



Оптические фотолюминесцентные свойства семян растений при заражении микопатогенами

М. В. Беляков¹✉, М. Н. Московский¹, И. Ю. Ефременков¹,
В. С. Новиков¹, С. М. Кузнецов¹, А. А. Бойко²,
С. М. Михайличенко³

¹ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)

² Донской государственный технический университет
(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

³ Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К. А. Тимирязева
(г. Москва, Российская Федерация)

✉ bmw20100@mail.ru

Аннотация

Введение. Использование оптического мониторинга качества зерна позволит значительно снизить потери урожая зерновых, вызванные заражением микопатогенами.

Цель исследования. Изучение зависимости спектральных характеристик, параметров возбуждения и люминесценции семян зерновых при заражении микопатогенами с целью определения информативных спектральных диапазонов и последующей разработки методики контроля зараженности.

Материалы и методы. Для исследования были использованы инокулированные семена пшеницы и ячменя ряда *Fusarium graminearum* и *Alternaria alternata*. Спектры возбуждения и регистрации люминесценции измерялись с помощью дифракционного спектрофлуориметра СМ 2203 в диапазоне 230–600 нм. Интегральные и статистические параметры спектров вычислялись в программе Microcal Origin.

Результаты исследования. Удалось выяснить, что при заражении микопатогенами уменьшается спектральная поглощательная способность семян. Для пшеницы интегральные параметры поглощения существенно снижаются при заражении альтернарией. В случае с ячменем, наоборот, большее снижение происходит при заражении фузариозом. В области 230–310 нм у зараженных семян появляются новые максимумы возбуждения. При возбуждении излучением с длиной волны $\lambda = 284$ нм спектральные и интегральные характеристики и параметры зараженных семян превышают аналогичные для незараженных. При возбуждении излучением 424 нм и 485 нм количество здоровых семян пшеницы и ячменя превышает количество зараженных.

Обсуждение и заключение. Изменения в спектрах возбуждения и фотолюминесценции могут быть объяснены замещением полисахаридов и белков при поглощении и модификации микокультур. Для объективного контроля заражения семян микопатогенами целесообразно использовать диапазон фотолюминесценции 290–310 нм при возбуждении излучением около 284 нм. Для различения заражения фузариозом и альтернариозом следует использовать контроль фотолюминесценции в диапазоне 380–410 нм.

© Беляков М. В., Московский М. Н., Ефременков И. Ю., Новиков В. С., Кузнецов С. М., Бойко А. А., Михайличенко С. М., 2024



Ключевые слова: семена, микопатогены, оптические спектры, фотолуминесценция, альтернариоз, фузариоз, *Fusarium graminearum*, *Alternaria alternata*

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования: Оптические фотолуминесцентные свойства семян растений при заражении микопатогенами / М. В. Беляков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 2. С. 281–294. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.281-294>

Optical Photoluminescent Properties of Plant Seeds when Infected with Mycopathogens

M. V. Belyakov^a✉, M. N. Moskovskiy^a, I. Yu. Efremenko^a,
V. S. Novikov^a, S. M. Kuznetsov^a, A. A. Boyko^b,
S. M. Mikhailichenko^c

^a Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)

^b Don State Technical University
(Rostov-on-Don, Russian Federation)

^c Russian Timiryazev State Agrarian University
(Moscow, Russian Federation)

✉ bmw20100@mail.ru

Abstract

Introduction. Using digital technologies such as optical monitoring of grain quality will reduce losses of grain crops caused by infection with mycopathogens.

Aim of the Study. The study is aimed at investigating spectral characteristics, excitation parameters and luminescence of cereal seeds when infected with mycopathogens to determine informative spectral ranges and subsequent development of infection control methods.

Materials and Methods. In the study, there were used wheat and barley seeds inoculated with *Fusarium graminearum*, *Alternaria alternata*. Excitation and luminescence registration spectra were measured by a diffraction spectrofluorimeter CM 2203 in the range of 230–600 nm. Integral and statistical parameters of spectra were calculated with the use of Microcal Origin program.

Results. It was found that the spectral absorbency of seeds decreases when infected with mycopathogens. For wheat, the integral absorption parameters decrease more significantly when infected with *alternaria*, and for barley, on the contrary, a greater decrease occurs when infected with *fusarium*. In the area of 230–310 nm, new excitation maxima appear in infected seeds. When excited by radiation with a wavelength of $\lambda = 284$ nm, the spectral and integral characteristics and parameters of infected seeds exceed those for uninfected ones. When excited with 424 nm and 485 nm radiation, the number of disease-free seeds of both wheat and barley exceeds the number of infected seeds.

Discussion and Conclusion. The changes in excitation and photoluminescence spectra can be explained by the substitution of polysaccharides and proteins during mycoculture uptake and modification. To objectively monitor the mycopathogen infestation of seeds, it is advisable to use a photoluminescence range of 290–310 nm when excited by radiation of about 284 nm. To determine if the infection caused with *fusarium* or *alternariasis*, photoluminescence monitoring should be used in the range of 380–410 nm.

Keywords: seeds, mycopathogens, optical spectra, photoluminescence, alternariasis, fusariasis, *Fusarium graminearum*, *Alternaria alternata*

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: The authors are grateful to the reviewers, whose critical evaluation of the presented materials and suggestions for improvement contributed significantly to the quality of this article.

