

EDN: UIZOXV

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-71-78

Научная статья

УДК 628.9.037: 632.4



## Прибор фотолюминесцентного контроля зараженности семян фузариозом

**Максим Николаевич Московский,**  
доктор технических наук,  
главный научный сотрудник,  
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;

**Михаил Владимирович Беляков,**  
доктор технических наук, главный научный  
сотрудник, e-mail: bmw20100@mail.ru;  
**Игорь Юрьевич Ефременков,**  
младший научный сотрудник,  
e-mail: matiusharius@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Болезни растений снижают урожайность сельскохозяйственных культур и могут серьезно повлиять на устойчивость аграрной отрасли. Для контроля и эффективной борьбы болезнями важно их выявлять на раннем этапе. Провели анализ оптических методов и приборов диагностики зараженности растений. *(Цель исследования)* Разработать прибор оптической фотолюминесцентной диагностики заражения семян злаковых растений фузариозом. *(Материалы и методы)* Исследовали зараженные фузариозом семена озимой пшеницы сорта Иришка 172 и ячменя Московский 86. *(Результаты и обсуждение)* В универсальном приборе, измеряющем зараженность пшеницы и ячменя, необходимо иметь три источника излучения с длиной волны 362, 424 и 485 нанометров. Для возбуждения люминесценции на длине волны 362 нанометра наиболее подходит светодиод VLMU3510-365-130, на 424 нанометра – светодиод CREELED424, на 485 нанометра – светодиод XPEBBL-L1. Для регистрации люминесценции семян в диапазонах 390-550 и 510-670 нанометров выбран фотодиод VEMD5510, а в диапазоне 450-600 нанометров – фотодиод BPW21R. Также выбраны микроконтроллер, операционный усилитель, дисплей, клавиатура и другие компоненты. Разработана структурная схема, включающая светооптический и электронный блоки, а также блок питания. При лабораторных испытаниях прототипа прибора «ЛЮМ ВИМ-1» получены зависимости фотосигналов при 362, 424 и 485 нанометрах для семян пшеницы и ячменя различной степени зараженности. Методика определения зараженности фузариозом включает пробоподготовку, возбуждение и регистрацию фотолюминесценции, усиление соотношения фотосигналов и расчет зараженности по градуировочным уравнениям. *(Выводы)* На основе критерия энергоэффективности выбраны источники и приемники излучения для прибора экспресс-контроля степени заражения фузариозом семян пшеницы и ячменя. В ходе лабораторных испытаний подтверждены ранее полученные зависимости потоков фотолюминесценции семян от зараженности и уточнены градуировочные характеристики разработанного прибора.

**Ключевые слова:** семена, заражение, фузариоз, пшеница, ячмень, метод контроля, фотолюминесценция, регрессионные модели, эффективная отдача излучения.

■ **Для цитирования:** Московский М.Н., Беляков М.В., Ефременков И.Ю. Прибор фотолюминесцентного контроля зараженности семян фузариозом // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №4. С. 71-78. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-71-78. EDN: UIZOXV.

Scientific article

## Photoluminescent Device for Monitoring Fusarium Infection in Seeds

**Maxim N. Moskovsky,**  
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,  
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;

**Mikhail V. Belyakov,**  
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,  
e-mail: bmw20100@mail.ru;  
**Igor Yu. Efremenko,**  
junior researcher, e-mail: matiusharius@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Plant diseases reduce crop yields and can significantly undermine the sustainability of the agricultural sector. Early detection is crucial for effective disease control and management. An analysis of optical methods and devices for diagnosing

plant infestations was carried out. (*Research purpose*) To develop a device for optical photoluminescence diagnostics of Fusarium infestation in cereal seeds. (*Materials and methods*) Fusarium-infected seeds of Irishka 172 winter wheat and Moskovsky 86 barley were studied. (*Results and discussion*) A universal device for measuring wheat and barley infestation must be equipped with three radiation sources, operating at wavelengths of 362, 424, and 485 nanometers. The *VLMU3510-365-130* LED is most suitable for exciting luminescence at 362 nanometers, the *CREELED424* LED is optimal for 424 nanometers, and the *XPEBBL-L1* LED is ideal for 485 nanometers. The *VEMD5510* photodiode was chosen to detect seed luminescence in the ranges of 390–550 and 510–670 nanometers, while the *BPW21R* photodiode was selected for the range of 450–600 nanometers. Additionally, a microcontroller, operational amplifier, display, keyboard and other components were also selected. A block diagram was developed that includes incorporating light-optical and electronic units, along with a power supply. During laboratory tests of the LUM VIM-1 device prototype, photosignal responses were observed at 362, 424 and 485 nanometers for wheat and barley seeds with varying infestation levels. The method for determining Fusarium infection includes sample preparation, excitation and detection of photoluminescence, amplification of the photoluminescence signal ratio, and calculation of infection levels using calibration equations. (*Conclusions*) Based on the energy efficiency criterion, radiation sources and receivers were selected for the device used in the express monitoring of Fusarium infection levels in wheat and barley seeds. During laboratory tests, previously obtained dependencies of seed photoluminescence fluxes on infection levels were confirmed, and the calibration characteristics of the developed device were refined.

