

УДК 581.1:633.11

О.В. ЯМСКОВА, В.В. КОНДРАТЬЕВА, Т.В. ВОРОНКОВА, Л.С. ОЛЕХНОВИЧ,
Г.Ф. БИДЮКОВА, О.Л. ЕНИНА, М.И. КАРТАШОВ, Д.В. КУРИЛОВ, А.С. ЕГОРОВ,
И.А. ЯМСКОВ, Т.А. БОНДАРЕВА, Н.И. БОНДАРЕВ

ВЛИЯНИЕ КОЛЛОИДНОГО ВОДНОГО РАСТВОРА ФУЛЛЕРЕНА C₆₀, КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО РЕГУЛЯТОРА РОСТА, НА ПРОРАСТАНИЕ СЕМЯН И УРОЖАЙНОСТЬ ПШЕНИЦЫ

*Обработка семян озимой и яровой пшеницы коллоидным водным раствором фуллере-
на C₆₀ в концентрациях 10⁻⁶ и 10⁻⁹ М стимулирует их прорастание и ускоряет рост про-
ростков, что коррелирует с активацией метаболических процессов и изменением анатомиче-
ской структуры. Кроме того, предпосевная обработка семян пшеницы способствует адап-
тации растений к внешним условиям и увеличивает урожайность.*

Ключевые слова: фуллерен C₆₀, рост, урожайность, пшеница.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее важных задач биотехнологии является повышение урожайности сельскохозяйственных культур и их устойчивости к неблагоприятным условиям среды. Для этого используют биологически активные препараты различного происхождения [1-3]. Однако поиск и изучение механизма действия новых эффективных и экологически безопасных регуляторов роста растений до сих пор остается актуальной задачей.

В литературе есть данные, показывающие ростостимулирующий эффект для растений различных производных фуллере-на. Наиболее популярным среди них является фуллеренол. Обработка фуллеренолом семян арбуза в наномолярных концентрациях приводила к повышению урожайности, но данное соединение является токсичным и способно накапливаться во всех частях растений [4]. Аминокислотные производные фуллере-на оказывали ростостимулирующее и антиоксидантное действие, проявляемые в условиях облучения ультрафиолетом, на растения пшеницы и ячменя [5]. В патенте [6] был предложен стимулятор роста, представляющий собой аддукт фракции фуллеренов C₅₀-C₉₂ и гетероауксина. Нами было выдвинуто предположение, что и сам фуллерен C₆₀ может оказывать влияние на ростовую активность сельскохозяйственных культур. В настоящее время имеется ряд публикаций о действии фуллере-на и его производных на животных [7, 8], однако практически нет данных в отношении растений. Фуллерен C₆₀ обладает очень низкой растворимостью в воде, однако возможно получение его коллоидного водного раствора. Преимуществами использования фуллере-на C₆₀ является его низкая токсичность, а также устойчивость как химического соединения и коммерческая доступность. В связи с этим целью настоящей работы являлось изучение влияния коллоидного водного раствора фуллере-на C₆₀ на прорастание семян и урожайность пшеницы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В экспериментах были использованы сорта мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) яровой формы – *Воевода* и *Лада*, а также сорта озимой формы – *Заря* и *Дар Зернограда*.

Насыщенный коллоидный водный раствор фуллере-на C₆₀ (NeoTechProduct, Россия, 99.5%+) получали посредством воздействия ультразвуком (ультразвуковая ванна с рабочей частотой 42 кГц и мощностью 50 Вт) на гетерогенную систему, состоящую из насыщенного раствора фуллере-на C₆₀ в толуоле и воды [9]. Затем водную фазу отделяли от органической. В экспериментах были использованы разбавленные растворы фуллере-на C₆₀, а именно 10⁻⁶ и 10⁻⁹ М, выбранные на основании данных литературы [4, 5].

Для исследования всхожести и прорастания семян использовали две методики.