For citation: Belyakov M.V., Moskovskiy M.N., Efremkov I.Yu., Novikov V.S., Kuznetsov S.M., Boyko A.A., et al. Optical Photoluminescent Properties of Plant Seeds when Infected with Mycopathogens. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(2):281–294. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202402.281-294>

Введение. Повышения производительности труда в сельском хозяйстве, снижения энергетических и материальных затрат, обеспечения экологической безопасности возможно добиться путем создания и внедрения средств автоматизации, роботизации и цифровых технологий [1]. Одним из основных факторов, влияющих на потери урожая зерновых культур, являются болезни растений. Ежегодно во всем мире теряется 15–50 % зерновых из-за заражения микопатогенами. Кроме того, 25 % сельскохозяйственных культур, используемых в пищу людьми и животными, заражены микотоксинами [2]. Поэтому необходимы более эффективные и устойчивые технологии для лучшего контроля состояния сельскохозяйственных культур.

Фузариозная гниль, вызываемая грибковым патогеном рода *Fusarium*, – хроническое заболевание зерновых во многих регионах земледелия. Среди зерновых культур мягкая и твердая пшеница восприимчивы к виду *Fusarium pseudograminearum*. Ячмень считается более толерантной культурой и демонстрирует ограниченные потери урожая при заражении. *Fusarium pseudograminearum* также может инфицировать овес, что приводит лишь к незначительному развитию симптомов заболевания или их отсутствию.

Получение чистых спектров симптомов болезней растений имеет важное значение для повышения надежности методов их защиты. Характеристики и параметры фотолуминесценции, полученные из чистых спектров, можно использовать в качестве ценных обучающих данных для разработки алгоритмов, предназначенных для обнаружения болезней растений оптическими методами.

Цель исследования заключается в изучении зависимости спектральных характеристик, параметров возбуждения и люминесценции семян пшеницы и ячменя при заражении микопатогенами *Fusarium graminearum* и *Alternaria alternata* для определения информативных спектральных диапазонов и последующей разработки методики контроля зараженности.

Обзор литературы. В настоящее время для диагностики популяции грибов рода *Fusarium* разработан количественный анализ методом ПЦР с использованием зондов [3]. Также имеются данные о применении метода анализа междуузлий, выполняемого с использованием интактных цветущих растений пшеницы, для точной идентификации процесса инфицирования тканей пшеницы микопатогеном *Fusarium graminearum* [4]. В том числе исследована жидкостная хроматография

(гибридная масс-спектрометрия) для широкого анализа метаболических профилей и идентификации метаболитов сопротивления связанного *Fusarium* колоса ячменя [5]. Гистопатологическую оценку инфекции возбудителем гнили *Fusarium pseudograminearum* в тканях проростков пшеницы можно проводить и с помощью флуоресцентной микроскопии [6].

Выявлено спектральное различие симптомов листовой ржавчины, вызываемых двумя особыми формами грибов. *Puccinia recondite f. sp. tritici* – на пшенице и *Puccinia recondita f. sp. recondite* – на листовой чешуе ржи. Спектральные измерения проводились на спектрометре FieldSpec 3 в диапазоне длин волн 350–2500 нм [7].

Исследования зарубежных авторов показали, что пестрота, пигментный состав или светоотражающие свойства изменяют фотофизическое поведение листьев [8]. Для расчета коэффициентов поглощения и рассеяния ими были получены спектры отражения и пропускания в УФ-видимой и ближней ИК-области.

Широкий интерес для современной науки представляет гиперспектральная визуализация. Она возникла из дистанционного зондирования и объединяет области машинного зрения и точечной спектроскопии, обеспечивая превосходную сегментацию изображения для обнаружения дефектов [9–11]. Благодаря достижениям в области оборудования и анализа данных за последние два десятилетия технология гиперспектральной визуализации превратилась в мощный инструмент неразрушающего контроля [12–15].

К настоящему времени недостаточно изучен потенциал фотолюминесцентных методов диагностики заболеваний растений фузариозом в ультрафиолетовом и видимом диапазонах. Так, для спектроскопического исследования E-Z фотоизомеризации нового цитретрилацилгидразона спектры поглощения в ультрафиолетовом диапазоне регистрировались на диодном спектрофотометре Agilent Cary 8454 в диапазоне 250–600 нм. Спектры излучения были измерены на спектрофотометре Horiba Jobin Yvon FluoroMax-4 [16]. Использовались методы оптического поглощения и флуоресценции, чтобы сделать выводы о том, как артепиллин С бразильского зеленого прополиса взаимодействует с амфифильными агрегатами. Спектры оптического поглощения представляли состояние протонирования, продиктованное локальным рН на поверхности мицелл и липидных пузырьков [17].

Также исследователи, применяя рН-зависимую УФ-видимую спектроскопию и моделирование спектрального разложения, изучают взаимодействие между соседними аминокислотами и билином в семействе фитохромов [18]. Флуорометрический метод позволяет оценивать концентрацию хлорофилла *a*, вносимого отдельными группами водорослей в реальном образце, путем подгонки его спектра возбуждения флуоресценции к линейной комбинации нормальных спектров соответствующих групп водорослей [19]. В том числе получены полезные данные для оптимизации послеуборочных фотохимических протоколов с помощью неразрушающего оптического датчика [20].