**Keywords:** seeds, infection, Fusarium, wheat, barley, control method, photoluminescence, regression models, radiation efficiency.

■ **For citation:** Moskovsky M.N., Belyakov M.V., Efremkov I.Yu. Photoluminescent device for monitoring Fusarium infection in seeds. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N4. 71-78 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-4-71-78. EDN: UIZOXV.

Для современного сельского хозяйства необходима оптимизация управления производством путем внедрения новейших технологий и снижения расходов [1]. В связи с этим актуально привлечение современной вычислительной микропроцессорной техники и цифровых технологий [2]. К основным факторам, влияющим на потери урожая, относятся болезни сельскохозяйственных растений. В результате заражения культур снижается их продуктивность, что может серьезно повлиять на устойчивость отрасли. Для производителей растениеводческой продукции важно контролировать, выявлять болезни на раннем этапе и эффективно с ними бороться. Повысить производительность, снизить затраты, обеспечить экологическую безопасность, в том числе путем предотвращения случаев заболеваний растений, возможно за счет создания и внедрения средств автоматизации, роботизации, цифровых технологий, искусственного интеллекта [3].

Оперативность принятия управленческих решений зависит от наличия актуальной информации. Традиционно болезни растений выявляют путем интерпретации визуальных симптомов с последующей лабораторной оценкой [4]. Эти методы требуют навыков и опыта в определении патологии, значительного времени для завершения диагностики, дорогостоящих химических реактивов и оборудования. Развитие технологий машинного зрения и дистанционного зондирования для обнаружения и идентификации больных растений позволяют надежно, точно и быстро оценить болезнь [5].

Технологии зондирования и идентификации основаны на измерении оптических свойств растений

в различных спектральных диапазонах. Методы оптической визуализации *RGB*, мульти- и гиперспектральные датчики, термография или флуоресценция хлорофилла доказали свой потенциал в автоматизированных объективных и воспроизводимых системах идентификации и количественной оценки болезней растений на ранних этапах проявления и распространения [6].

С помощью инфракрасной термографии, визуализации флуоресценции хлорофилла и гиперспектральной визуализации проводили мониторинг фузариозного поражения пшеницы на чешуе колосков. Для категоризации сорного риса из культивируемого использовалась спектроскопия в ближнем инфракрасном диапазоне с приставкой для определения коэффициента отражения [7]. В качестве средства оценки микробного загрязнения и времени хранения листовых зеленых овощей использовали спектральный анализ отражения в ближней инфракрасной области и пропускания (поглощения) в видимой области [8]. Проводился анализ эффективности раннего выявления трех эндемичных для Европы болезней пшеницы – септориоза, ржавчины и пятнистости [9].

Гиперспектральная визуализация используется для обнаружения фузариоза [10]. Гиперспектральные изображения были получены в диапазоне длины волн 400–1000 нм. На основе датчиков спектров отражения разработана автоматизированная система обнаружения и мониторинга миртовой ржавчины [11].

С использованием флуоресценции хлорофилла и гиперспектральной визуализации возможно определить инфицирование пшеницы *Fusarium spec.* [12].

Для обнаружения бурой ржавчины озимой пшеницы разработано оптическое сенсорное устройство, которое возбуждает флуоресценцию хлорофилла на дискретных длинах волн и выявляет индуцированное излучение [13].

Для мониторинга здоровья растений используются дистанционные датчики, как способ неразрушающего контроля и количественной оценки болезней растений на различных уровнях измерения. Применение на различных платформах этих опτικο-электронных датчиков открывает новые возможности для прогнозирования стресса, болезней растений и реагирования на них. Переносные приборы измерения коэффициента отражения в ближней инфракрасной области использованы при оценке кормов на фермах, в том числе прогнозирования уровня сырого протеина, кислотно-детергентной клетчатки и других компонентов [14].