1. 100 семян помещали в чашки Петри на фильтровальную бумагу, заливали растворами фуллере-на C₆₀ (25 мл) и помещали в термостат (20°C). Через 7 суток проводили подсчет числа проросших и не проросших семян и измеряли длину ростков и корешков.

2. Проращивание семян в рулонах фильтровальной бумаги проводили по ГОСТ 12038-84 [10]. Семена промывали дистиллированной водой и замачивали в растворах фуллере-на C₆₀ в течение 18 часов при 24 °C (25 мл раствора на 100 семян). Затем их раскладывали на полоски

фильтровальной бумаги, накрывали смоченной водой фильтровальной бумагой и пищевой пленкой, и сворачивали в рулон. Рулоны ставили в стаканы в термостат при 20°C. Через 7 суток аналогично первой методике проводили подсчёт числа семян и измерение проростков. Для первичной оценки ростостимулирующего эффекта при проращивании семян пшеницы сорта *Воевода* также определяли длину ростков и корешков через 10 суток.

Содержание эндогенной абсцизовой кислоты (АБК) определяли методом ВЭЖХ. Растительный материал заливали 96%-ным кипящим этанолом, после остывания экстракт сливали, а к твердому остатку добавляли антиоксидант (аскорбиновую кислоту) и затем дважды экстрагировали 80%-ным этанолом (с перемешиванием на магнитной мешалке) при температуре +18°C (1 час) и при температуре +4°C (1 час). Экстракты объединяли, фильтровали, а этанол упаривали при пониженном давлении на ротормном испарителе при температуре +40°C. Очистку экстракта проводили по модифицированной методике [11]. Идентификацию и количественное определение осуществляли по внешнему стандарту (Sigma, США) в условиях изократического режима на приборе для жидкостной хроматографии «Стайер» фирмы Аквилон (Россия) с использованием колонки RP-18 с обращенной фазой Luna (Phenomenex, США). Элюент – ацетонитрил:вода:уксусная кислота (20:80:1 (v/v/v)), скорость потока 1 мл/мин, детектирование – при 254 нм.

Для подсчета числа устьиц обе стороны первого листа побега яровой пшеницы сорта *Лада* фотографировали через 7 суток под стереомикроскопом Axioplan 2 (Zeiss, Германия) при увеличении $\times 10$ посредством видеокамеры Lumenera Infinity 2. На фотографиях с использованием программы Infinity Analyses 5.0.2. выделяли участки мезофилла листа известной площади и подсчитывали число устьиц. Все лабораторные опыты проводили в 5-ти повторностях.

В полевом опыте семена выдерживали в коллоидном водном растворе фуллерена C_{60} с концентрацией 10^{-9} М в течение 24 часов. Посев осуществляли малогабаритной сеялкой при норме высева 500 семян на m^2 (в 3-х повторностях). Площадь одной делянки составляла 6 m^2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка ростостимулирующего эффекта коллоидного водного раствора фуллерена C_{60} на семена яровой пшеницы сорта *Воевода* показала, что проращивание семян в рулонах приводит к достоверному увеличению длины корешков и ростков (таблица 1). Найдено, что ростостимулирующий эффект выражен при обработке семян раствором фуллерена C_{60} в концентрациях как 10^{-6} М, так и 10^{-9} М (раствор № 1). В последующих экспериментах использовали раствор фуллерена в концентрации 10^{-9} М, как оптимальный с точки зрения экологической безопасности.

Таблица 1 – Влияние раствора фуллерена C_{60} на рост проростков семян пшеницы сорта *Воевода* при их проращивании в рулонах (10 суток)

Среда проращивания		Длина корешков, см	Ростостимулирующий эффект, %
Раствор фуллерена C_{60}	10^{-6} М	6,3±0,2*	115
	10^{-9} М	7,2±0,3	131
Контроль (вода)		5,5±0,2	100
Длина ростка, см			
Раствор фуллерена C_{60}	10^{-6} М	12,1±0,4	127
	10^{-9} М	12,3±0,5	129
Контроль (вода)		9,5±0,3	100

*Отклонение от значений средних величин для объёма выборки ($n = 100$) на доверительном уровне $p = 0,95$.

