

УДК 631.811.93:631.588.5

ПРИМЕНЕНИЕ ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ ПОРИСТЫХ НАНОЧАСТИЦ SiO_2 , СОДЕРЖАЩИХ 9,10-ДИФЕНИЛАНТРАЦЕН, В АГРОФОТОНИКЕ[§]

© 2023 г. Б. М. Гареев^{1,*}, Г. Л. Шарипов¹, О. В. Ласточкина²¹Институт нефтехимии и катализа — обособленное структурное подразделение
Уфимского федерального исследовательского центра РАН
450075 Уфа, просп. Октября, 141, Россия²Институт биохимии и генетики — обособленное структурное подразделение
Уфимского федерального исследовательского центра РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 71, Россия

*E-mail: gareev-bulat@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

После доработки 24.04.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

Ультразвуковым диспергированием получена водная коллоидная суспензия наночастиц пористого диоксида кремния, содержащая органический люминофор 9,10-дифенилантрацен. Средний размер наночастиц суспензии — 15–25 нм. Данная суспензия обладает характерным спектром поглощения для дифенилантрацена в области от 345 до 420 нм и спектром фотолюминесценции в области от 400 до 550 нм. Полученная суспензия использована для полива при выращивании луковичных растений (лук репчатый, лилии и гладиолусы) в условиях короткого светового периода с дополнительным освещением фитолампой на основе светодиодов с красным и синим спектрами свечения. Установлено, что применение этой суспензии с наночастицами, попадающими в растения в качестве искусственного фотосинтетического пигмента, ускорило рост луковичных растений в среднем на 15–20% по сравнению с контрольными образцами при одинаковых условиях освещения.

Ключевые слова: свет, LED-лампы, суспензия наночастиц, диоксид кремния, фотолюминесценция, 9,10-дифенилантрацен, рост, лук репчатый, лилия, гладиолус.

DOI: 10.31857/S000218812310006X, **EDN:** TKWBDS

ВВЕДЕНИЕ

Освещение играет ключевую роль в ходе вегетативного роста растений в природе [1–4]. При недостатке света происходит замедление всех биологических процессов, вплоть до остановки роста [5]. Например, такую картину можно наблюдать при выращивании овощей и цветов в теплицах в зимний период, когда световой день не превышает 7–9 ч. Для устранения дефицита света применяют различные дополнительные источники света, такие как натриевые и более экономичные светодиодные лампы [6]. Быстрое развитие технологий освещения с использованием светоизлучающих диодов (LED) привело к увеличению применения этой технологии для освещения в закрытых садоводческих системах [7, 8]. Системы LED освещения имеют важные преимущества перед традиционным освещением (т.е. люминесцентными или натриевыми лампами)

благодаря своему спектральному составу, долговечности, специфике длины волны, низкому тепловому излучению и энергоэффективности [9–12]. Кроме того, в системах выращивания растений светодиоды позволяют модифицировать спектр в соответствии с требованиями разных видов растений. Влияние состава светового спектра на продукционные свойства и на содержание биологически активных соединений в овощах общеизвестно [13–15]. Однако реакция растений на свет различается в зависимости от условий освещения, времени года, генотипа, методов выращивания и многих других факторов [7, 8].

Искусственное освещение при недостатке естественного освещения ускоряет процесс фотосинтеза, что благоприятно влияет на рост растений [12, 16]. Свет поглощается растительными пигментами. Хлорофиллы *a* и *b* являются основными фотосинтетическими пигментами растений. Они в основном поглощают синие и красные длины волн светового спектра. Для процес-

[§] Работа выполнена в рамках государственного задания FMRS-2022-0077.

сов фотосинтеза и роста растений наиболее эффективны красный, синий и совместно красный и синий цвета светодиодных ламп [17], поскольку они являются основными источниками энергии для фотосинтетической ассимиляции углекислого газа растениями. В процессе фотосинтеза молекула хлорофилла поглощает световую энергию, которая затем используется в фотохимической реакции взаимодействия углекислого газа и воды с образованием органических веществ [18]. После передачи поглощенной энергии на запуск реакций фотосинтеза молекула хлорофилла возвращается в исходное состояние. Хотя максимум непрерывного спектра солнечного излучения расположен в “зеленой” области 550 нм, поглощается хлорофиллом преимущественно синий, частично красный, свет из солнечного спектра. Растения могут использовать и свет с теми длинами волн, которые слабо поглощаются хлорофиллом. Энергию фотонов при этом улавливают другие фотосинтетические пигменты, которые затем передают энергию хлорофиллу.

Для ускорения фотосинтеза используют и достижения нанотехнологий. В работе американских исследователей показано, что за счет внедрения углеродных нанотрубок в хлоропласты, у растений на 30% возросла способность к фотосинтезу, а также появилась чувствительность к газам, загрязняющим окружающую среду [19].