Для анализа распределения содержания хлорофилла в целых листьях было разработано устройство *LeafScanner* на основе светодиодов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, позволяющее получать изображения в данных областях спектра [15]. В этих же целях в диапазоне 400-1000 нм разработан детектор хлорофилла сельскохозяйственных культур на основе оптического сенсора с интерференционным фильтром [16]. Предложена портативная система ближней инфракрасной спектроскопии для быстрого измерения содержания воды в листьях рапса. Для сбора спектров использовали интегрированный спектрометр от 900 до 1700 нм [17].

Показана результативность использования многокритериальной экспресс-аналитической колориметрической установки фотосепарации зерен пшеницы для определения зараженности фузариозом и головней [18].

Вместе с тем недостаточно внимания уделяется люминесцентным методам и приборам определения заражения растений, которые тоже позволяют с высокой чувствительностью, но меньшими затратами диагностировать патологии растений.

**Цель исследования** – разработка прибора оптической фотолюминесцентной диагностики инфицирования фузариозом семян злаковых растений. Для этого необходимо на основе ранее полученных спектральных характеристик установить зависимости люминесцентных потоков от зараженности и разработать методику определения доли пораженных болезнью семян в пробе. Для практической реализации методики выбрать узлы и детали прибора по критерию энергоэффективности.

**Материалы и методы.** В качестве образцов исследованы семена озимой пшеницы сорта Иришка 172 и ячменя сорта Московский 86. Степень зараженности семян определяли по ГОСТ 31646-2012

«Зерновые культуры. Метод определения содержания фузариозных зерен». Кроме того, для определения токсина Т-2 по флуоресценции в длинноволновом ультрафиолетовом свете использовали метод хроматографии (ГОСТ 28001-88 «Зерно фуражное, продукты его переработки, комбикорма. Методы определения микотоксинов: Т-2 токсина, зеаралона (Ф-2) и охратоксина А»).

На основе ранее полученных результатов для длин волн максимумов возбуждения  $\lambda_e$  (362, 424 и 485 нм) измерили спектры люминесценции  $\varphi_l(\lambda)$  и рассчитали интегральные потоки в спектральных диапазонах соответственно 390-550, 450-600, 510-670 нм [19].

Потоки фотолюминесценции  $\Phi$  были рассчитаны с использованием программного пакета *Panorama Pro*:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_l(\lambda) d\lambda, \text{ отн. ед.}, \quad (1)$$

где  $\varphi_l(\lambda)$  – спектральная характеристика фотолюминесценции, отн. ед/нм;  $\lambda_1$ - $\lambda_2$  – границы рабочего спектрального диапазона фотолюминесценции, нм.

Критерием энергоэффективности для выбора источника и приемника излучения была эффективная отдача излучения:

$$k_{\text{эф}} = \frac{\Phi_{\text{эф}}}{\Phi_{\text{полн}}} = \frac{\int_0^\infty \varphi(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \varphi(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

где  $\Phi_{\text{эф}}$  – эффективный поток, отн. ед.;  $\Phi_{\text{полн}}$  – полный поток излучения, отн. ед.;  $S(\lambda)$  – спектральная чувствительность приемника излучения, отн. ед/нм;  $\varphi(\lambda)$  – спектр излучения источника, отн. ед/нм.

**Результаты и обсуждение.** Ранее авторами были получены градуировочные уравнения [20]:

для пшеницы

$$\beta = 287 \frac{\Phi_{362}}{\Phi_{424}} - 137, \quad (3)$$

для ячменя

$$\beta = 245 \frac{\Phi_{362}}{\Phi_{485}} - 57. \quad (4)$$

Коэффициенты детерминации  $R^2$  для уравнений (3) и (4) равны соответственно 0,88 и 0,96.

На основе полученных результатов разработана методика определения степени заражения семян фузариозом, включающая следующие этапы.

1. Подготовка проб, в том числе отбор по ГОСТ 12036-85 «Семена сельскохозяйственных культур. Правила приемки и методы отбора проб». Затем пробы помещают в темную светонепроницаемую камеру.

2. Возбуждение фотолюминесценции в течение 20 мкс последовательно двумя источниками излучения.

3. Люминесценция через  $0,75^{-1}$  мкс регистрируется после выключения источника излучения двумя фотоприемниками.

4. Электрический сигнал (отношение сигналов) с приемников усиливается усилителем, преобразуется в цифровую форму и поступает на микроконтроллер.

5. На микроконтроллере происходит расчет степени заражения с учетом фотосигнала и градуировочных уравнений (3), (4).

6. Результат поступает на выходное индикаторное устройство. По полученным данным принимается решение о возможных дальнейших действиях с семенами.

В универсальном приборе для измерения зараженности пшеницы и ячменя необходимы три источника излучения: 362, 424 и 485 нм. Наиболее предпочтительны светодиоды, имеющие узкий спектр и отличное быстродействие, дающее возможность переключать источники.