При оценке энергии прорастания и всхожести учитывали семена, имеющие не менее 2-х развитых корешков, с размером более длины семени и размером ростка не менее половины длины семени (согласно ГОСТ 12038-84). Полученные данные по всхожести семян пшеницы и росту проростков приведены в таблице 2.

Полученные данные свидетельствуют о выраженном ростостимулирующем действии раствора фуллерена C_{60} на пшеницу различных сортов. Наряду с этим можно отметить видоспецифичность действия исследуемого раствора в отношении озимой и яровой пшениц, а также – влияние, оказываемое на полученные результаты условиями проведения экспери-

мента. Так, проращивание семян озимой пшеницы в растворе заметно снижало энергию прорастания (на 36%) по сравнению с проращиванием в рулонах, но не оказывало выраженного влияния на проращивание семян яровой пшеницы. Подобные отличия, по-видимому, обусловлены особенностями метаболизма семян пшеницы в различных условиях их прорастания. Следует отметить, что при действии коллоидного водного раствора фуллерена C_{60} обнаружена стимуляция прироста первого листа и корешков этих проростков по сравнению с контролем. Примечательно, что сходные результаты получены при действии фуллеренола [12, 13]. Важно также отметить, что наибольшее увеличение параметров роста (по сравнению с контролем) наблюдалось у яровой пшеницы.

Таблица 2 – Влияние замачивания в растворе фуллерена C_{60} на всхожесть и рост проростков семян пшеницы сортов *Заря* и *Лада* при (7 суток)

Озимая пшеница, сорт <i>Заря</i>				
Метод проращивания	в чашках Петри		в рулонах (ГОСТ 12038-84)	
Среда проращивания	Раствор фуллерена № 1	Вода	Раствор фуллерена № 1	Вода
Лабораторная всхожесть, %	70±3*	63±2	84±3	97±2
Длина корешков, см	3,3±0,1	3,2±0,1	2,9±0,1	3,4±0,1
Длина ростка, см	6,5±0,3	6,0±0,2	5,0±0,1	4,9±0,1
Яровая пшеница, сорт <i>Лада</i>				
Метод проращивания	в чашках Петри		в рулонах (ГОСТ 12038-84)	
Среда проращивания	Раствор фуллерена № 1	Вода	Раствор фуллерена № 1	Вода
Лабораторная всхожесть, %	15±1	18±1	60±2	66±2
Длина корешков, см	3,1±0,1	2,6±0,1	4,1±0,2	5,1±0,2
Длина ростка, см	3,6±0,1	3,3±0,1	8,7±0,4	6,9±0,3

*Отклонение от значений средних величин для объема выборки ($n = 100$) на доверительном уровне $p = 0,95$.

При исследовании анатомической структуры листовых пластинок проростков пшеницы сорта *Лада* было выявлено увеличение более чем на 11% числа устьиц первого листа проростков, приходящихся на единицу площади абаксиальной стороны листа (таблица 3). Лист пшеницы завернут в трубку, обращенную наружу абаксиальной стороной, на которой располагается больше устьиц, соответственно эффект для неё выражен сильнее.

Таблица 3 – Число устьиц на первом листе проростков пшеницы сорта *Лада* и содержание в них эндогенной абсцизовой кислоты

Среда проращивания	Верхняя (адаксиальная) сторона листа, шт./мм ²	Нижняя (абаксиальная) сторона листа, шт./мм ²	Содержание эндогенной АБК, мкг/г сырого веса
Раствор фуллерена № 1	5,6±0,2*	10,5±0,3	0,20±0,01
Контроль (вода)	5,5±0,2	9,4±0,3	0,17±0,01

*Отклонение от значений средних величин для объема выборки ($n = 100$) на доверительном уровне $p = 0,95$.

