

## КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
С ВОДОЙ СЕМЯН ЯЧМЕНЯ ПОСЛЕ ИХ КОЛЛОИДНОЙ ОБРАБОТКИ  
В КРЕМНЕЗОЛЯХ С НАНОПОРОШКАМИ  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>© 2022 г. С. В. Мьякин<sup>1, 2, \*</sup>, А. С. Коваленко<sup>3</sup>, Г. Г. Панова<sup>4</sup>, О. А. Шилова<sup>1, 3</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),  
Московский просп., 26, Санкт-Петербург, 190013 Россия<sup>2</sup>Институт аналитического приборостроения РАН,  
ул. Ивана Черных, 31/33, Санкт-Петербург, 198095 Россия<sup>3</sup>Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,  
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия<sup>4</sup>Аерофизический научно-исследовательский институт,  
Гражданский просп., 14, Санкт-Петербург, 195220 Россия

\*e-mail: svmjakin@technolog.edu.ru

Поступила в редакцию 31.07.2021 г.

После доработки 14.09.2021 г.

Принята к публикации 08.10.2021 г.

Показано, что осаждение на поверхности семян ячменя оболочек из кремнезоля на основе гидролизованного тетраэтоксисилана с добавкой наночастиц маггемита  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> приводит к нелинейному изменению прозрачности в УФ-области дистиллированной нестерильной и стерилизованной воды после контакта с обработанными кремнезолями семенами в зависимости от концентрации вводимой в кремнезоль оксидной добавки, варьируемой в диапазоне 0.001–10000 мг/л. Обнаружен ряд корреляций между коэффициентом пропускания исследуемых проб воды и целевыми показателями прорастания семян, что может быть обусловлено изменением проницаемости и сорбционной активности формируемой оболочки.

**Ключевые слова:** наночастицы, кремнезоли, маггемит, предпосевная обработка семян, спектрофотометрия

DOI: 10.31857/S0132665122010085

## ВВЕДЕНИЕ

Важным подходом к улучшению целевых показателей сельскохозяйственных культур (прорастания семян, роста, развития и урожайности растений) является предпосевная обработка семян биологически активными веществами, в частности наноконпозициями на основе кремнезелей [1–3]. В серии ранее выполненных нами исследований [4, 5] была продемонстрирована перспективность использования в качестве модифицирующих добавок кремнезелей, получаемых методом золь-гель синтеза и содержащих дисперсные оксидные или углеродные наночастицы, для улучшения целевых характеристик ряда сельскохозяйственных культур, в частности ярового ячменя и листовой капусты. Вместе с тем одним из важнейших факторов, определяющих прорастание семян, является интенсивность их обмена веществами с окружающей средой, в свою очередь обусловленная состоянием защитных оболочек [6]. Выделение семенами различных веществ в водную среду можно количественно охарактеризовать с использованием как химических, так и физических методов анализа, на основе оцен-

ки ее прозрачности в ультрафиолетовой области. В этой области спектра наблюдается интенсивное поглощение как многих органических веществ, так и наноразмерных неорганических компонентов. В данной работе в продолжение серии исследований влияния кремнезелей с добавками различных биологически активных веществ на характеристики семян и рост растений, на примере ярового ячменя (сорт “Ленинградский”) в частности, изучено взаимодействие семян с водной средой методом УФ-спектроскопии.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Кремнезоли на основе гидролизованного в кислой среде тетраэтилового эфира ортокремневой кислоты  $\text{Si}(\text{OEt})_4$  – тетраэтоксисилана (ТЭОС) синтезировали в соответствии с методикой, подробно описанной в [4, 5], после чего в них вводили синтезированный в [7] нанопорошок маггемита ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) с размером частиц  $\sim 20\text{--}25$  нм, в соотношении 10000, 5000, 100, 10, 1, 0.1, 0.01, 0.001 мг порошка на 1 л кремнезоля и осуществляли предпосевную обработку семян полученными суспензиями по методике, описанной в [5].