Главным численным критерием выбора светодиода является его эффективная отдача ( $k_{\text{эф,сд}}$ ) при возбуждении, определяемая по формуле (2). К другим критериям относятся величина потока излучения и угол свечения. Результаты расчетов эффективной отдачи светодиодов представлены в таблице 1.

| Таблица 1 Table 1                                                                                            |                       |                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ ОТДАЧИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ<br>RESULTS OF CALCULATING THE EFFECTIVE LED RADIATION OUTPUT |                       |                    |
| Длина волны возбуждения, нм                                                                                  | Источник излучения    | $k_{\text{эф,сд}}$ |
| 362                                                                                                          | VLMU3510-365-130      | 0,98               |
|                                                                                                              | NICHIA NCSU276A       | 0,97               |
|                                                                                                              | NICHIA NVSU233B       | 0,97               |
|                                                                                                              | NICHIA NCSU033C       | 0,97               |
| 424                                                                                                          | CREELED424            | 0,95               |
|                                                                                                              | LHUV-0420-0550        | 0,94               |
|                                                                                                              | LZ4-00UA00-00U6       | 0,73               |
| 485                                                                                                          | XPEBBL-LI-0000-00201  | 0,93               |
|                                                                                                              | MLEBLU-AI-0000-000T01 | 0,90               |
|                                                                                                              | LICUBLU100000000      | 0,92               |

Для возбуждения люминесценции при  $\lambda_{\text{в}} = 362$  нм лучше всего подходит светодиод VLMU3510-365-130:  $k_{\text{эф,сд}} = 0,98$  (максимальный из предложенных источников излучения), угол излучения  $\varphi = 160^\circ$ , поток излучения  $\Phi_{\text{эф}} = 0,95$  Вт.

Светодиод CREELED424 самый оптимальный для возбуждения люминесценции на длине волны 424 нм благодаря близкому к единице значению  $k_{\text{эф,сд}}$ , широкому углу излучения и относительно большому потоку  $\Phi_{\text{эф}} = 0,8$  Вт.

Наиболее подходящий для  $\lambda_{\text{в}} = 485$  нм светодиод XPEBBL-LI-0000-00201 из-за высокого  $k_{\text{эф,сд}}$  и потока излучения  $\Phi_{\text{эф}} = 3,5$  Вт. Хотя у данного светодиода угол излучения на  $10^\circ$  меньше, чем у аналогичных излучателей, это не является критичным.

Главным условием выбора приемника излучения также является согласование спектра чувствительности приемника излучения со спектром фотолюминесценции семян, определяемое коэффициентом  $K_{\text{эф}}$ . Кроме того важны интегральная чувствительность и темновой ток. В качестве приемника излучения наиболее оптимальны фотодиоды с высоким быстродействием и малыми габаритными размерами.

Для регистрации люминесценции в диапазонах 390-550, 450-600, 510-670 нм рассматривались несколько фотодиодов по их эффективной отдаче люминесценции (табл. 2).

| Таблица 2 Table 2                                                                                                                        |                    |                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ ОТДАЧИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ<br>для фотодиодов<br>RESULTS OF CALCULATING THE EFFECTIVE LUMINESCENCE OUTPUT<br>FOR PHOTODIODES |                    |                    |
| Диапазон регистрации излучения, нм                                                                                                       | Приемник излучения | $k_{\text{эф,сд}}$ |
| 380-550                                                                                                                                  | VEMD5510CF         | 0,68               |
|                                                                                                                                          | FGAP71             | 0,66               |
|                                                                                                                                          | Hamamatsu S8265    | 0,75               |
|                                                                                                                                          | Hamamatsu S1133    | 0,79               |
| 450-600                                                                                                                                  | Hamamatsu S7686    | 0,49               |
|                                                                                                                                          | BPW21R             | 0,87               |
|                                                                                                                                          | VBPW34S            | 0,26               |
| 510-670                                                                                                                                  | VEMD5510CF         | 0,76               |
|                                                                                                                                          | SFH 2711           | 0,79               |
|                                                                                                                                          | SLD-70 BG2A        | 0,89               |

При использовании фотодиода Hamamatsu S1133 для регистрации люминесценции семян в диапазоне 390-550 нм коэффициент  $K_{\text{эф,фд}} = 0,79$ , т.е. он максимальный. Но для данного диапазона этот фотодиод слишком широкополосный, регистрирует излучение до 730 нм.