Существенную роль в процессе прорастания семян и в защите проростков от негативного воздействия окружающей среды играет эндогенная АБК [16]. Установлено, что в надземной части проростков яровой пшеницы, уровень эндогенной АБК оказался выше по сравнению с контролем более чем на 17% (таблица 3). Этот результат указывает на активацию адаптивной системы проростков, что способствует улучшению приспособляемости растения к негативным изменениям окружающей среды.

Следует отметить, что действие коллоидных водных растворов фуллерена C_{60} приводит к повышению интенсивности ростовых процессов в клетках проростков как яровой, так и озимой пшеницы, что выражается в ускоренном нарастании вегетативной массы, изменении анатомической структуры листьев (число устьиц) и, в дальнейшем, способствует ускоренному переходу в генеративную стадию развития.

Механизм физиологической активности фуллеренов (в том числе C_{60}) широко обсуждается в литературе в настоящее время. Вероятно, специфика действия фуллерена обусловлена его уникальной структурой и свойствами, такими как антиоксидантная активность [8], влия-

ние на активность ферментов [5], взаимодействие с кислородом [14], стабилизация интермедиатов ферментативных реакций [15]. Полученные данные указывают на комплексное действие фуллерена, оказываемое им на жизнедеятельность растений.

Важным этапом настоящего исследования явилось проведение полевых опытов, в которых определяли влияние, которое оказывает замачивание в коллоидном водном растворе фуллерена C_{60} семян яровой (сорта *Лада*) и озимой (сорт *Дар Зернограда*) пшеницы на увеличение массы зерна с одного колоса и урожайность. По результатам проведенных опытов был отмечен стимулирующий эффект, оказываемый изучаемым раствором фуллерена C_{60} . Так, масса зерна с одного колоса озимой и яровой пшеницы превосходила контроль на 24 и 10%, соответственно, а урожайность для обеих форм пшеницы была увеличена в среднем на 15% (таблица 4).

Таблица 4 – Влияние замачивания в растворе фуллерена C_{60} семян яровой (сорт *Лада*) и озимой (сорт *Дар Зернограда*) пшеницы на продуктивность колоса и урожайность

Пшеница	Увеличение массы зерна с одного колоса, %	Увеличение урожайности, %
Яровая, сорт <i>Лада</i>	24	15
Озимая, сорт <i>Дар Зернограда</i>	10	15

