.9	0.6	38.8	406.9	366.9
III	38	74.1	1.3	1.3	6.5	12.7	25.9	1.3	1.6	1.2	43.8	253.5	408.2
IV	31	80.4	1.9	1.9	6.9	13.6	31.2	1.7	3.2	3.1	96.5	206.8	630.3
V	53	77.8	1.4	1.4	6.2	13.0	30.3	1.4	2.0	1.3	70.2	320.2	692.3
Среднее	**48.4**	**72.9**	**1.3**	**1.3**	**5.8**	**12.1**	**25.3**	**1.2**	**1.7**	**1.4**	**57.7**	**316.2**	**493.4**

дивидуального фуллерена C_{60}, но и других фуллеренсодержащих источников (субстанций), таких как фуллереновый экстракт (ЭФн) или фуллереновая сажа (СФн), будет экономически целесообразным, если их применение покажет ростостимулирующее воздействие сравнимое с эффектом Фн.

Полученные экспериментальные данные позволили сделать вывод о том, что характер ростостимулирующего воздействия фуллеренсодержащих ВД может быть сортоспецифическим и видоспецифическим. Примечательно, что ВД ЭФн и ВД СФн способны эффективно стимулировать прорастание семян злаковых сельскохозяйственных культур, в особенности старых (залежавшихся) семян или семян с низкой всхожестью.

Таким образом, в настоящем исследовании в рамках предлагаемого для сельскохозяйственного производства перспективного биотехнологического подхода на примерах разнообразного семенного материала важных в продовольственном отношении злаковых и овощных сельскохозяйственных культур при обработке экологически безопасными биопрепаратами, представляющими собой водные дисперсии фуллерен-содержащих соединений, продемонстрирована эффективность, универсальность и воспроизводимость оказываемого ростостимулирующего воздействия, сравнимого с тем, которое известно из данных, опубликованных в отечественной и мировой литературе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят за участие в работе и предоставленные экспериментальные данные Воронкову Татьяну Владимировну (ФГБУН Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, г. Москва; проращивание семян) и Карташова Максима Игоревича (ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, Московская область, Одинцовский район, р.п. Большие Вяземы; проращивание семян и определение противовирусной активности).

Исследования проведены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации с использованием научного оборудования ИНЭОС им. А.Н. Несмеянова РАН

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-03-2023-642 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tiwari D.K., Dasgupta-Schubert N., Villaseñor Cendejas L.M., Villegas J., Carreto Montoya L., Borjas García S.E.* Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: enhancement of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (*Zea mays*) and implications for nanoagriculture. *Appl. Nanosci.*, 2014, 4(5), 577–591. https://doi.org/10.1007/s13204-013-0236-7
2. *Shang Y., Hasan K., Ahammed G.J., Li M., Yin H., Zhou J.* Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: a review. *Molecules*, 2019, 24(14), 2558. https://doi.org/10.3390/molecules24142558
3. *Gao J., Wang Y., Folta K. M., Krishna V., Bai W., Indeglia P., Georgieva A., Nakamura H., Koopman B., Moudgi B.* Polyhydroxy fullerenes (fullerols or fullerenols): beneficial effects on growth and lifespan in diverse biological models. PloS One, 2011, 6(5), e19976. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019976
4. *Liu Q., Zhao Y., Wan Y., Zheng J., Zhang X., Wang C., Fang X., Lin J.* Study of the inhibitory effect of water-soluble fullerenes on plant growth at the cellular level. *ACS Nano*, 2010, 4(10), 5743–5748. https://doi.org/10.1021/nn101430g
5. *Szőllősi R., Molnár A., Kondak S., Kolbert Z.* Dual effect of nanomaterials on germination and seedling growth: stimulation *vs*. phytotoxicity. *Plants*, 2020, 9(12), 1745. https://doi.org/10.3390/plants9121745
6. *Ямскова О.В., Курилов Д.В., Воронкова Т.В., Карташов М.И., Кондратьева В.В., Олехнович Л.С., Енина О.Л., Упелниек В.П., Завгородний С.В, Щуклина О.А.* Способ повышения урожайности зерновых культур. Патент RU № 2772654, опубл. 23.05.2022 Бюл. №15.
7. *Husen A., Siddiqi K.S.* Carbon and fullerene nanomaterials in plant system. *J. Nanobiotechnol.*, 2014, 12(1), 16.
8. *Zaytseva O., Neumann G.* Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. *Chem. Biol. Technol. Agric.*, 2016, 3(1), 17. https://doi.org/10.1186/s40538-016-0070-8
9. *Stella M., Asgar A., Yasmeen S., Vimala S. C.* Plant biostimulant: prospective, safe and natural resources. *J. Soil Sci. Plant Nut.*, 2022, 22(2), 2570–2586. https://doi.org/10.1007/s42729-022-00828-6
10. *Juárez-Maldonado A., Tortella G., Rubilar O., Fincheira P., Benavides-Mendoza A.* Biostimulation and toxicity: the magnitude of the impact of nanomaterials in microorganisms and plants. *J. Adv. Res.*, 2021, 31, 113–126. https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.12.011
11. *Grammenou A., Petropoulos S.A., Thalassinos G., Rinklebe J., Shaheen S.M., Antoniadis V.* Biostimulants in the soil–plant interface: agro-environmental implications – a review. *Earth Syst. Environ.*, 2023, 7(3), 583–600. https://doi.org/10.1007/s41748-023-00349-x
12. *Samuel A.C.I., Cox B.W., Cramer H.-H.* Implications of rising costs of registering agrochemicals. *Crop Protection*, 1983, 2(2), 131–141. https://doi.org/10.1016/0261-2194(83)90038-8
13. *Komarek A.M., de Pinto A., Smith V.H.* A review of types of risks in agriculture: What we know and what we need to know, *Agric. Syst.*, 2020, 178, 102738. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102738
14. *Nair R., Varghese S.H., Nair B.G. Maekawa T., Yoshida Y., Kumar D. S.* Nanoparticulate material delivery to plants, *Plant Sci.*, 2010, 179(3), 154–163. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.04.012
15. *Rico C.M., Majumdar S., Duarte-Gardea M. et al.* Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain, *J. Agric. Food Chem.*, 2011, 59(8), 3485–3498. https://doi.org/10.1021/jf104517j
16. *Aslani F., Bagheri S., Julkapli N.M., A.S. Juraimi, Hashemi F.S.G., Baghdadi A.* Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an owerview, *Sci. World J.*, 2014, 2014, 641759. https://doi.org/10.1155/2014/641759
17. *Monroy-Borrego A.G., Steinmetz N.F.* Three methods for inoculation of viral vectors into plants, *Front. Plant Sci.*, 2022, 13, 963756. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.963756
18. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести: ГОСТ 12038-84. Разработчики: Зайцев В.И., Корсакова О.М., Хорошайлов Н.Г., Антонов И.В., Борщ Л.Н., Демкин А.П., Ильинская Л.Р., Калошина З.М., Калюжный А.И., Каменская Н.Н., Квасников В.В., Корнейчук В.А., Котова С.А., Мельникова Т.М., Меловидова А.А., Микшун Т.А., Путинцев А.Ф., Рагулин М.С., Фоканов А.М., Чалый И.И., Щербакова Л.М., Яцун И.И. Дата введения 01.07.1986. Официальное издание: М.: Стандартинформ, 2011. 64 с.
19. *Щуклина О.А., Завгородний С.В., Квитко В.Е., Аленичева А.Д.* Оценка перспективных селекционых линий яровых пшенично-пырейных гибридов на тяжелосуглинистых дерново-подзолистых почвах. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*, 2023, 106, 352–356. https://doi.org/10.21515/1999-1703-106-352-356
20. *Федин М.А.* Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: Колос, 1985, 262 с.
21. *Xu P.-Y., Li X.-Q., Chen W.-G., Deng L.-L., Tan Y.-Z., Zhang Q., Xie S.-Y., Zheng L.-S.* Progress in antiviral fullerene research. *Nanomaterials (Basel)*, 2022, 12(15), 2547. https://doi.org/10.3390/nano12152547
22. *Shoji M., Takahashi E., Hatakeyama D., Iwai Y., Morita Y., Shirayama R., Echigo N., Kido H., Nakamura S., Mashino T., Okutani T., Kuzuhara T.* Anti-influenza activity of C_{60} fullerene derivatives. *PLoS One*, 2013, 8(6), e66337. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066337