По этой причине выбран фотодиод VEMD5510CF ( $K_{\text{эф,фд}} = 0,79$ ), к его преимуществам также относится оптимальный диапазон регистрации потока. Но значение темнового тока составляет  $2 \cdot 10^5$  фА, т.е. максимальное из всех предложенных приемников для  $\lambda_{\text{в}} = 362$  нм, и в дальнейшем может негативно повлиять на измерения низкой интенсивности излучения люминесценции. Длина волны наибольшей чувствительности составляет 540 нм, а пики полученных спектральных характеристик люминесценции при  $\lambda_{\text{в}} = 362$  нм находятся в диапазоне 450-480 нм, чувствительность  $S = 0,2$  А/Вт. Следовательно, поток фотолюминесценции должен быть достаточно мощным, чтобы в дальнейшем его мог зарегистрировать данный фотодиод (<https://www.vishay.com/docs/84387/vemd5510cf.pdf>; accessed: 2023-01-09).

Для регистрации люминесценции в пределах 450–600 нм оптимальным по спектральному диапазону и коэффициенту эффективной отдачи люминесценции является *BPW21R* (<https://doc.platan.ru/pdf/datasheets/vishay/81519.pdf>; accessed: 2023-01-09). Его чувствительность  $S = 0,009$  А/Вт, а величина темнового тока составляет  $2 \cdot 10^7$  фА.

Значения  $K_{\text{эф,ФД}}$  наибольшие у фотодиода *SLD-70 BG2A*, но достаточно широкий диапазон делает его не самым лучшим для спектра волн 510–670 нм, поэтому выберем фотодиод *VEMD5510CF* (<https://www.vishay.com/docs/84387/vemd5510cf.pdf>; accessed: 2023-01-09).

Для предотвращения перекрытия диапазонов излучения источника и чувствительности приемника в предлагаемых пределах регистрации люминесценции использование задержки измерений является обязательным. Время между облучением семян и регистрацией потока фотолюминесценции должно быть близко к 0,75–1 мкс.

В качестве микроконтроллера решено использовать *ATmega328P*, а в качестве операционного усилителя *AD820ANZ*. Для устройства визуализации выбран экран *LCD 2004 с I2C*. Экран способен отображать одновременно до 80 символов (20 столбцов и 4 строки), что достаточно для вывода названия сельскохозяйственной культуры, сигнала с фотодиодов, уравнений регрессии, а также итогового значения заражения  $\beta$  (%).

Ввод данных осуществляется клавиатурой через обращение к операциям, проводимым в процессоре и отображаемым на экране. Клавиатура выполнена в виде матрицы 4×4, каждая кнопка является областью воздушного зазора между двумя диэлектрическими слоями с нанесенными на них токопроводящими покрытиями.

Потребляемая мощность составляет 11266 мВт, потребляемый ток 2686 мА не должен превышать ток нагрузки источника напряжения.

Питание прибора будет осуществляться от трех литий-ионных аккумуляторов, соединенных последовательно.

Для реализации методики определения степени заражения фузариозом разработана структурная схема прибора (рис. 1). Условно схему можно разделить на блоки: светооптический, электронный и блок питания.

**Светооптический блок** включает в себя три балластных резистора, три светодиода с разной длиной волны излучения, три фотодиода с разным спектральным диапазоном, а также три операционных усилителя сигнала с фотодиодов и передачи на микроконтроллер.

**Электронный блок** состоит из микроконтроллера с подключенным к нему дисплеем.

В **блок питания** входит источник питания с тремя подключенными последовательно аккумуляторами суммарным напряжением при максимальном

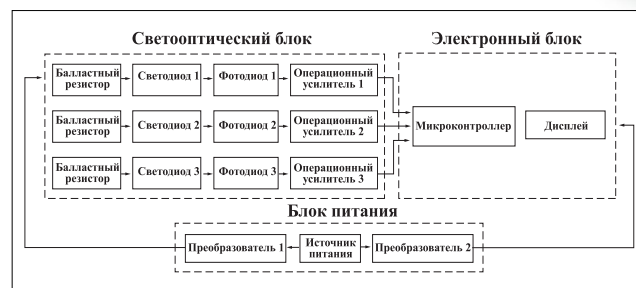


Рис. 1. Обобщенная структурная схема прибора для определения степени заражения семян

Fig. 1. Generalized block diagram of the device for determining seed infection levels

заряде 12,6 В и с двумя *DC-DC* преобразователями. Преобразователь 1 уменьшает напряжение питания до 5 В и подает на светооптический блок, преобразователь 2 уменьшает напряжение питания до 9 В и подает его на электронный блок.

Конструктивно корпус будет состоять из нескольких блоков, изготовленных при помощи 3D-принтеров из *ABS*-пластика на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Благодаря свойствам этих компонентов возможно создавать ударопрочные, термостойкие изделия.