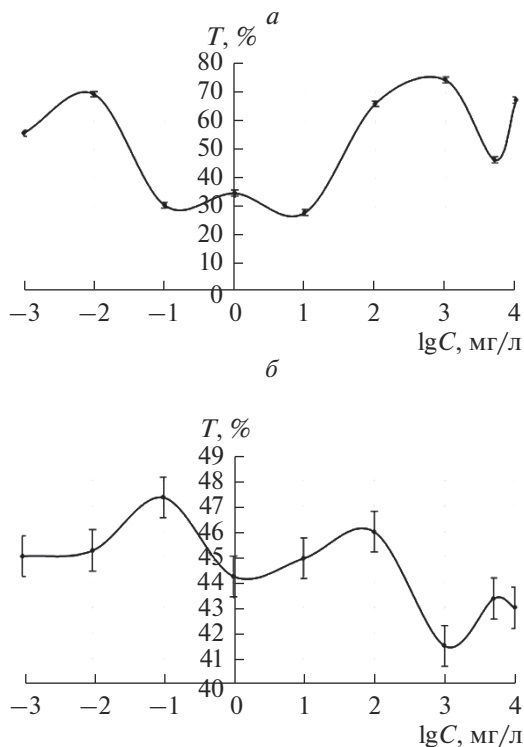
Характер взаимодействия семян с водной средой изучали спектрофотометрическим методом. Порции из 10 исследуемых семян погружали в дистиллированную воду объемом 4 мл на 20 мин, после чего воду декантировали и измеряли ее спектры пропускания в диапазоне длин волн 200–300 нм с использованием спектрофотометра СФ-56 (ЛОМО, Санкт-Петербург) относительно дистиллированной воды в канале сравнения. В отдельном эксперименте с целью оценки вклада присутствующих в воде микроорганизмов на прозрачность в УФ-области дистиллированную воду в стеклянных емкостях по 50 мл перед погружением семян предварительно стерилизовали в автоклаве ВК-75 в течение 30 мин при давлении 1 атм., после чего в указанные емкости с водой в стерильных условиях погружали семена и выдерживали в течение 25 мин, затем воду декантировали в стерилизованные чашки Петри и измеряли спектры пропускания. В качестве количественной характеристики был выбран коэффициент пропускания  $T(\%)$  при длине волны 260 нм (автоматически определяемая спектрофотометром доля исходного светового потока, прошедшая сквозь кювету с исследуемой пробой), при которой наблюдались наиболее заметные различия между исследуемыми пробами.

Изучение целевых показателей исследуемых семян заключалось в определении их энергии прорастания и всхожести в соответствии с ГОСТ 12038–84 и с правилами Международной ассоциации тестирования семян (ISTA). Все эксперименты повторяли дважды. Повторность в вариантах каждого эксперимента – трехкратная.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Контакт воды с семенами во всех случаях не вызывал существенных изменений в видимой области спектра, но приводил к значительному снижению прозрачности в УФ-области в сравнении с исходным значением, составляющим при длине волны 260 нм свыше 95%. После контакта с нестерильной водой контрольных семян коэффициент пропускания составил 59%, а со стерильной – 39%. В случае семян, модифицированных обработкой кремнезолью без добавки маггемита, аналогичные показатели после контакта с нестерильной и стерильной водой составили соответственно 32 и 43.5%.

Введение оксидов железа в кремнезоль в зависимости от количества используемой добавки приводит к нелинейному изменению прозрачности водного раствора (рис. 1). Предварительная стерилизация воды приводит к резкому изменению зависимости коэффициента пропускания от концентрации добавки маггемита, выражающемуся как в уменьшении диапазона значений до 40–50% в сравнении с 25–75% в отсутствие стерилизации, так и в изменении характера чередования наблюдаемых максимумов и минимумов на противоположный. В серии экспериментов с использованием нестериль-

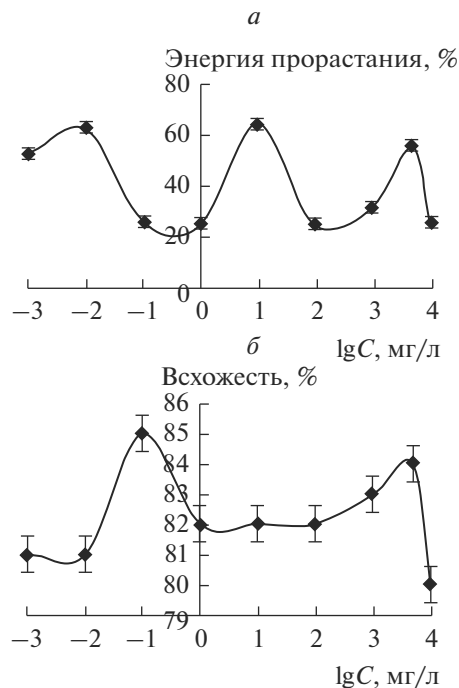


**Рис. 1.** Зависимость коэффициента пропускания декантированной после контакта с семенами воды в отсутствии (*a*) и при использовании (*б*) предварительной стерилизации от логарифма концентрации маггемита в кремнезоле.