Aqueous Dispertions of Fullerene C_{60} and Fullerene Mixtures as Biopreparations for Plant Growth Stimulation

O. V. Yamskova[a], D. V. Kurilov[b], O. A. Schuklina[c, #], M. M. Ilyin[a], and A. A. Gorunkov[d]

[a] *Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

[b] *Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

[c] *Tsitsin Main Botanical Garden of Russian Academy of Sciences, Moscow region, 127276 Russia*

[d] *Chemical department, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

[#] *e-mail: oashuklina@gmail.com*

Abstract—The growth-stimulating effect of biopreparations based on aqueous dispersions, or colloidal solutions, of C_{60} fullerene, including fullerene-containing substances obtained from crude products of fullerene C_{60} production process (fullerene extract and fullerene soot), on plants as a result of agricultural crops seeds treatment has been studied. In laboratory and field experiments, the growth-stimulating effect was demonstrated using examples of agricultural crops that are important in food industry, such as spring wheat (Triticum aestivum L.) varieties "Lada" and "Voevoda", winter wheat (Triticum aestivum L.) varieties "Rubezhnaya", spring oats (Avena sativa L.) variety "Skakun", spring barley (Hordeum vulgare L.) variety "Veresk", winter rye (Secale cereale L.) variety "Orlovskaya", hard-barked pumpkin (Cucurbita pepo L.) varieties "Ulybka" and "Muscat", as well as peas (Pisum sativum L.) variety "Pharaoh", due to the treatment (soaking) of seeds (both fresh and old (stale) or with low germination) in the presence of fullerenecontaining aqueous dispersions. In field experiments using the example of winter wheat (Triticum aestivum L.) variety "Rubezhnaya", an increase in the yield and vitality of plants, an increase in the weight and number of grains in an ear were demonstrated, as result of pre-sowing treatment (soaking) of seeds in the presence of fullerenecontaining aqueous dispersions. Experiments were also carried out on the example of cultivated tobacco plants (Nicotiana tabacum L.) variety "Xhanti NN", on the study of antiviral activity exerted by an aqueous dispersion of C_{60} fullerene against the tobacco mosaic virus (Tobacco mosaic virus). In the current research, within the framework of a promising biotechnological approach proposed for agricultural production, the effectiveness, versatility and reproducibility of the provided growth-stimulating effect have been proven on worthy examples of seed material when treated with environmentally friendly biopreparations, which are aqueous dispersions of fullerenecontaining compounds.

Keywords: fullerene C_{60}, fullerene extract, fullerene soot, aqueous dispersion, growth stimulation, seed treatment, antiviral activity, agricultural crops, productivity