Светооптический блок состоит из трех частей:

- светонепроницаемого черного контейнера в виде куба с закругленными гранями и прямоугольным вырезом для резервуара с семенами;

- черной измерительной камеры для исследуемых семян с ручкой для удобного извлечения;

- шести шарниров (для трех источников и приемников) с регулировкой по вертикали и горизонтали с целью получения максимального сигнала люминесценции семян.

Соединительная часть совместно с верхней образуют электронный блок. В верхней части предусмотрены отверстия для дисплея, кнопки выключения и выдавленная область под клавиатуру 4×4. Общая 3D-модель корпуса и внешний вид прототипа прибора представлены на рисунке 2.

При лабораторных испытаниях прототипа прибора (рабочее название «ЛЮМ ВИМ-1») были измерены фотонапряжения  $U_{\text{ф,362}}$ ,  $U_{\text{ф,424}}$ ,  $U_{\text{ф,485}}$  для фотолюминесценции семян пшеницы и ячменя различной зараженности  $\beta$ .

При этом фотосигналы

$$U_{\text{ф}} = U - U_{\text{т}}, \quad (5)$$

где  $U$  – общее напряжение на фотодиоде;  $U_{\text{т}}$  – темновое напряжение;

$$U_{\text{ф}} = S_{\text{У}} \cdot \Phi, \quad (6)$$

где  $S_{\text{У}}$  – вольтовая чувствительность фотодиода.

Отличие градуировочных уравнений  $\Phi(\beta)$  от показаний прибора  $U(\beta)$  объясняется темновым на-



Рис. 2. 3D-модель корпуса (слева) и внешний вид прототипа оптического устройства экспресс-диагностики заражения семян фузариозом (справа)

Fig. 2. 3D model of the case (left) and the prototype of the optical device for rapid diagnosis of Fusarium infected seed (right)

пряжением и чувствительностью фотодиодов. Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 3.

Сравнивая зависимости (3) и (4) с результатами в таблице 3, можно отметить, что для семян пшеницы при увеличении зараженности фотонапряжение  $U_{\phi,362}$  растет, хотя значение его невелико. Фотосигнал  $U_{\phi,424}$  незначительно растет, фотосигнал  $U_{\phi,485}$  изменяется несистемно. Результаты испытаний семян ячменя гораздо лучше совпадают с ранее полученными по формуле (4). Сохраняется тенденция роста  $U_{\phi,362}$  и снижения  $U_{\phi,485}$  при увеличении зараженности. Сигнал  $U_{\phi,424}$  изменяется несистемно. С учетом результатов лабораторных испытаний формулы (3) и (4) могут быть записаны в виде:

для пшеницы

$$\beta = 12746 \frac{U_{\phi,362}}{U_{\phi,424}} - 50, \quad (7)$$

для ячменя

$$\beta = 7035 \frac{U_{\phi,362}}{U_{\phi,485}} - 22. \quad (8)$$

| Таблица 3                                                                                                                               |             | Table 3             |                     |                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ<br>ПРОТОТИПА ПРИБОРА «ЛЮМ ВИМ-1»<br>RESULTS OF LABORATORY TESTS<br>FOR THE LUM VIM-1 DEVICE PROTOTYPE |             |                     |                     |                     |
| Культура                                                                                                                                | $\beta$ , % | $U_{\phi,362}$ , мВ | $U_{\phi,424}$ , мВ | $U_{\phi,485}$ , мВ |
| Пшеница                                                                                                                                 | 0           | 4,89                | 968                 | 166                 |
|                                                                                                                                         | 25          | 4,89                | 987                 | 406                 |
|                                                                                                                                         | 50          | 9,78                | 997                 | 386                 |
|                                                                                                                                         | 75          | 9,78                | 982                 | 694                 |
|                                                                                                                                         | 100         | 9,78                | 1036                | 313                 |
| Ячмень                                                                                                                                  | 0           | 4,89                | 880                 | 1457                |
|                                                                                                                                         | 25          | 9,78                | 865                 | 1320                |
|                                                                                                                                         | 50          | 14,66               | 934                 | 1329                |
|                                                                                                                                         | 75          | 14,66               | 938                 | 1325                |
|                                                                                                                                         | 100         | 19,55               | 943                 | 1085                |

Коэффициенты детерминации 0,71 и 0,93 соответственно. Сравнительно малый сигнал с первого фотодиода стал причиной снижения коэффициента детерминации для семян пшеницы и в меньшей степени для ячменя.