В данной работе в качестве искусственного фотосинтетического пигмента использован органический люминофор 9,10-дифенилантрацен (ДФА) [20]. Этот выбор обусловлен тем, что для ДФА квантовый выход люминесценции равен единице, т.е. весь поглощенный свет будет переизлучаться, но главное — это характерная для ДФА полоса фотолюминесценции (ФЛ) в области 430 нм. Хлорофилл в данной области имеет интенсивную полосу поглощения. Мы предположили, что фотоны света, поглотившись ДФА в той части спектра, которая не очень интенсивно поглощается хлорофиллом, но будучи переизлученными в область максимального его поглощения, будут способствовать более интенсивному фотосинтезу. Однако ДФА плохо растворим в воде, и при простом смешивании с водой он не будет попадать в клетки растений через корневую систему. Чтобы решить эту проблему, была применена апробированная нами ранее методика приготовления водных коллоидных суспензий поронасыщенных наночастиц диоксида кремния, содержащих молекулы люминофора. Подробная методика приготовления таких суспензий описана в работе [21].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Микро- и мезопористый порошок SiO_2 синтезирован по методике, описанной в работе [22]. Насыщение пор диоксида кремния 9,10-дифенилантраценом проводили пропиткой из раствора. Для этого ДФА (х.ч., $m = 0.14$ мг) растворяли в 5 мл хлороформа (х.ч.), добавляли в раствор порошок SiO_2 ($m = 0.2$ г), далее растворитель удаляли вакуумированием. Для получения водной суспензии наночастиц сухой порошок SiO_2 с нанесенным ДФА засыпали в термостатируемую ($T_{\text{раств}} = 10\text{--}15^\circ\text{C}$) кювету с 40 мл бидистиллированной воды. Далее сонодиспергированием этой взвеси на аппарате для многопузырькового сонолиза УЗДН-2Т под действием ультразвука ($f = 22$ кГц, $P = 30$ Вт, $t = 1$ ч) была приготовлена водная суспензия. Фильтрацией через мембранный фильтр МФАС-Б-1 с размером пор 0.05 мкм (Владипор, Россия) выделяли нанодисперсную фракцию этой суспензии. Измерение размеров наночастиц SiO_2 в воде после пропускания через фильтр было проведено методом лазерного рассеяния на приборе Salid-7101 (Shimadzu, Япония).

Для дополнительного освещения растений использовали светодиодную фитолампу Т8 “Фито” мощностью 9 Вт, фирмы TDM Electric (Китай), излучающую свет в красно-синей областях спектра, с длиной волны красного спектра 640 нм и синего спектра — 450 нм. Использовали также синюю светодиодную ленту Areugon (Китай) мощностью 14.4 Вт/м ($\lambda = 400$ нм) и красную светодиодную ленту Areugon (Китай) мощностью 8 Вт/м ($\lambda = 630$ нм). Спектры фотолюминесценции суспензий, а также спектральный состав излучения светодиодов регистрировали спектрофлуориметром Fluorolog-3 (Horiba Jobin Yvon, Франция). Фотографии наночастиц на твердой подложке были получены с помощью электронного сканирующего микроскопа Hitachi Regulus SU 8220 (Япония). Для проращивания луковиц растений использовали готовый торфяной грунт универсальный (ООО “Сокол”, Россия) с нейтральным pH 6.5. Кислотность почвы определяли цифровым pH-метром pH-150M (“Теплоприбор”, Россия). Объектами исследования служили лук репчатый (*Allium cepa* L.) сорта Столовый, гладиолус (*Gladiolus*) сортов Sunshine и Мадагаскар и лилии (*Lilium asiatic*) сорта Розеллас дрим. Луковицы растений были приобретены в специализированной торговой точке. Исследование по выращиванию растений под фитолампой на основе светодиодных излучателей с синим и красным спектрами света (К + С, 50% красный (560–700 нм) + 50% синий (400–500 нм)), отдельно синим спектром (С)

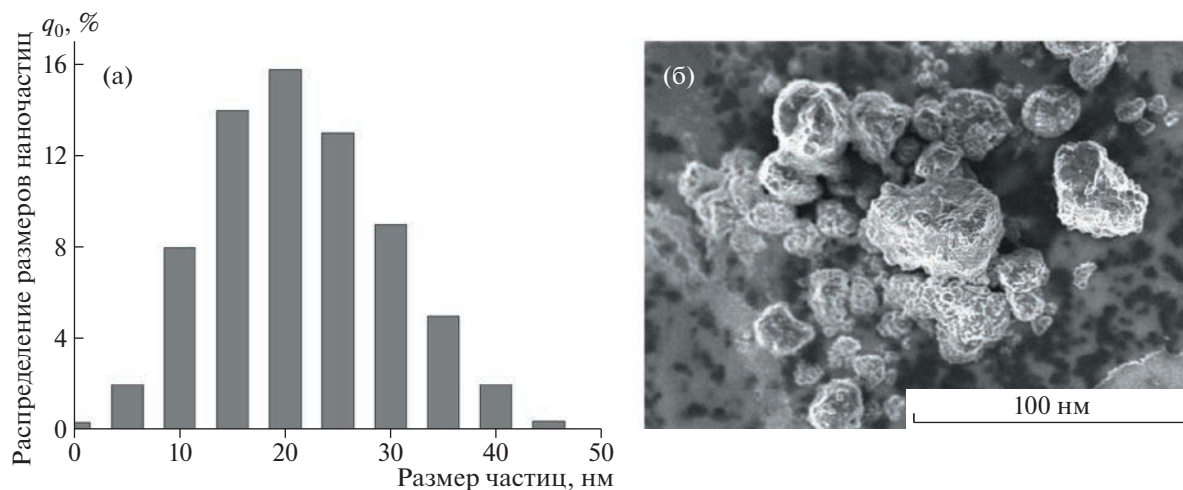


Рис. 1. Морфологические характеристики наночастиц SiO₂ с нанесенным ДФА: (а) — в водной суспензии, (б) — на твердой подложке.