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено, что коллоидные водные растворы фуллерена C_{60} оказывают ростостимулирующее сортозависимое действие на семена и проростки яровой и озимой пшеницы, выражающееся также в повышении уровня эндогенной АБК и в увеличении числа устьиц на листовых пластинках проростков. Важно отметить, что оптимизация онтогенетических процессов на стадии прорастания семени при использовании коллоидного водного раствора фуллерена C_{60} позволяет существенно увеличить продуктивность колоса и, соответственно, урожайность пшеницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Le Mire, G. Implementing plant biostimulants and biocontrol strategies in the agroecological management of cultivated ecosystems / G. Le Mire, M.L. Nguyen, B.F.P. Patrick du Jardin, F. Verheggen, P. Delaplace, M. Hassam Jijakli // *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*. – 2016. – V. 20. – P. 299-213.
2. Мудрова, С.С. Комплексные микробные препараты. Применение в сельскохозяйственной практике / С.С. Мудрова, К.Д. Давранов // *Biotechnologia acta*. – 2014. – V. 7, № 6. – С. 92-101.
3. Ephritikhine, G. The sax1 dwarf mutant of *Arabidopsis thaliana* shows altered sensitivity of growth responses to abscisic acid, auxin, gibberellins and ethylene and is partially rescued by exogenous brassinosteroid / G. Ephritikhine, M. Fellner, C. Vannini, D. Lapous, H. Barbier-Brygoo // *Plant J*. – 1999. – V. 18, № 3. – P. 303-314.
4. Kole, C. Nanobiotechnology can boost crop production and quality: first evidence from increased plant biomass, fruit yield and phytomedicine content in bitter melon (*Momordica charantia*) / C. Kole, P. Kole, K.M. Randunu, P. Choudhary, R. Podila, P.C. Ke, A.M. Rao, R.K. Marcus // *BMC Biotechnology* – 2013. – № 13. article 37.
5. Панова, Г.Г. Производные фуллерена стимулируют продукционный процесс, рост и устойчивость к окислительному стрессу у растений пшеницы и ячменя / Г.Г. Панова, Е.В. Канаш, К.Н. Семенов, Н.А. Чарыков, Ю.В. Хомяков, Л.М. Аникина, А.М. Артемьева, Д.Л. Корнюхин, В.Е. Вертебный, Н.Г. Синявина, О.Р. Удалова, Н.А. Куленова, С.Ю. Блохина // *Сельскохозяйственная биология*. – 2018. – Т. 53, № 1. – С. 38-49.
6. Способ получения аддуктов смеси фуллеренов фракции C50-C92 и регулятор роста растений на их основе: пат. RU 2570083 C1 Рос. Федерация: МПК A01N 27/00 / Игуменова Т.И., Чичварин А.В., Синявин М.С., Елина А.С.; заявители Игуменова Т.И., Чичварин А.В., Синявин М.С., Елина А.С. и патентообладатели Игуменова Т.И., Чичварин А.В., Синявин М.С. – № 2014104638/13; заяв. 10.02.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23.
7. Huang, Y.Y. Functionalized fullerenes in photodynamic therapy / Y.Y. Huang, S.K. Sharma, R. Yin, T. Agrawal, L.Y. Chiang, M.R. Hamblin // *Journal of Biomedical Nanotechnology*. – 2014. – V. 10, No 9. – P. 1918-1936.
8. Wang, I.C. C(60) and water-soluble fullerene derivatives as antioxidants against radical-initiated lipid peroxidation / I.C. Wang, L.A. Tai, D.D. Lee, P.P. Kanakamma, C.K. Shen, T.Y. Luh, C.H. Cheng, K.C. Hwang // *Journal of Medicinal Chemistry*. – 1999. – V. 42, № 22. – P. 4614-4620.
9. Способ получения концентрированных водных дисперсий немодифицированных фуллеренов: пат. RU 2570083 C1 Рос. Федерация: МПК C01B 31/02 / Михеев И.В., Коробов М.В., Волков Д.С., Проскурнин М.А.; заявители Михеев И.В., Коробов М.В., Волков Д.С., Проскурнин М.А. и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» (МГУ). – № 2014109870/05; заяв. 14.03.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. №34.
10. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. – Введ. 1986-07-01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 30 с.
11. Бельнская, Е.В. Цитокинины и абсцизовая кислота в годичном цикле морфогенеза корневищ мяты / Е.В. Бельнская, В.В. Кондратьева, Е.Б. Кириченко // *Известия РАН. Серия биол.* – 1997. – № 3. – С. 274-279.

12. Молчан, О.В. Влияние фуллеренола на прорастание семян, содержание фенольных соединений и их анти-радикальную активность в проростках ячменя / О.В. Молчан, Л.В. Обуховская, В.Г. Реутский // Труды БГУ. – 2014. – Т. 9. – Ч. 1. – С. 56-61.
13. Xiong, J.L. Fullerol improves seed germination, biomass accumulation, photosynthesis and antioxidant system in *Brassica napus* L. under water stress / J.L. Xiong, J. Li, H.C. Wang, C.L. Zhang, M.S. Naeem // Plant Physiology and Biochemistry. – 2018. – № 129. – P. 130-140.
14. Moor, K.J. Differential photoactivity of aqueous [C60] and [C70] fullerene aggregates / K.J. Moor, S.D. Snow, J.H. Kim // Environmental Science and Technology. – 2015. – V. 49. – № 10. – P. 5990-5998.
15. Zhao, Y. The emergence of anion- π catalysis / Y. Zhao, Y. Cotellet, L. Liu, J. López-Andarias, A.B. Bornhof, M. Akamatsu, N. Sakai, S. Matile // Accounts of Chemical Research. – 2018. – V. 51. – P. 2255-2263.
16. Zhang, D.P. Absciscic Acid: Metabolism, Transport and Signaling / D.P. Zhang // Springer. – 2014. – 447 p.