ной воды прозрачность декантированных проб при использовании высоких концентраций добавки возрастает (рис. 1*a*), что указывает на то, что вводимый оксид железа не является непосредственной причиной изменения оптических характеристик. В случае стерилизованной воды наблюдается тенденция к снижению прозрачности с ростом концентрации добавки (рис. 1*б*).

Возможной причиной наблюдаемых различий является то, что стерилизация воды приводит к разрушению микробных клеток, и их содержимое в совокупности с выделениями семян является причиной снижения прозрачности водного раствора после контакта с семенами. Вероятно, увеличение концентрации добавки маггемита препятствует выделению органических веществ семенами в водную фазу, но, с другой стороны, затрудняет сорбцию продуктов разрушения микробных клеток кремнезолом, чем обусловлены рассмотренные выше противоположные тенденции изменения прозрачности.

В серии экспериментов с использованием нестерилизованной воды наиболее отчетливо выражена корреляция между указанным коэффициентом пропускания и энергией прорастания семян (рис. 2), которая является положительной (коэффициент корреляции  $R \approx 0.99$ ) при концентрациях добавки маггемита до 1 мг/л, а при более высоких его количествах меняется на отрицательную ( $R \approx -0.94$ ). По-видимому, при относительно низких концентрациях оксидной добавки она оказывает регулирующее воздействие на выделение веществ семенами, а в более высоких количествах в допол-



**Рис. 2.** Зависимость энергии прорастания и всхожести семян от логарифма концентрации маггемита в кремнезоле.

нение к этому начинает выполнять трофическую функцию, при большом избытке приводя к отравлению живых объектов и подавлению прорастания.

Всхожесть семян также характеризуется нелинейной зависимостью от количества добавки маггемита с отчетливым максимумом при его концентрации 0.1 мг/л ( $\lg C = -1$ ) и резким снижением при введении в максимальном количестве 10000 мг/л. В серии экспериментов без стерилизации воды в диапазоне концентрации маггемита до 1 мг/л всхожесть отрицательно коррелирует с коэффициентом пропускания декантированных проб воды ( $R \approx -0.78$ ), а в случае стерилизованной воды аналогичная зависимость носит отчетливо положительный характер ( $R \approx 0.83$ ). При более высоких концентрациях маггемита указанные корреляции становятся значительно менее выраженными, что согласуется с рассмотренным выше изменением характера действия вводимой добавки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают перспективность применения УФ-спектроскопических измерений для оценки влияния обработок семян тестируемыми веществами на интенсивность взаимодействия (обмена веществ) семян с водной средой и возможного прогнозирования ряда показателей прорастания сельскохозяйственных культур.

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру Агрофизического научно-исследовательского института Дмитрию Викторовичу Кудрявцеву за помощь в проведении спектроскопических исследований с предварительной стерилизацией водной среды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-13-00442).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Singh A., Singh N.B., Hussain I., Singh H., Singh S.C.* Plant-nanoparticle interaction: An approach to improve agricultural practices and plant productivity // *International J. Pharmaceutical Science Invention*. 2015. V. 4. Iss. P. 25–40.
2. *Zhu H., Han J., Xiao J.Q., Jin Y.* Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants // *J. Environmental Monitoring*. 2008. № 10. P. 713.
3. *Ahmed M., Qadeer U., Ahmed Z.I., Hassan F.* Improvement of wheat (*Triticum aestivum*) drought tolerance by seed priming with silicon // *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2016. V. 62. № 3. P. 299–315.
4. *Панова Г.Г., Шилова О.А., Николаев А.М., Коваленко А.С., Удалова О.Р., Аникина Л.М., Журавлева А.С., Хомяков Ю.В., Вертебный В.Е., Дубовицкая В.И.* О влиянии наночастиц оксида железа на растения в вегетативный период развития // *Агрофизика*. 2019. № 3. С. 40–50.
5. *Мякин С.В., Николаев А.М., Хамова Т.В., Шилова О.А., Панова Г.Г.* Исследование влияния кремнезоля и магнитных нанопорошков оксидов железа на семена ячменя при их взаимодействии с водной средой // *Журн. неорганической химии*. 2020. Т. 65. № 4. С. 574–577.
6. *Ensanfar S., Modarres-Sanavy S.A.M.* Crop protection by seed coating // *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*. 2005. V. 70. P. 225–229.
7. *Шилова О.А., Николаев А.М., Коваленко А.С., Синельников А.А., Копица Г.П., Баранчиков А.Е.* Синтез магнитных нанопорошков оксида железа – магнетита и маггемита // *Журн. неорганической химии*. 2020. Т. 65. № 3. С. 398–402.