(560–700 нм) и красным спектром (К) (400–500 нм) проводили в закрытом помещении без доступа солнечного света. В качестве контрольного варианта использовали естественное комнатное освещение. Во всех вариантах выращивания интенсивность света или плотность потока фотосинтетических фотонов (photon flux density, *PPFD*) составляла $250 \pm 10 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Все растения подвергали одинаковым контролируемым условиям, т.е. 15-часовой фотопериод, температура воздуха 18–22°C, относительная влажность воздуха 60–70%. Измерения температуры и влажности воздуха проводили гигрометром ВИТ-1 (Стеклоприбор, Россия). Ростовые параметры растений (в т.ч. длину стеблей и корней) оценивали классическими методами [23].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ультразвуковым диспергированием нами были получены водные суспензии наночастиц SiO₂ с дифенилантраценом (ДФА). Морфологические характеристики наночастиц представлены на рис. 1а. Средний размер наночастиц в водной суспензии составил 15–25 нм. Фотография данных наночастиц в сухом виде представлена на рис. 1б. Спектр поглощения разбавленной в 100 раз водной суспензии наночастиц SiO₂ с ДФА представлен на рис. 2а. Данная суспензия имела полосу поглощения, характерную для ДФА в истинных растворах в области от 330 до 420 нм с максимумами при 345, 364, 384 и 406 нм [20]. На рис. 2б приведен спектр возбуждения ФЛ суспензии при длине волны в максимуме полосы люминесценции 438 нм. Полученный спектр содержит 4 мак-

симумы при 405, 380, 360 и 345 нм. На рис. 2в приведены спектры ФЛ суспензии наночастиц SiO₂ с ДФА в зависимости от длины волны возбуждающего света. Наибольшую интенсивность ФЛ наблюдали при облучении светом 380 и 405 нм.

Полученные спектры ФЛ суспензии представляют собой полосы от 400 до 550 нм с характерными максимумами при 417, 438, 464 и 496 нм. В этой области спектра у хлорофилла есть полоса интенсивного поглощения [24]. Таким образом, можно предположить, что наночастицы суспензии при успешном попадании в клеточную мембрану, будут работать как природный светосинтетический пигмент. Эксперименты по апробации данной гипотезы были проведены на луковицах столового лука. Для этого в 3-х прозрачных пластиковых стаканах объемом 0.5 л, заполненных торфяным грунтом, засевали луковицы и первый образец (контроль) поливали дистиллированной водой, 2-й образец поливали водной суспензией наночастиц SiO₂, 3-й образец поливали суспензией наночастиц SiO₂ с ДФА. В остальное время все варианты поливали только дистиллированной водой (рис. 3). Перед посадкой у всех луковиц были срезаны верхние части, диаметр среза составил 2–3 см. Данный срез облегчает доступ кислорода к чешуям, вследствие чего ускоряется распад накопленных сахаров, луковица просыхает быстрее и интенсивнее выпускает перо. Глубина посадки составила $\frac{1}{4}$ от высоты луковицы (1 см). Данный эксперимент был проведен 10 раз для исключения случайных отклонений. В ходе вегетативного роста измерения длины прорастающих луковых перьев проводили на 3-х наиболее длинных луковых побегах, в табл. 1 представлены

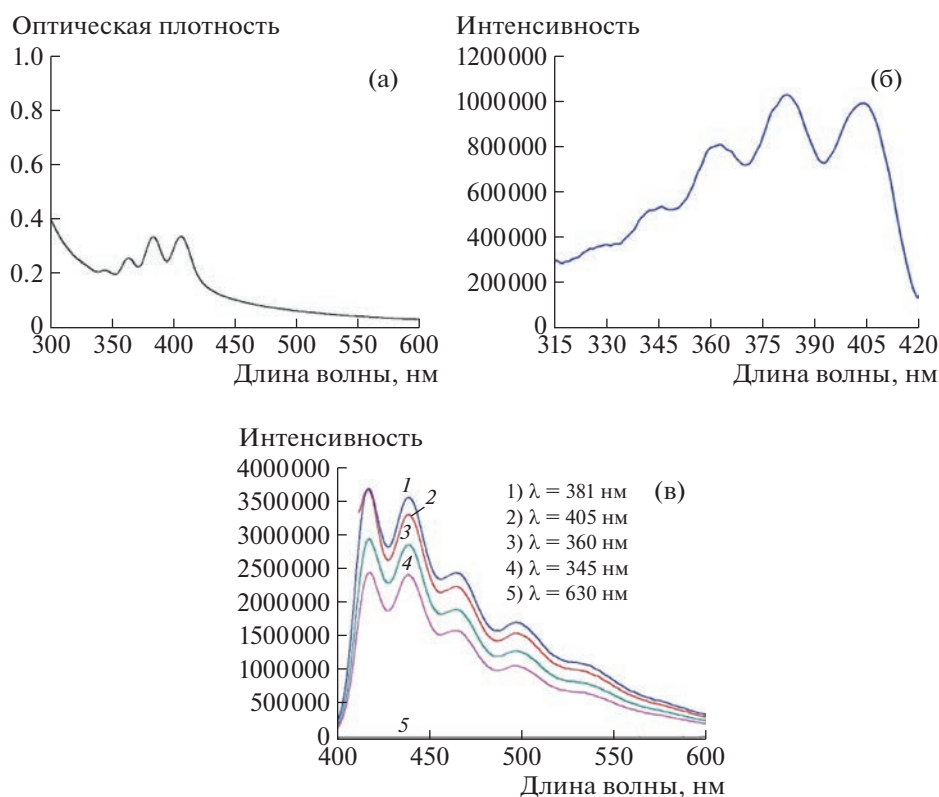


Рис. 2. Спектрофотометрические характеристики водной суспензии наночастиц SiO_2 с ДФА: (а) – спектр поглощения ($l = 1$ см), (б) – спектр возбуждения ФЛ ($\lambda_{\text{ФЛ}} = 438$ нм), (в) – интенсивность спектров ФЛ в зависимости от длины волны возбуждающего света.