Для оценки растительных кормов применяются переносные оптические приборы [21–23].

Таким образом, фотолюминесцентный метод, наряду с оптическим, активно применяется для исследования биологических объектов и может быть использован для диагностики заражения семян микопатогенами.

Материалы и методы. Для измерений авторами были взяты образцы пшеницы «тимирязевская 150» и ячменя «богатырь». Процесс заражения семян микопатогенами происходил следующим образом. Зерна пшеницы и ячменя были взвешены и расфасованы в пакеты по 7,0–7,5 г, а затем обеззаражены. Далее их поместили в стерильные стеклянные чашки Петри, к которым отдельными чистыми пипетками Пастера добавили по 3 мл раствора со спорами *Fusarium graminearum* и *Alternaria alternata*. Таким образом, зерна каждой культуры были заражены отдельно двумя разными патогенами. После проделанных действий чашки Петри были запечатаны парафилмом, упакованы в герметичные пакеты и помещены на хранение в термостат при температуре 28 °С.

Измерения спектров возбуждения и люминесценции проводились на спектрофлуориметре СМ 2203 фирмы «Солар». Сначала измерялись характеристики возбуждения $\eta_e(\lambda)$ в диапазоне от 230–600 нм по ранее разработанной методике [24]. На основе полученных результатов были измерены спектры фотолюминесценции $\varphi_l(\lambda)$. По полученным спектральным характеристикам вычислена интегральная поглощательная способность H (в относительных единицах – о. е.) по формуле:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_e(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $\eta_e(\lambda)$ – спектральная характеристика возбуждения, о. е./нм; λ_1, λ_2 – границы спектрального диапазона возбуждения, нм.

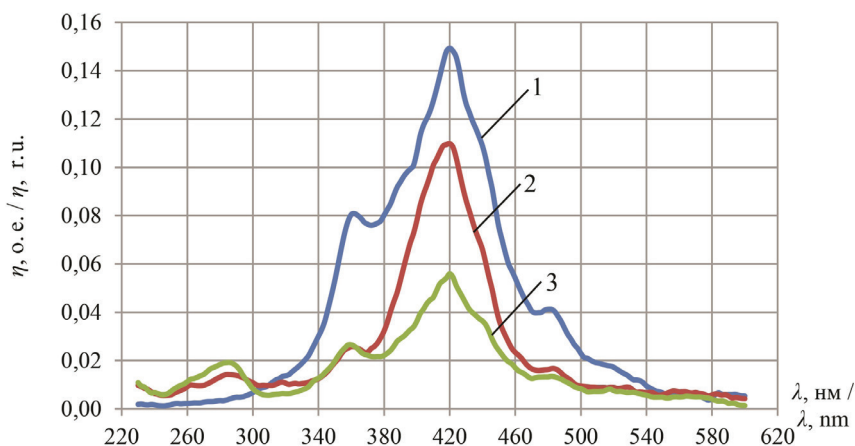
Интегральные параметры спектров $\varphi_l(\lambda)$ – потоки фотолюминесценции Φ (в относительных единицах) определяли по формуле:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_l(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $\varphi_l(\lambda)$ – спектральная характеристика фотолюминесценции, о. е./нм; λ_1, λ_2 – границы спектрального диапазона фотолюминесценции, нм.

Все измерения проводились в двадцатикратной повторности так, чтобы погрешность определения интегральных параметров H и Φ не превышала 10 % при доверительной вероятности 0,9. Кроме того, в программе Microcal Origin были рассчитаны статистические параметры спектров: математическое ожидание M_x , дисперсия σ^2 , асимметрия A_S и эксцесс E_X .

Результаты исследования. Спектральные характеристики возбуждения пшеницы, полученные при синхронном сканировании, представлены на рисунке 1, а интегральные параметры спектров, рассчитанные по формуле (1), – в таблице 1.



Р и с. 1. Спектральные характеристики возбуждения пшеницы:
1 – здоровой; 2 – зараженной *Fusarium graminearum*; 3 – зараженной *Alternaria alternata*

F i g. 1. Spectral characteristics of wheat excitation:
1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*

Источни к: здесь и далее в статье все рисунки составлены авторами.

Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the authors.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Интегральные параметры спектров возбуждения пшеницы
Integral Parameters of Wheat Excitation Spectra

Вид семян / Type of seed	Н, о. е. (для спектрального диапазона, нм) / Н, r. u. (for the spectral range, nm)			
	230–310	310–380	380–470	470–540
Здоровые / Disease-free	0,29	3,17	9,06	1,72
Зараженные <i>Fusarium graminearum</i> / Infected with <i>Fusarium graminearum</i>	0,79	1,22	5,82	0,77
Зараженные <i>Alternaria alternata</i> / Infected with <i>Alternaria alternata</i>	0,92	1,09	3,06	0,64

Источни к: здесь и далее в статье все таблицы составлены авторами.