Ямскава Ольга Васильевна

Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук
Кандидат химических наук, научный сотрудник
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 28, E-mail: olga_yamskova@mail.ru

Кондратьева Вера Валентиновна

Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук
Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
127276, г. Москва, ул. Ботаническая, 4, E-mail: lab-physiol@mail.ru

Воронкова Татьяна Владимировна

Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук
Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
127276, г. Москва, ул. Ботаническая, 4, E-mail: lab-physiol@mail.ru

Олехнович Людмила Сергеевна

Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук
Младший научный сотрудник, 127276, г. Москва, ул. Ботаническая, 4, E-mail: lab-physiol@mail.ru

Бидюкова Галина Федоровна

Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук
Младший научный сотрудник, 127276, г. Москва, ул. Ботаническая, 4, E-mail: lab-physiol@mail.ru

Енина Ольга Леонидовна

Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук
Инженер, 127276, г. Москва, ул. Ботаническая, 4, E-mail: lab-physiol@mail.ru

Карташов Максим Игоревич

Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии Российской академии наук
Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
143050, Московская обл., Одинцовский район, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, 5, E-mail: maki505@mail.ru

Курилов Дмитрий Вадимович

Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского Российской академии наук
Кандидат химических наук, научный сотрудник
19991, г. Москва, Ленинский просп., 47, E-mail: kur-dv@mail.ru

Егоров Александр Сергеевич

Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук
Аспирант, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 28, E-mail: olga_yamskova@mail.ru

Ямсков Игорь Александрович

Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук
Доктор химических наук, главный научный сотрудник
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 28, E-mail: olga_yamskova@mail.ru

Бондарева Татьяна Александровна

Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева
Студент 1 курса магистратуры направления подготовки «Биотехнология»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, E-mail: nik.in@list.ru

Бондарев Николай Ильич

Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева

Доктор биологических наук, профессор кафедры промышленной химии и биотехнологии

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, E-mail: nikbond@inbox.ru

O.V. YAMSKOVA, V.V. KONDRATEVA, T.V. VORONKOVA, L.S. OLEKHNOVICH,
G.F. BIDYUKOVA, O.L. ENINA, M.I. KARTASHOV, D.V. KURILOV, A.S. EGOROV,
I.A. YAMSKOV, T.A. BONDAREVA, N.I. BONDAREV

THE EFFECT OF FULLERENE C₆₀ SOLUTION, ECOLOGICALLY SAFE GROWTH REGULATOR ON WHEAT SEEDS GERMINATION, AND YIELD

Wheat seeds treatment with colloidal fullerene solution at micromolar and nanomolar concentrations stimulates seeds germination and enhances growth speed of winter and spring wheat. That was correlated with the activation of metabolic processes and changes in the anatomical structure. Wheat seeds pre-seeding treatment promote plant adaptation to environment conditions and increases yield.

Keywords: fullerene C₆₀, growth, yield, wheat.

BIBLIOGRAPHY (TRANSLITERATED)