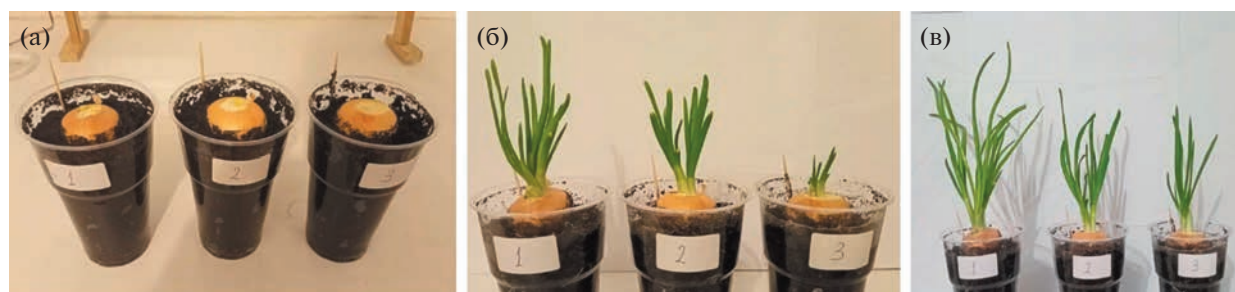


Рис. 3. Проращивание луковиц столового лука в зависимости от обработки, варианты: 1 – $\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 + \text{ДФА}$, 2 – $\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$, 3 – H_2O ; (а) – 1-е сут, (б) – 10-е сут, (в) – 15-е сут.

средние величины. Наблюдение за развитием корневой системы проводили визуально через стенки прозрачного стакана с почвой. Для более детального контроля роста корневой системы отдельно проращивали луковицы в стаканах с чистой водой (контроль), SiO_2 и SiO_2 с ДФА.

В процессе проращивания луковицы дополнительно досвечивали фитолампой (К + С) 3 ч – утром, 4 ч – вечером, в сумме, с учетом естественного дневного света, общее время освещения составило 15 ч. Данное время досвечивания выбра-

но для приближения уровня освещенности к естественному летнему, когда средняя продолжительность светового дня составляет 14–16 ч. Спектр свечения фитолампы представляет собой 2 полосы, в синей области от 400 до 500 нм с максимумом при 455 нм и полосу от 560 до 700 нм с максимумом при 625 нм в красной области спектра (рис. 4). Выявлено, что досветка прорастающих луковиц ускоряла рост побегов растений лука (табл. 1). Представлены средние данные 10-ти экспериментов с интервалом в 4 сут по проращива-

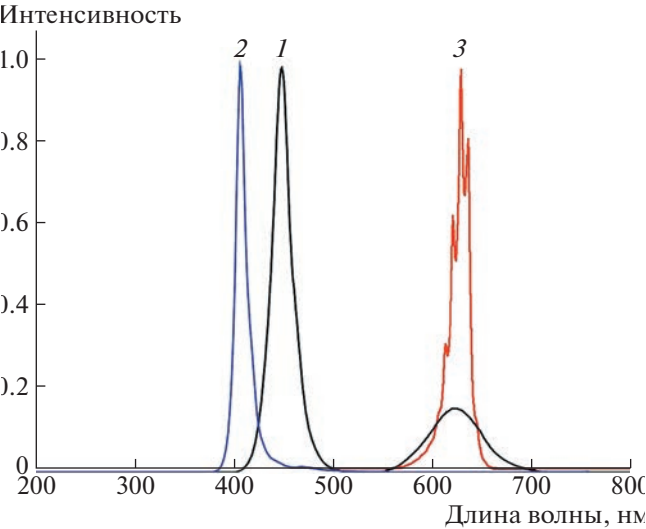


Рис. 4. Спектры свечения: 1 – фитолампа (К + С), 2 – синие светодиоды (С), 3 – красные светодиоды (К).

ванию лука в почве, которую поливали суспензией наночастиц SiO_2 + ДФА, либо только SiO_2 , и контроля, политого только дистиллированной водой. Обнаружено, что в период первых 4–6 сут происходил интенсивный рост корневой системы лукович в вариантах, политых суспензиями. Однако луковичы, почва которых была обработана SiO_2 + ДФА начинали прорастать на 2 сут раньше по сравнению с контролем. Далее длина стрелок увеличивалась, и к концу эксперимента (через 20 сут) разница в длине побегов лука, обработанных наночастицами SiO_2 + ДФА, либо только водой, достигала в среднем 20–30%.

Для подтверждения проникновения водной суспензии наночастиц SiO_2 с ДФА внутрь лукович через корневую систему, в конце эксперимента из лукович, обработанных суспензией наночастиц SiO_2 с ДФА, были приготовлены микропрепараты. Для этого тонкую пленку отделяли от кожицы лука и помещали на подложку из кварцевого стекла. Полученный микропрепарат облучали светом с длиной волны 345 нм. В отраженном свете наблюдали фотолюминесценцию наночастиц с ДФА в области спектра от 400 до 500 нм с характерными пиками при 417, 438, 464 и 496 нм (рис. 5).