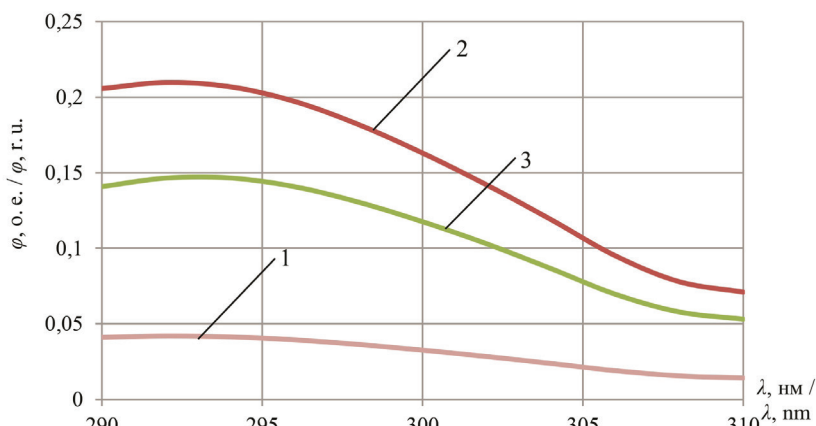
Source: Hereinafter in this article all tables were drawn up by the authors.

На рисунках 2 и 3 отображены спектры фотолюминесценции пшеницы при возбуждении излучением 284 нм и 424 нм соответственно.

Интегральные параметры спектров фотолюминесценции пшеницы, рассчитанные по формуле (2), представлены в таблице 2.

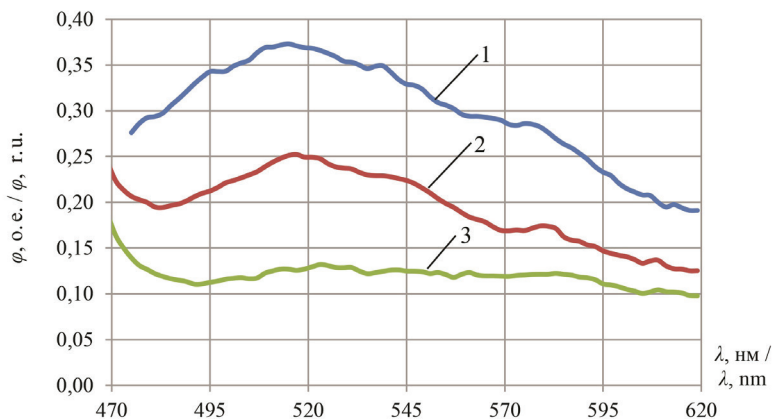
Спектральные характеристики возбуждения ячменя, полученные при синхронном сканировании, показаны на рисунке 4, а интегральные параметры спектров – в таблице 3.

На рисунках 5 и 6 представлены спектры фотолюминесценции ячменя при возбуждении излучением 284 нм и 424 нм соответственно.



Р и с. 2. Спектральные характеристики люминесценции пшеницы при $\lambda_b = 284$ нм:
1 – здоровой; 2 – зараженной *Fusarium graminearum*; 3 – зараженной *Alternaria alternata*

F i g. 2. Spectral characteristics of wheat luminescence at $\lambda_b = 284$ nm:
1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*



Р и с. 3. Спектральные характеристики люминесценции пшеницы при $\lambda_b = 424$ нм:
1 – здоровой; 2 – зараженной *Fusarium graminearum*; 3 – зараженной *Alternaria alternata*

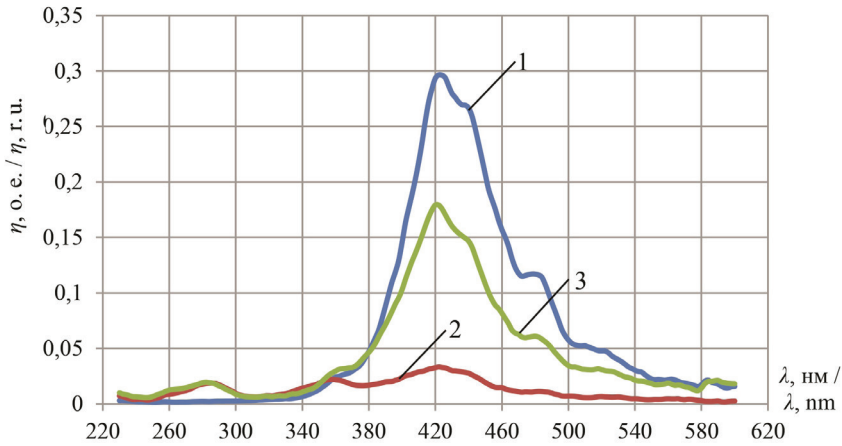
F i g. 3. Spectral characteristics of wheat luminescence at $\lambda_b = 424$ nm:
1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*

Т а б л и ц а 2

Т a b l e 2

Интегральные параметры спектров люминесценции пшеницы
Integral Parameters of Wheat Luminescence Spectra

Вид семян / Type of seed	Φ_{284} , о. е. / Φ_{284} , г. у.	Φ_{362} , о. е. / Φ_{362} , г. у.	Φ_{424} , о. е. / Φ_{424} , г. у.	Φ_{485} , о. е. / Φ_{485} , г. у.
Disease-free / Healthy	0,61	33	43	18
Зараженные <i>Fusarium graminearum</i> / Infected with <i>Fusarium graminearum</i>	3,06	72	30	10
Зараженные <i>Alternaria alternata</i> / Infected with <i>Alternaria alternata</i>	2,19	66	19	9