### Выводы

Методика определения зараженности семян фузариозом включает: пробоподготовку, возбуждение и регистрацию фотолюминесценции в спектральных диапазонах 390-550, 450-600 и 510-670 нм, усиление соотношения фотосигналов и расчет зараженности на основе градуировочных уравнений.

На основе критерия энергоэффективности (эфф-фективной отдачи излучения  $k_{эф}$ ) выбраны источники и приемники излучения для прибора экспресс-контроля степени заражения фузариозом на примере семян пшеницы и ячменя.

В лабораторных испытаниях в целом подтверждены ранее полученные зависимости потоков фотолюминесценции от зараженности и уточнены градуировочные характеристики разработанного прибора.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К. и др. Оптимизация управления технологическими процессами в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 4-11. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
- Альт В.В., Исакова С.П. Планирование производства продукции растениеводства с применением цифровых технологий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N3. С. 12-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-12-19.
- Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
- Alemu K. Detection of diseases, identification and diversity of viruses: A review. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. 2015. N5(1). 132-141.
- Mohd Ali M., Bachik N.A., Muhadi N.A. et al. Non-destructive techniques of detecting plant diseases: A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2019. 108. 101426. DOI: 10.1016/j.pmp.2019.101426.
- Mahlein A.-K., Alisaac E., Al Masri A. et al. Comparison and combination of thermal, fluorescence, and hyperspectral imaging for monitoring Fusarium head blight of wheat on spikelet scale. *Sensors*. 2019. N19(10). 2281. DOI: 10.3390/s19102281.

7. Makmuang S., Nootchanat S., Ekgsat S., Wongravee K. Non-destructive method for discrimination of weedy rice using near infrared spectroscopy and modified Self-Organizing Maps (SOMs). *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. 191. 106522. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106522.
8. Tsakanikas P., Fengou L.-C., Manthou E. et al. A unified spectra analysis workflow for the assessment of microbial contamination of ready-to-eat green salads: Comparative study and application of non-invasive sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N155. 212-219. DOI: 10.1016/j.compag.2018.10.025.
9. Johannes A., Picon A., Alvarez-Gila A. et al. Automatic plant disease diagnosis using mobile capture devices, applied on a wheat use case. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. N138. 200-209. DOI: 10.1016/j.compag.2017.04.013.
10. Zhang D.-Y., Chen G., Yin X. et al. Integrating spectral and image data to detect Fusarium head blight of wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. N175. 105588. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105588.
11. Heim R.H.J., Wright I.J., Chang H.C. et al. Detecting myrtle rust (*Austropucciniopsis*) on lemon myrtle trees using spectral signatures and machine learning. *Plant Pathology*. 2018. N67(5). 1114-1121. DOI: 10.1111/ppa.12830.
12. Bauriegel E., Herppich W.B. Hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging for early detection of plant diseases, with special reference to Fusarium spec. infections on wheat. *Agriculture*. 2014. 4(1). 32-57. DOI: 10.3390/AGRICULTURE4010032.
13. Tischler Y.K., Thiessen E., Hartung E. Early optical detection of infection with brown rust in winter wheat by chlorophyll fluorescence excitation spectra. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N146. 77-85. DOI: 10.3389/fpls.2019.01239.
14. 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. N182. 106013. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106013.
15. Zhang L., Wang L., Wang J. et al. Leaf Scanner: A portable and low-cost multispectral corn leaf scanning device for precise phenotyping. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N167. 105069. DOI: 10.1016/j.compag.2019.105069.
16. Song D., Qiao L., Gao D. et al. Development of crop chlorophyll detector based on a type of interference filter optical sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. 187. 106260. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106260.
17. Zhou L., Zhang C., Taha M.F. et al. Determination of leaf water content with a portable NIRS system based on deep learning and information fusion analysis. *Transactions of the ASABE*. 2021. N64(1). 127-135. DOI: 10.13031/trans.13989.
18. Лебедев Д.В., Рожков Е.А. Отсортровка по цвету зараженных фузариозом и головней семян пшеницы в многокритериальном фотоэлектронном сепараторе // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N 4(37). С. 25-29.
19. Bashilov A.M., Efremkov I.Y., Belyakov M.V. et al. Determination of main spectral and luminescent characteristics of winter wheat seeds infected with pathogenic microflora. *Photonics*. 2021. N8. 494. DOI: 10.3390/photonics8110494.
20. Moskovskiy M.N., Belyakov M.V., Dorokhov A.S. et al. Design of device for optical luminescent diagnostic of the seeds infected by *Fusarium*. *Agriculture*. 2023. N13(3). 619. DOI: 10.3390/agriculture13030619.