После отработки методики обработки водными суспензиями наночастиц с ДФА почвы и контроля (концентрация суспензии, время полива, влажность воздуха, уровень освещенности) эта методика была применена для исследования роста лукович лилии и гладиолуса.

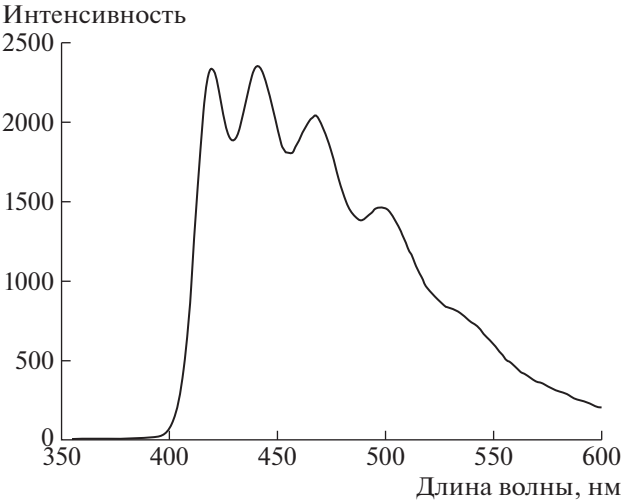


Рис. 5. Спектр фотолюминесценции микропрепарата кожицы лука, $\lambda_{\text{возб}} = 345$ нм.

В табл. 2 приведены усредненные данные 5-ти экспериментов по выращиванию лукович азиатской лилии в течении 25 сут. Фотографии одного из 5-ти экспериментов в процессе прорастания, роста и цветения лилии приведены на рис. 6.

Далее аналогичные эксперименты были проведены с луковичами гладиолуса. В табл. 3 приведены усредненные данные из 5-ти экспериментов по проращиванию гладиолусов сорта Мадагаскар. Фотографии в процессе проращивания и цветения растений приведены на рис. 7.

Для того чтобы выяснить, что именно ДФА положительно влиял на скорость прорастания лукович и рост растений на протяжении всей вегетации, были поставлены эксперименты с луковичами гладиолусов и лука при непрерывном освещении.

Таблица 1. Влияние обработки SiO_2 и SiO_2 + ДФА на длину корней и побегов растений лука

Время, сут	Длина побегов, см		
	Контроль H_2O	$\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$	$\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 + \text{ДФА}$
1	0 ^а	0 ^а	0 ^а
5	0 ^б	0 ^б	1.6 ^а
10	1.4 ^в	2.7 ^б	5.4 ^а
15	5.3 ^в	6.5 ^б	13.3 ^а
20	12.1 ^в	15.2 ^б	23.5 ^а
25	18.5 ^в	22.4 ^б	27.8 ^а

Примечания. 1. Представлены средние 10-ти экспериментов ($n = 3$). 2. Разные буквы обозначают существенную разницу между вариантами. То же в табл. 2–4.

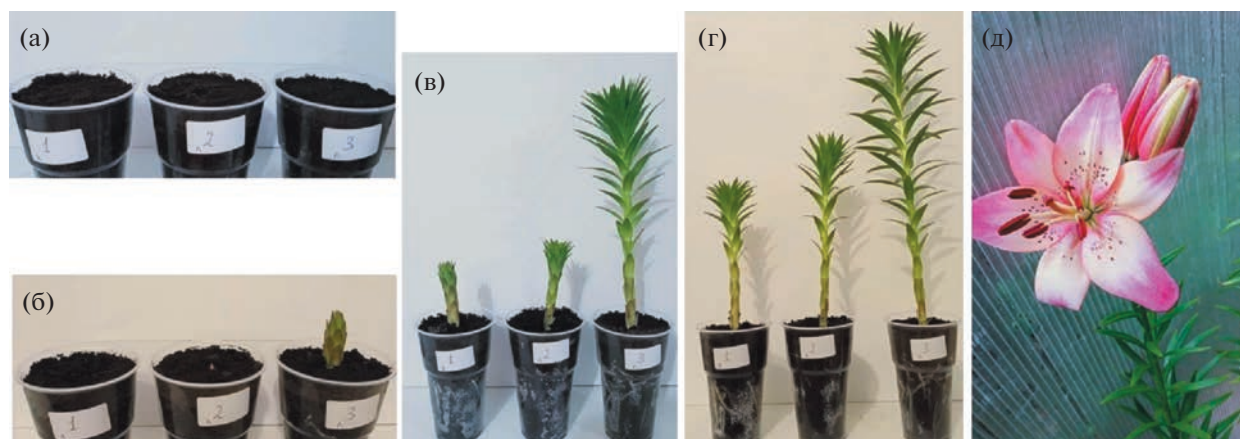


Рис. 6. Рост лилии в зависимости от обработки, варианты: 1 – H_2O , 2 – $H_2O + SiO_2$, 3 – $H_2O + SiO_2 + ДФА$. Лилии выращивали при обычном дневном свете с досвечиванием фитолампой (красный + синий спектр) в утреннее и вечернее время; (а) – 1-е сут, (б) – 7-е сут, (в) – 16-е сут, (г) – 21-е сут, (д) – 57-е сут.