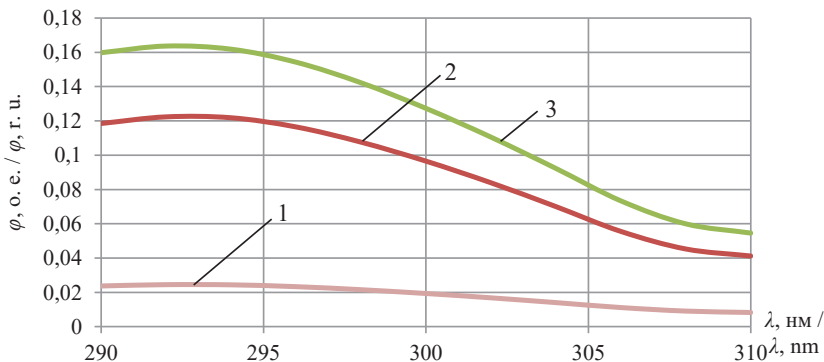


Р и с. 4. Спектральные характеристики возбуждения ячменя:
 1 – здорового; 2 – зараженного *Fusarium graminearum*; 3 – зараженного *Alternaria alternata*
 F i g. 4. Spectral characteristics of barley excitation:
 1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*

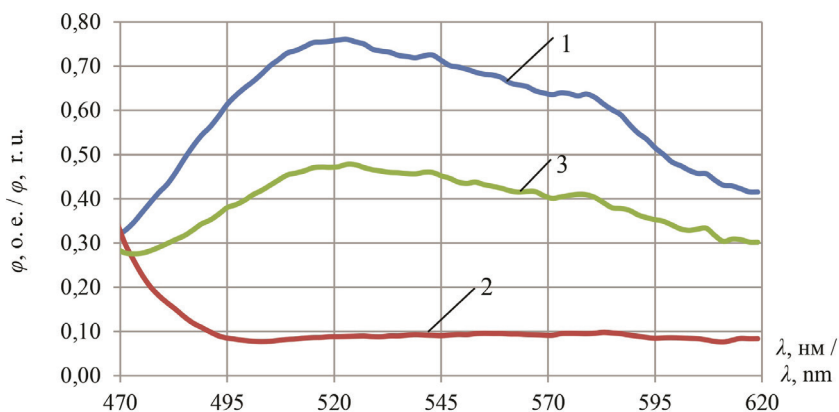
Т а б л и ц а 3
 T a b l e 3

Интегральные параметры спектров возбуждения ячменя
Integral Parameters of the Excitation Spectra of Barley

Вид семян / Type of seed	Н, о. е. (для спектрального диапазона, нм) / Н, r. u. (for the spectral range, nm)			
	230–310	310–380	380–470	470–540
Disease-free / Healthy	0,17	1,04	17,44	4,80
Зараженные <i>Fusarium graminearum</i> / Infected with <i>Fusarium graminearum</i>	0,80	1,00	2,10	0,53
Зараженные <i>Alternaria alternata</i> / Infected with <i>Alternaria alternata</i>	0,92	1,31	10,49	2,76



Р и с. 5. Спектральные характеристики люминесценции ячменя при $\lambda_b = 284$ нм:
 1 – здорового; 2 – зараженного *Fusarium graminearum*; 3 – зараженного *Alternaria alternata*
 F i g. 5. Spectral characteristics of the luminescence of barley at $\lambda_b = 284$ нм:
 1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*



Р и с. 6. Спектральные характеристики люминесценции ячменя при $\lambda_b = 424$ нм: 1 – здорового; 2 – зараженного *Fusarium graminearum*; 3 – зараженного *Alternaria alternata*

F i g. 5. Spectral characteristics of the luminescence of barley at $\lambda_b = 424$ nm: 1 – disease-free; 2 – infected with *Fusarium graminearum*; 3 – infected with *Alternaria alternata*

Интегральные параметры спектров фотолюминесценции ячменя показаны далее в таблице 4.

Т а б л и ц а 4
T a b l e 4

Интегральные параметры спектров люминесценции ячменя
Integral Parameters of Barley Luminescence Spectra

Вид семян / Type of seed	Φ_{284} , о. е. / Φ_{284} , г. у.	Φ_{362} , о. е. / Φ_{362} , г. у.	Φ_{424} , о. е. / Φ_{424} , г. у.	Φ_{485} , о. е. / Φ_{485} , г. у.
Здоровые / Disease-free	0,36	34	89	59
Зараженные <i>Fusarium graminearum</i> / Infected with <i>Fusarium graminearum</i>	1,80	143	14	8
Зараженные <i>Alternaria alternata</i> / Infected with <i>Alternaria alternata</i>	2,39	54	57	34

В таблице 5 представлены статистические параметры спектров возбуждения пшеницы и ячменя.