1. Le Mire, G. Implementing plant biostimulants and biocontrol strategies in the agroecological management of cultivated ecosystems / G. Le Mire, M.L. Nguyen, B.F.P. Patrick du Jardin, F. Verheggen, P. Delaplace, M. Hassam Jijakli // *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*. – 2016. – V. 20. – P. 299-213.
2. Mudrova, S.S. Kompleksnye mikrobynye preparaty. Primenenie v sel'skohozyajstvennoj praktike / S.S. Mudrova, K.D. Davranov // *Biotechnologia acta*. – 2014. – V. 7, № 6. – С. 92-101.
3. Ephritikhine, G. The sax1 dwarf mutant of Arabidopsis thaliana shows altered sensitivity of growth responses to abscisic acid, auxin, gibberellins and ethylene and is partially rescued by exogenous brassinosteroid / G. Ephritikhine, M. Fellner, C. Vannini, D. Lapous, H. Barbier-Brygoo // *Plant J.* – 1999. – V. 18, № 3. – P. 303-314.
4. Kole, C. Nanobiotechnology can boost crop production and quality: first evidence from increased plant biomass, fruit yield and phytomedicine content in bitter melon (*Momordica charantia*) / C. Kole, P. Kole, K.M. Randunu, P. Choudhary, R. Podila, P.C. Ke, A.M. Rao, R.K. Marcus // *BMC Biotechnology* – 2013. – № 13. article 37.
5. Panova, G.G. Proizvodnye fullerena stimuliruyut produkcionnyj process, rost i ustojchivost' k okislitel'nomu stressu u rastenij pshenicy i yachmenya / G.G. Panova, E.V. Kanash, K.N. Semenov, N.A. Charykov, YU.V. Homyakov, L.M. Anikina, A.M. Artem'eva, D.L. Korniyuhin, V.E. Vertebnyj, N.G. Sinyavina, O.R. Udalova, N.A. Kulenova, S.YU. Blohina // *Sel'skohozyajstvennaya biologiya*. – 2018. – Т. 53, № 1. – С. 38-49.
6. Sposob polucheniya adduktov smesi fullerenov frakcii C50-C92 i reguljator rosta rastenij na ih osnove: pat. RU 2570083 C1 Ros. Federaciya: MPK A01N 27/00 / Igumenova T.I., Chichvarin A.V., Sinyavin M.S., Elina A.S.; zayaviteli Igumenova T.I., Chichvarin A.V., Sinyavin M.S., Elina A.S. i patentoobladateli Igumenova T.I., Chichvarin A.V., Sinyavin M.S. – № 2014104638/13; zayav. 10.02.2014; opubl. 20.08.2015, Byul. № 23.
7. Huang, Y.Y. Functionalized fullerenes in photodynamic therapy / Y.Y. Huang, S.K. Sharma, R. Yin, T. Agrawal, L.Y. Chiang, M.R. Hamblin // *Journal of Biomedical Nanotechnology*. – 2014. – V. 10, No 9. – P. 1918-1936.
8. Wang, I.C. C(60) and water-soluble fullerene derivatives as antioxidants against radical-initiated lipid peroxidation / I.C. Wang, L.A. Tai, D.D. Lee, P.P. Kanakamma, C.K. Shen, T.Y. Luh, C.H. Cheng, K.C. Hwang // *Journal of Medicinal Chemistry*. – 1999. – V. 42, № 22. – P. 4614-4620.
9. Sposob polucheniya koncentrirovannyh vodnyh dispersij nemodificirovannyh fullerenov: pat. RU 2570083 C1 Ros. Federaciya: MPK S01V 31/02 / Miheev I.V., Korobov M.V., Volkov D.S., Proskurnin M.A.; zayaviteli Miheev I.V., Korobov M.V., Volkov D.S., Proskurnin M.A. i patentoobladateli Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Moskovskij gosudarstvennyj universitet im. M.V. Lomonosova» (MGU). – № 2014109870/05; zayav. 14.03.2014; opubl. 10.12.2015, Byul. №34.
10. GOST 12038-84. Semena sel'skohozyajstvennyh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhesti. – Vved. 1986-07-01. – M.: Standartinform, 2011. – 30 s.
11. Belynskaya, E.V. Citokininy i absizovaya kislota v godichnom cikle morfogeneza kornevishch myaty / E.V. Belynskaya, V.V. Kondrat'eva, E.B. Kirichenko // *Izvestiya RAN. Seriya biol.* – 1997. – № 3. – S. 274-279.
12. Molchan, O.V. Vliyanie fullerenola na prorastanie semyan, sodержание fenol'nyh soedinenij i ih anti-radikal'nyu aktivnost' v prorostkah yachmenya / O.V. Molchan, L.V. Obuhovskaya, V.G. Reutskij // *Trudy BGU*. – 2014. – Т. 9. – CH. 1. – С. 56-61.
13. Xiong, J.L. Fullerol improves seed germination, biomass accumulation, photosynthesis and antioxidant system in Brassica napus L. under water stress / J.L. Xiong, J. Li, H.C. Wang, C.L. Zhang, M.S. Naeem // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2018. – № 129. – P. 130-140.