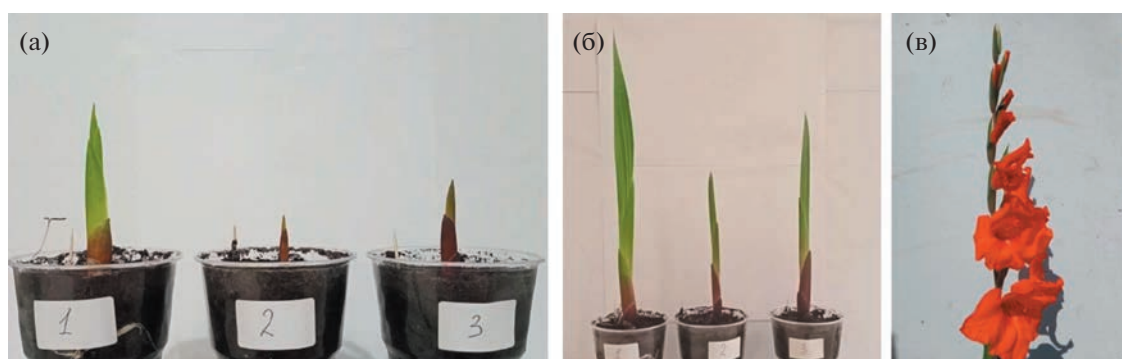


Рис. 7. Прорастание луковиц гладиолуса сорта Мадагаскар, варианты обработки: 1 – $H_2O + SiO_2 + ДФА$, 2 – H_2O , 3 – $H_2O + SiO_2$. Луковицы гладиолуса выращивали при обычном дневном свете с досвечиванием фитолампой (красный + синий спектр); (а) – 10-е сут, (б) – 16-е сут, (в) – 75-е сут.

щении растений светодиодами синего и красного свечения. Спектр синего светодиода содержит узкую полосу свечения от 375 до 450 нм с пиком при 405 нм (рис. 4). Данный пик совпадает с одним из

максимумов поглощения суспензии SiO_2 с ДФА при 406 нм (рис. 2а). На рис. 8 приведены фотографии в процессе проращивания луковиц лука и гладиолусов при освещении красными и синими

Таблица 2. Влияние обработки SiO_2 и $SiO_2 + ДФА$ на длину побегов и корней лилий

Время, сут	Длина корней			Длина побегов		
	см					
	Контроль H ₂ O	H ₂ O + SiO ₂	H ₂ O + SiO ₂ + + ДФА	Контроль H ₂ O	H ₂ O + SiO ₂	H ₂ O + SiO ₂ + + ДФА
1	0.6 ^а	0.6 ^а	0.6 ^а	0 ^а	0 ^а	0 ^а
4	2.5 ^{бв}	2.6 ^б	2.9 ^а	0 ^а	0 ^а	0 ^а
8	4.8 ^б	5.3 ^б	6.7 ^а	0 ^б	1.8 ^б	3.7 ^а
12	7.3 ^б	8.1 ^б	10.5 ^а	3.9 ^б	6.3 ^б	8.5 ^а
16	11.6 ^б	13.5 ^б	14.7 ^а	9.6 ^б	13.2 ^б	17.6 ^а
20	15.4 ^б	17.2 ^б	18.5 ^а	14.8 ^б	18.7 ^б	24.4 ^а

Примечание. Приведены усредненные данные 5-ти экспериментов ($n = 3$). То же в табл. 3, 4.

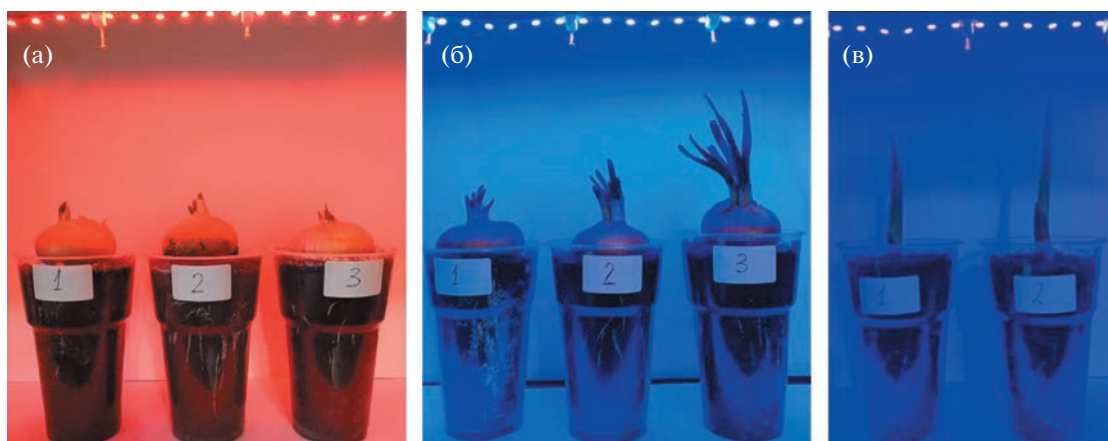


Рис. 8. Рост луковиц лука и гладиолуса при освещении красными и синими светодиодами: (а) – лук (красный светодиод), варианты обработки: 1 – H_2O , 2 – $H_2O + SiO_2$, 3 – $H_2O + SiO_2 + ДФА$, (б) – лук (синий светодиод), варианты: 1 – H_2O , 2 – $H_2O + SiO_2$, 3 – $H_2O + SiO_2 + ДФА$, (в) – гладиолус (синий светодиод), варианты: 1 – $H_2O + SiO_2$, 2 – $H_2O + SiO_2 + ДФА$.