Т а б л и ц а 5
T a b l e 5

Статистические параметры спектров возбуждения пшеницы и ячменя
Statistical Parameters of the Excitation Spectra of Wheat and Barley

Вид семян / Type of seed	M_2 , нм / M_2 , nm	σ^2	A_s	E_x
1	2	3	4	5
Пшеница здоровая / Disease-free wheat	417	2 897	0,34	$6,99 \cdot 10^5$
Пшеница зараженная <i>Fusarium graminearum</i> / Wheat infected with <i>Fusarium graminearum</i>	411	4 245	-0,13	$2,89 \cdot 10^5$
Пшеница зараженная <i>Alternaria alternata</i> / Wheat infected with <i>Alternaria alternata</i>	401	5 724	-0,11	$2,52 \cdot 10^5$

Окончание табл. 5 / End of table 5

1	2	3	4	5
Ячмень здоровый / Disease-free barley	445	2 379	0,41	$1,30 \cdot 10^6$
Ячмень зараженный <i>Fusarium graminearum</i> / Barley infected with <i>Fusarium graminearum</i>	433	4 263	-0,18	$3,36 \cdot 10^5$
Ячмень зараженный <i>Alternaria alternata</i> / Barley infected with <i>Alternaria alternata</i>	397	6 174	0,07	$2,29 \cdot 10^5$

Обсуждение и заключение. Из рисунков 1 и 4 видна общая тенденция уменьшения спектральной поглощательной способности η при заражении микопатогенами. Однако для пшеницы заражение альтернарией существенно больше снижает поглощающие характеристики и параметры, примерно в 3 раза для $N_{380-470}$ (табл. 1), а для ячменя, наоборот, большее снижение происходит при заражении фузариозом (в 3,8 раза для $N_{380-470}$). В длинноволновой области все спектры сохраняют подобие, а в области 230–310 нм у зараженных семян появляются новые максимумы возбуждения. У пшеницы интегральный параметр $N_{230-310}$ в 2,7–3,2 раза для зараженных семян превышает аналогичный для незараженных, а для ячменя такое превышение составляет 4,7–5,4 раза.

Появление подобных пиков было отмечено исследователями ранее [24], но в более коротковолновой области (около 232 нм), что может быть связано со временем заражения растений с привязкой к фазе созревания семян. Это подтверждает исследование, где отмечалось относительное увеличение доли коротковолнового возбуждения у незрелых семян [25].

Подобная тенденция сохраняется и для спектров фотолюминесценции. При возбуждении излучением с длиной волны $\lambda = 284$ нм спектральные и интегральные характеристики и параметры зараженных семян превышают аналогичные для незараженных. Для пшеницы наибольший поток фотолюминесценции отмечается у семян, пораженных фузариозом, а для семян ячменя – альтернариозом (табл. 2, 4). При возбуждении длинноволновым излучением ($\lambda = 424$ нм и $\lambda = 485$ нм) потоки здоровых семян как пшеницы, так и ячменя превышают потоки зараженных (табл. 2, 4).

Из-за наличия максимумов в коротковолновой области (рис. 1, 4) математическое ожидание для зараженных семян уменьшается, особенно для ячменя инокулированного грибом *Alternaria alternata*. Качественно меняется величина асимметрии: меняется знак и уменьшается абсолютное значение. У зараженных семян эксцесс снижается в 2,4–2,8 раза для пшеницы и в 3,9–5,7 раза для ячменя.

Предположение о законе распределения можно проверить с помощью коэффициентов асимметрии и эксцесса. Выдвинув гипотезу о нормальном распределении зависимостей $\eta_e(\lambda)$ для уровня значимости 0,05 из таблицы 5, мы видим, что нормальными можно считать только спектральные характеристики возбуждения для зараженных семян (по величине асимметрии). По критерию эксцесса все полученные зависимости не подчиняются нормальному закону распределения.

Изменения в спектрах возбуждения и фотолюминесценции могут быть объяснены изменениями структуры и химического состава поверхности зерна, а именно

замещением полисахаридов и белков при поглощении и модификации микокультур *Fusarium* и *Alternaria*. Также из-за влияния на спектры пигментов этого возбудителя (фузариона) и микотоксинов (DON, ZEL, T-2 и NT-2) спектры будут приближаться к спектрам этих веществ.

Таким образом, для объективного контроля заражения семян микотоксинами целесообразно использовать диапазон коротковолновой фотолюминесценции 290–310 нм при возбуждении излучением около 284 нм. Для различения заражения фузариозом и альтернариозом возможно использовать контроль фотолюминесценции в диапазоне 380–410 нм при возбуждении излучением $\lambda = 362$ нм для пшеницы. Для ячменя целесообразно использовать отношение потоков фотолюминесценции при возбуждении 362 и 424 нм. Возбуждение излучением 485 нм использовать малоэффективно из-за сравнительно слабого фотолюминесцентного сигнала.