## REFERENCES

1. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Khoroshenkov V.K. et al. Optimization of technological process control in crop production *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N3. 4-11 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
2. Alt V.V., Isakova S.P. Crop production planning using digital technologies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022. Vol. 16. N3. 12-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-12-19.
3. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. N15(4). 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
4. Alemu K. Detection of diseases, identification and diversity of viruses: A review. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. 2015. N5(1) 132-141 (In English).
5. Mohd Ali M., Bachik N.A., Muhadi N.A. et al. Non-destructive techniques of detecting plant diseases: A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2019. 108. 101426 (In English). DOI: 10.1016/j.pmpp.2019.101426.
6. Mahlein A.-K., Alisaac E., Al Masri A. et al. Comparison and combination of thermal, fluorescence, and hyperspectral imaging for monitoring Fusarium head blight of wheat on spikelet scale. *Sensors*. 2019. N19(10). 2281 (In English). DOI: 10.3390/s19102281.
7. Makmuang S., Nootchanat S., Ekgsat S., Wongravee K. Non-destructive method for discrimination of weedy rice using near infrared spectroscopy and modified Self-Organizing Maps (SOMs). *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. N191. 106522 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2021.106522.
8. Tsakanikas P., Fengou L.-C., Manthou E. et al. A unified spectra analysis workflow for the assessment of microbial contamination of ready-to-eat green salads: Comparative study and application of non-invasive sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N155. 212-219 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2018.10.025.
9. Johannes A., Picon A., Alvarez-Gila A. et al. Automatic

- plant disease diagnosis using mobile capture devices, applied on a wheat use case. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. 138. 200-209 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2017.04.013.
10. Zhang D.-Y., Chen G., Yin X. et al. Integrating spectral and image data to detect Fusarium head blight of wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. N175. 105588 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2020.105588.
  11. Heim R.H.J., Wright I.J., Chang H.C. et al. Detecting myrtle rust (*Austropuccinia psidii*) on lemon myrtle trees using spectral signatures and machine learning. *Plant Pathology*. 2018. N67(5). 1114-1121 (In English). DOI: 10.1111/ppa.12830.
  12. Bauriegel E., Herppich W.B. Hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging for early detection of plant diseases, with special reference to Fusarium spec. infections on wheat. *Agriculture*. 2014. N4(1). 32-57 (In English). DOI: 10.3390/AGRICULTURE4010032.
  13. Tischler Y.K., Thiessen E., Hartung E. Early optical detection of infection with brown rust in winter wheat by chlorophyll fluorescence excitation spectra. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N146. 77-85 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2019.01239.
  14. 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. N182. 106013 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2021.106013.
  15. Zhang L., Wang L., Wang J. et al. Leaf Scanner: a portable and low-cost multispectral corn leaf scanning device for precise phenotyping. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N167. 105069 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2019.105069.
  16. Song D., Qiao L., Gao D. et al. Development of crop chlorophyll detector based on a type of interference filter optical sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. N187. 106260 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2021.106260.
  17. Zhou L., Zhang C., Taha M.F. et al. Determination of leaf water content with a portable NIRS system based on deep learning and information fusion analysis. *Transactions of the ASABE*. 2021. N64(1). 127-135 (In English). DOI: 10.13031/trans.13989.
  18. Lebedev D.V., Rozhkov E.A. Sorting by color of wheat seeds infected with fusarium and smut in a multicriteria photoelectronic separator. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2019. N 4(37). 25-29 (In Russian).
  19. Bashilov A.M., Efremkov I.Y., Belyakov M.V. et al. Determination of main spectral and luminescent characteristics of winter wheat seeds infected with pathogenic microflora. *Photonics*. 2021. N8. 494 (In English). DOI: 10.3390/photonics8110494.
  20. Moskovskiy M.N., Belyakov M.V., Dorokhov A.S. et al. Design of device for optical luminescent diagnostic of the seeds infected by Fusarium. *Agriculture*. 2023. N13(3). 619 (In English). DOI: 10.3390/agriculture13030619.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Московский М.Н. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок;  
Беляков М.В. – формулирование основных направлений исследования, обзор литературы, обработка результатов исследований, доработка текста, формирование общих выводов;  
Ефремов И.Ю. – получение исследуемых образцов, проведение измерений и расчетов, обработка результатов, визуализация.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Moskovsky M.N. – scientific supervision, formulation of the main research directions, development of theoretical premises.  
Belyakov M.V. – formulation of the main research directions, literature review, processing of research results, refinement of the manuscript, formulation of general conclusions.  
Efremkov I.Yu. – obtaining the samples under study, conducting measurements and calculations, processing research results, visualization.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
The paper was accepted for publication on

28.08.2024  
25.10.2024