светодиодами. В табл. 4 более подробно приведены данные прорастания побегов гладиолуса и лука в течение 20 сут при освещении светодиодами красного и синего свечения.

Выявлено, в обоих случаях луковицы лука и гладиолуса, обработанные суспензиями наночастиц диоксида кремния, содержащих дифенилан-

трацен, росли быстрее, чем контрольные группы луковиц, обработанные только водой и водной суспензией наночастиц SiO_2 при освещении светодиодами синего свечения.

При освещении светодиодами красного свечения луковицы во всех вариантах проросли одинаково, изменения скорости прорастания под

Таблица 3. Изменение длины побегов растений гладиолуса сорта Мадагаскар при обработке SiO_2 и $SiO_2 + ДФА$

Время, сут	Длина побегов, см		
	Контроль H_2O	$H_2O + SiO_2$	$H_2O + SiO_2 + ДФА$
1	0 ^a	0 ^a	0 ^a
5	0 ^b	0.3 ^b	1.2 ^a
10	2.3 ^b	3.6 ^b	7.8 ^a
15	9.6 ^b	15.7 ^b	17.4 ^a
20	15.5 ^b	18.4 ^b	24.3 ^a
25	26.2 ^b	31.1 ^b	35.6 ^a

Таблица 4. Влияние красного и синего светодиода на длину побегов растений лука и гладиолуса

Время, сут	Длина побегов, см							
	Красный светодиод			Синий светодиод				
	Лук			Лук			Гладиолус	
	Контроль H_2O	$H_2O + SiO_2$	$H_2O + SiO_2 + ДФА$	Контроль H_2O	$H_2O + SiO_2$	$H_2O + SiO_2 + ДФА$	$H_2O + SiO_2$	$H_2O + SiO_2 + ДФА$
1	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a
5	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^b	0.4 ^b	1.3 ^a	0 ^b	0.5 ^a
10	3.4 ^a	3.5 ^a	3.5 ^a	4.7 ^b	6.4 ^b	8.5 ^a	3.1 ^b	6.3 ^a
15	6.7 ^a	7.3 ^a	7.2 ^a	7.5 ^b	12.1 ^b	15.6 ^a	10.6 ^b	15.4 ^a
20	12.3 ^a	13.8 ^a	13.6 ^a	13.4 ^b	16.8 ^b	20.2 ^a	14.2 ^b	19.7 ^a