REFERENCES

1. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital Technologies and Robotic Devices in the Agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6–10. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
2. Zudyte B., Luksiene Z. Visible Light-Activated ZnO Nanoparticles for Microbial Control of Wheat Crop. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2021;219:112206. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112206>
3. Hogg A.C., Johnston R.H., Dyer A.T. Applying Real-Time Quantitative PCR to Fusarium Crown Rot of Wheat. *Plant Disease*. 2007;91(8):1021–1028. <https://doi.org/10.1094/PDIS-91-8-1021>
4. Brown N.A., Evans J., Mead A., Hammond-Kosack K.E. A Spatial Temporal Analysis of the Fusarium Graminearum Transcriptome during Symptomless and Symptomatic Wheat Infection. *Molecular Plant Pathology*. 2017;18(9):1295–1312. <https://doi.org/10.1111/mp.12564>
5. Bollina V., Kumaraswamy G.K., Kushalappa A.C., Choo T.M., Dion Y., Rioux S., et al. Mass Spectrometry-Based Metabolomics Application to Identify Quantitative Resistance-Related Metabolites in Barley Against Fusarium Head Blight. *Molecular Plant Pathology*. 2010;11(6):769–782. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00643.x>
6. Knight N.L., Sutherland M.W. Histopathological Assessment of Wheat Seedling Tissues Infected by Fusarium Pseudograminearum. *Plant Pathology*. 2013;62(3):679–687. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2012.02663.x>
7. Wójtowicz A., Piekarczyk J., Czernecki B., Ratajkiewicz H. A Random Forest Model for the Classification of Wheat and Rye Leaf Rust Symptoms Based on Pure Spectra at Leaf Scale. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2021;223:112278. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112278>
8. Cuba N.I., Torres R., San Román E., Lagorio M.G. Influence of Surface Structure, Pigmentation and Particulate Matter on Plant Reflectance and Fluorescence. *Photochemistry and Photobiology*. 2021;97(1):110–121. <https://doi.org/10.1111/php.13273>
9. Huang W.J., Lu J.J., Ye H.C., Kong W.P., Mortimer A.H., Shi Y. Quantitative Identification of Crop Disease and Nitrogen-Water Stress in Winter Wheat Using Continuous Wavelet Analysis. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018;11(2):145–152. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20181102.3467>
10. Williams P.J., Geladi P., Britz T.J., Manley M. Investigation of Fungal Development in Maize Kernels Using Nir Hyperspectral Imaging and Multivariate Data Analysis. *Journal of Cereal Science*. 2012;55(3):272–278. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.12.003>

11. Yao H., Hruska Z., Kincaid R., Brown R.L., Bhatnagar D., Cleveland T.E. Detecting Maize Inoculated With Toxicigenic and Atoxigenic Fungal Strains with Fluorescence Hyperspectral Imagery. *Biosystems Engineering*. 2013;115(2):125–135. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.03.006>
12. Lu Y., Saeys W., Kim M., Peng Y., Lu R. Hyperspectral Imaging Technology for Quality and Safety Evaluation of Horticultural Products: a Review and Celebration of the Past 20-Year Progress. *Post-harvest Biology and Technology*. 2020;170:111318. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111318>
13. Shurygin B., Chivkunova O., Solovchenko O., Solovchenko A., Dorokhov A., Smirnov I., et al. Comparison of the Non-Invasive Monitoring of Fresh-Cut Lettuce Condition with Imaging Reflectance Hyperspectrometer and Imaging PAM-Fluorimeter. *Photonics*. 2021;8(10):425. <https://doi.org/10.3390/photonics8100425>
14. Sun Z., Hu D., Wang Z., Xie L., Ying Y. Spatial-Frequency Domain Imaging: An Emerging Depth-Varying and Wide-Field Technique for Optical Property Measurement of Biological Tissues. *Photonics*. 2021;8(8):162. <https://doi.org/10.3390/photonics8050162>
15. Platonova G., Štys D., Souček P., Lonhus K., Valenta J., Rychtáriková R. Spectroscopic Approach to Correction and Visualisation of Bright-Field Light Transmission Microscopy Biological Data. *Photonics*. 2021;8(5):333. <https://doi.org/10.3390/photonics8080333>
16. Toro P.M., Jara D.H., Klahn A.H., Villaman D., Fuentealba M., Vega A., et al. Spectroscopic Study of the E/Z Photoisomerization of a New Cyrhetyrenyl Acylhydrazone: A Potential Photoswitch and Photosensitizer. *Photochemistry and Photobiology*. 2021;97(1):61–70. <https://doi.org/10.1111/php.13309>
17. Camuri I.J., da Costa A.B., Ito A.S., Pazin W.M. pH and Charge Effects Behind the Interaction of Artepillin C, the Major Component of Green Propolis, with Amphiphilic Aggregates: Optical Absorption and Fluorescence Spectroscopy Studies. *Photochemistry and Photobiology*. 2019;95(6):1345–1351. <https://doi.org/10.1111/php.13128>
18. Rumfeldt J.A., Takala H., Liukkonen A., Ihalainen J.A. UV-Vis Spectroscopy Reveals a Correlation Between Y263 and BV Protonation States in Bacteriophytochromes. *Photochemistry and Photobiology*. 2019;95:969–979. <https://doi.org/10.1111/php.13095>
19. Gsponer N.S., Rodríguez M.C., Palacios R.E., Chesta C.A. On the Simultaneous Identification and Quantification of Microalgae Populations Based on Fluorometric Techniques. *Photochemistry and Photobiology*. 2018;94:875–880. <https://doi.org/10.1111/php.12936>
20. Kowalski A., Agati G., Grzegorzewska M., Kosson R., Kusznierevicz B., Chmiel T., et al. Valorization of Waste Cabbage Leaves by Postharvest Photochemical Treatments Monitored with a Non-destructive Fluorescence-based Sensor. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2021;222:112263. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112263>
21. Cherney J.H., Digman M.F., Cherney D.J. Handheld NIRS for Forage Evaluation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;190:106469. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106469>
22. Acosta J., Castillo M.S., Hodge G.R. Comparison of Benchtop and Handheld Near-Infrared Spectroscopy Devices to Determine Forage Nutritive Value. *Crop Science*. 2020;60(6):3410–3422. <https://doi.org/10.1002/csc2.20264>
23. Berzaghi P., Cherney J.H., Casler M.D. Prediction Performance of Portable Near Infrared Reflectance Instruments Using Preprocessed Dried, Ground Forage Samples. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;182:106013. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106013>
24. Dorokhov A., Moskovskiy M., Belyakov M., Lavrov A., Khamuev V. Detection of Fusarium Infected Seeds of Cereal Plants by the Fluorescence Method. *PLOS ONE*. 2022;17(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267912>
25. Belyakov M., Sokolova E., Listratenkova V., Ruzanova N., Kashko L. Photoluminescent Control Ripeness of the Seeds of Plants. *E3S Web of Conferences*. 2021;273:01003. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202127301003>