14. Moor, K.J. Differential photoactivity of aqueous [C60] and [C70] fullerene aggregates / K.J. Moor, S.D. Snow, J.H. Kim // *Environmental Science and Technology*. – 2015. – V. 49. – № 10. – P. 5990-5998.
15. Zhao, Y. The emergence of anion- π catalysis / Y. Zhao, Y. Cotellet, L. Liu, J. López-Andarias, A.B. Bornhof, M. Akamatsu, N. Sakai, S. Matile // *Accounts of Chemical Research*. – 2018. – V. 51. – P. 2255-2263.
16. Zhang, D.P. Absciscic Acid: Metabolism, Transport and Signaling / D.P. Zhang // Springer. – 2014. – 447 p.

Yamskova Olga Vasilyevna

A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences
Candidate of chemical sciences, researcher, 119991, Moscow, ul. Vavilova, 28, E-mail: olga_yamskova@mail.ru

Kondrat'eva Vera Valentinovna

Tsytsin Main Moscow Botanical Garden of Russian Academy of Sciences
Candidate of biological sciences, senior researcher, 127276, Moscow, ul. Botanicheskaya, 4, E-mail: lab-physiol@mail.ru

Voronkova Tatyana Vladimirovna

Tsytsin Main Moscow Botanical Garden of Russian Academy of Sciences
Candidate of biological sciences, senior researcher, 127276, Moscow, ul. Botanicheskaya, 4, E-mail: lab-physiol@mail.ru

Olekhnovich Lyudmila Sergeevna

Tsytsin Main Moscow Botanical Garden of Russian Academy of Sciences
Research assistant, 127276, Moscow, ul. Botanicheskaya, 4, E-mail: lab-physiol@mail.ru

Bidyukova Galina Fedorovna

Tsytsin Main Moscow Botanical Garden of Russian Academy of Sciences
Research assistant, 127276, Moscow, ul. Botanicheskaya, 4, E-mail: lab-physiol@mail.ru

Enina Olga Leonidovna

Tsytsin Main Moscow Botanical Garden of Russian Academy of Sciences
Engineer, 127276, Moscow, ul. Botanicheskaya, 4, E-mail: lab-physiol@mail.ru

Kartashov Maxim Igorevich

All-Russian Institute of phytopathology of Russian Academy of Science
Candidate of biological sciences, senior researcher
143050, Moscow region, Odinzovsky district, Bolshie Vyzemu, ul. Institute, 5, E-mail: maki505@mail.ru

Kurilov Dmitriy Vadimovich

N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of Russian Academy of Sciences
Candidate of chemical sciences, researcher, 119991, Moscow, Leninsky prospect, 47, E-mail: kur-dv@mail.ru

Egorov Alexander Sergeevich

A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences
Postgraduate student, 119991, Moscow, ul. Vavilova, 28, E-mail: olga_yamskova@mail.ru

Yamskov Igor Alexandrovich

A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences
Doctor of chemical sciences, chief researcher, 119991, Moscow, ul. Vavilova, 28, E-mail: olga_yamskova@mail.ru

Bondareva Tatyana Alexandrovna

Orel State University named after I.S. Turgenev
1st year student of magistracy direction Biotechnology, 302020, Orel, Naugorskoye Chaussee, 29, E-mail: nik.in@list.ru

Bondarev Nikolai Il'ich

Orel State University named after I.S. Turgenev
Doctor of biological sciences, professor at the department of industrial chemistry and biotechnology
302020, Orel, Naugorskoye Chaussee, 29, E-mail: nikbond@inbox.ru