влиянием ДФА не было обнаружено (рис. 8а, табл. 4). Так как излучение красных светодиодов расположено в области 630 нм, при данной длине волны не наблюдали спектр фотолуминесценции ДФА, способного влиять на хлорофилл (рис. 2в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучены морфологические и оптические свойства пористых наночастиц диоксида кремния с нанесенным дифенилантраценом (ДФА) в водных суспензиях. Показано, что использование таких наночастиц при проращивании луковичных растений ускоряет рост стеблей и тем самым сокращает время до цветения. Досвечиванием светодиодами синего и красного излучения показано, что именно содержание дифенилантрацена в наночастицах оказывало положительное влияние на рост растений. Полученные результаты могут быть использованы при выращивании декоративных комнатных растений и цветов в условиях недостатка естественного света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh S., Agrawal S.B., Agrawal M. Role of light in plant development // *Inter. J. Plant Environ.* 2015. V. 53. P. 43–56.
2. Kyriacou M.C., Rouphael Y., Di Gioia F., Kyrtzias A., Serio F., Renna M., De Pascale S., Santamaria P. Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens // *Trend. Food Scitechnol.* 2016. V. 57. P. 103–115.
3. Kim Y.J., Kim H.M., Jeong B.R., Lee H.J., Hwang S.J. Iceplant growth and phytochemical concentrations are affected by light quality and intensity of monochromatic light-emitting diodes // *Hortic. Environ. Biot.* 2018. V. 59. P. 529–536.
4. Monostori I., Heilmann M., Kocsy G., Rakszegi M., Ahres M., Altenbach S.B., Szalai G., Pál M., Toldi D., Sarkadi L.S., Harnos N., Galiba G., Darko E. LED lighting – modification of growth, metabolism, yield and flour composition in wheat by spectral quality and intensity // *Front. Plant Sci.* 2018. V. 9. P. 605.
5. Deepika A., Ankit S.S., Amarjeet S. Dark-induced hormonal regulation of plant growth and development // *Front. Plant Sci.* 2020. V. 11. 581666.
6. Евлаков П.М., Бычков А.А., Заплетин В.Ю. Воздействие светодиодных и натриевых облучателей на рост и развитие растений, выращенных методом клонального микроразмножения (*in vitro*) // *Вестн. ВГУ. Сер.: хим., биол., фармация.* 2020. № 4. С. 43–49.
7. Kozai T., Niu G., Takagaki M. Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. USA: Academic Press, 2015. 438 p.
8. Lastochkina O., Aliniaiefard S., Seifikalhor M., Bosacchi M., Maslennikova D., Lubyanova A. Novel approaches for sustainable horticultural crop production: advances and prospects // *Horticulturae.* 2022. V. 8. P. 910.
9. Tennessen D.J., Singaas E.L., Sharkey T.D. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research // *Photosynthes. Res.* 1994. V. 39. P. 85–92.
10. Kim S.J., Hahn E.J., Heo J.W., Paek K.Y. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro // *Sci. Horticulturae.* 2004. V. 101. P. 143–151.
11. Breivė K., Tamulaitis G., Duchovskis P., Bliznikas Z., Ulinskaitė R., Brazaitytė A., Novickovas A., Zukauskas A. High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation // *J. Physic. D: Appl. Physic.* 2005. V. 38. P. 3182–3187.
12. Bayat, L., Arab M., Aliniaiefard S., Seif M., Lastochkina O., Li T. Effects of growth under different light spectra on the subsequent high light tolerance in rose plants // *AoB Plants.* 2018. V. 10. № 5. P. 52.
13. Samuolienė G., Viršilė A., Brazaitytė A., Jankauskienė J., Sakalauskienė S., Vaštakaitė V., Novickovas A., Viskeliene A., Sasnauskas A., Duchovskis P. Blue light dosage affects carotenoids and tocopherols in microgreens // *Food Chem.* 2017. V. 228. P. 50–56.
14. Hasan M.M., Bashir T., Ghosh R., Lee S.K., Bae H. An overview of LEDs' effects on the production of bioactive compounds and crop quality // *Molecule.* 2017. V. 22. P. 1–12.
15. Ferrón-Carrillo F., Guil-Guerrero J.L., González-Fernández M.J., Lyashenko S., Battafarano F., da Cunha-Chiamolera T.P.L., Urrestarazu M. LED enhances plant performance and both carotenoids and nitrates profiles in lettuce // *Plant Foods Human Nutrit.* 2021. V. 76. № 2. P. 210–218.
16. Paradiso R., Proietti S. Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: the state of the art and the opportunities of modern LED systems // *J. Plant Growth Regul.* 2022. V. 41. P. 742–780.
17. Di Q., Li J., Du Y., Wei M., Shi Q., Li Y., Yang F. Combination of red and blue lights improved the growth and development of eggplant (*Solanum melongena* L.) seedlings by regulating photosynthesis // *J. Plant Growth Regul.* 2021. V. 40. № 4. P. 1477–1492.
18. Rabinowitch E.I., Govindjee G. The role of chlorophyll in photosynthesis // *Sci. Amer.* 1965. V. 213. № 1. P. 74–83.
19. Giraldo J.P., Landry M.P., Faltermeier S.M., McNicholas T.P., Iverson N.M., Boghossian A.A., Reuel N.F., Hilmer A.J., Sen F., Brew J.A., Strano M.S. // Plant nanobionics approach to augment photosynthesis and biochemical sensing // *Nature Mater.* 2014. V. 13. № 4. P. 400–408.
20. Berlman I.B. Handbook of fluorescence spectra of aromatic molecules. N.Y.: Academic Press, 1971. 473 p.
21. Sharipov G.L., Abdrakhmanov A.M., Gareev B.M., Tukhbatullin A.A. Porous SiO₂ nanoparticles containing ruthenium or sulfur compounds: sonochemical producing and sonoluminescence in aqueous suspensions // *Ultrasonics Sonochem.* 2020. V. 61. P. 104842.
22. Agliullin M.R., Danilova I.G., Faizullin A.V., Amaratov S.V., Bubennov S.V., Prosochkina T.R., Grigor'eva

- N.G., Paukshtis E.A., Kutepov B.I.* Sol-gel synthesis of mesoporous aluminosilicates with a narrow pore size distribution and catalytic activity thereof in the oligomerization of dec-1-ene // *Microporous Mesoporous mater.* 2016. V. 230. P. 118–127.
23. *Mokronosova A.T.* Small workshop on plant physiology. Moscow: Moscow State University, 1994. 184 p.
24. *Hedayatifar L., Irani E., Mazarei M., Rasti S., Azar Y.T., Rezakhani A., Mashaghi A., Shayeganfar F., Anvari M., Heydari T., Tabar A.R., Nafari N., Vesaghi M., Asgari R., Tabar M.R.R.* Optical absorption and electronic spectra of chlorophylls a and b // *RSC Adv.* 2016. V. 6. P. 109778–109785.

Aqueous Suspension of Porous SiO₂ Nanoparticles, Containing 9,10-diphenylanthracene, in Agrophotonics

B. M. Gareev^{a, #}, G. L. Sharipov^a, and O. V. Lastochkina^b

^a*Institute of Petrochemistry and Catalysis – a separate structural subdivision of the Ufa Federal Research Center of the RAS
prosp. Oktyabrya 141, Ufa 450075, Russia*

^b*Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
prosp. Oktyabrya 71, Ufa 450054, Russia*

[#]*E-mail: gareev-bulat@yandex.ru*

An aqueous colloidal suspension of porous silicon dioxide nanoparticles containing an organic phosphor 9,10-diphenylanthracene was obtained by ultrasonic dispersion. The average size of suspension nanoparticles is 15–25 nm. This suspension has a characteristic absorption spectrum for diphenylanthracene in the region from 345 to 420 nm and a photoluminescence spectrum in the region from 400 to 550 nm. The resulting suspension was used for irrigation when growing bulbous plants (lilies and gladiolus) under conditions of a short light period with additional lighting with LEDs-based phytolamps with red and blue spectra. It has been established that the use of this suspension with nanoparticles that enter plants as an artificial photosynthetic pigment accelerates the growth of bulbous plants by an average of 15–20% compared to control samples under the same lighting conditions.

Keywords: light, LED lamps, nanoparticle suspension, silicon dioxide, photoluminescence, 9,10-diphenylanthracene, growth, lilies, gladiolus.