Об авторах:

Беляков Михаил Владимирович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве

ве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: ABB-2684-2020, bmw20100@mail.ru

Московский Максим Николаевич, доктор технических наук, профессор Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории технологий и машин для послеуборочной обработки зерна и семян Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5727-8706>, Researcher ID: L-5153-2017, maxmoskovsky74@yandex.ru

Ефременков Игорь Юрьевич, специалист лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: AGR-5540-2022, matiusharius@mail.ru

Новиков Василий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории технологий и машин для послеуборочной обработки зерна и семян Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3304-1568>, Researcher ID: H-8443-2018, vasiliy1992@gmail.com

Кузнецов Сергей Михайлович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории технологий и машин для послеуборочной обработки зерна и семян Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8378-7085>, Researcher ID: H-9433-2018, kuznetsov.sm.93@gmail.com

Бойко Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и наземного оборудования Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0890-9617>, Researcher ID: ABD-3703-2020, andreyboi@yandex.ru

Михайличенко Станислав Михайлович, доцент кафедры сельскохозяйственных машин Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2305-2909>, Researcher ID: IQW-4878-2023, S.M.Mikhailichenko@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

М. В. Беляков – анализ литературных данных, описание метода и способа предварительной обработки, составление выводов и заключения, доработка текста статьи.

М. Н. Московский – научное руководство, формирование структуры статьи, доработка начального текста, критический анализ.

И. Ю. Ефременков – проведение измерений и расчетов, подготовка начального варианта текста, оформление графического материала.

В. С. Новиков – проведение измерений и расчетов, доработка начального текста.

С. М. Кузнецов – проведение измерений и расчетов, доработка начального текста.

А. А. Бойко – описание методов и способа предварительной обработки.

С. М. Михайличенко – анализ литературных данных, составление выводов и заключения.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 16.10.2023; поступила после рецензирования 10.01.2024;
принята к публикации 25.01.2024*

About the authors:

Mikhail V. Belyakov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry, Federal Scientific Agro-

gineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: ABB-2684-2020, bmw20100@mail.ru

Maksim N. Moskovskiy, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Technologies and Machines for Post-Harvest Processing of Grain and Seeds, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5727-8706>, Researcher ID: L-5153-2017, maxmoskovsky74@yandex.ru

Igor Yu. Efremkov, Specialist of the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: AGR-5540-2022, matiusharius@mail.ru

Vasilij S. Novikov, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Researcher at the Laboratory of Technologies and Machines for Post-harvest Processing of Grain and Seeds, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3304-1568>, Researcher ID: H-8443-2018, vasilij1992@gmail.com

Sergey M. Kuznetsov, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Researcher at the Laboratory of Technologies and Machines for Post-Harvest Processing of Grain and Seeds, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8378-7085>, Researcher ID: H-9433-2018, kuznetsov.sm.93@gmail.com

Andrey A. Boyko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0890-9617>, Researcher ID: ABD-3703-2020, andreyboi@yandex.ru

Stanislav M. Mikhailichenko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Agricultural Machines, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2305-2909>, Researcher ID: IQW-4878-2023, S.M.Mikhailichenko@yandex.ru

Authors contribution:

M. V. Belyakov – analyzing literary data, describing the methods and technique of preliminary processing, editing the text, drawing conclusions, drawing the conclusions.

M. N. Moskovskiy – scientific guidance, forming the structure of the article, revising the initial text, critical analysis.

I. Yu. Efremkov – making measurements and calculations, preparing the initial version of the text and illustrations.

V. S. Novikov – making measurements and calculations, finalizing the initial text.

S. M. Kuznetsov – making measurements and calculations, finalizing the initial text.

A. A. Boyko – describing the methods and technique of preliminary processing.

S. M. Mikhailichenko – analyzing the literary data, drawing the conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 16.10.2023; revised 10.01.2024; accepted 25.01.2024