Аграрный научный журнал. 2025. № 6. С. 92–97
Agrarian Scientific Journal. 2025;(6):92–97

АГРОИНЖЕНЕРИЯ
4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Научная статья
УДК 631.362.36
https://doi.org/10.28983/asj.y2025i6pp92-97

Обоснование критериев зараженности фузариозом зерна при фотолюминесцентной сортировке

Михаил Владимирович Беляков
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия
e-mail: bmw20100@mail.ru

Аннотация. Предложены числовые критерии зараженности фузариозом зерна пшеницы, овса и ячменя при фотолюминесцентной сортировке. Результаты лабораторных исследований параметров фотолюминесценции зерновых растений в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазоне устанавливают следующие границы критерия разделения партии по наличию заражения фузариозом при длинах волн возбуждения 362 нм; 424 нм и 485нм: для пшеницы $Ф_{362}/Ф_{424} < 0{,}580$, для ячменя $Ф_{362}/Ф_{485} < 0{,}345$, для овса $Ф_{424}/Ф_{362} < 2{,}404$. Идентификация на других длинах волн возбуждения не гарантирует полноценной сепарации зерна по наличию заражения или ее техническую реализацию.

Ключевые слова: сортировка зерна, пшеница, ячмень, овес, фотолюминесценция, фузариоз

Для цитирования: Беляков М. В. Обоснование критериев зараженности фузариозом зерна при фотолюминесцентной сортировке // Аграрный научный журнал. 2025. № 6. С. 92–97. https://doi.org/10.28983/asj.y2025i6pp92-97/

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Substantiation of criteria for fusariosis contamination of grain during photoluminescent sorting

Mikhail V. Belyakov
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
e-mail: bmw20100@mail.ru

Abstract. Numerical criteria for fusariosis contamination of wheat, oat and barley grains during photoluminescent sorting are proposed. The results of laboratory studies of the photoluminescence parameters of grain plants in the visible and near ultraviolet range establish the following boundaries of the batch separation criterion for the presence of fusariosis contamination at excitation wavelengths of 362 nm; 424 nm and 485 nm: for wheat $F_{362}/F_{424} < 0.580$, for barley $F_{362}/F_{485} < 0.345$, for oat $F_{424}/F_{362} < 2.404$. Identification at other excitation wavelengths does not provide a sufficiently clear separation of the grain by the presence of contamination or its technical implementation.

Keywords: grain sorting, wheat, barley, oat, photoluminescence, fusarium

For citation: Belyakov M. V. Substantiation of criteria for fusariosis contamination of grain during photoluminescent sorting. A*grarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2025;(6):92–97. (In Russ.). https://doi.org/10.28983/asj.y2025i6pp92-97.

Введение. Применение цифровых технологий, автоматизированных комплексов, средств искусственного интеллекта дает возможность значительно увеличить эффективность агропромышленной отрасли [2]. Увеличение спроса на качественные продукты питания, их результативное производст-

© Беляков М. В., 2025

во и хранение вызвано как ростом численности населения, так и наличием болезней, поражающих запасы продукции. Это порождает необходимость создания и развития технологий хранения сельскохозяйственной продукции, а также мониторинга заражения. Изучение свойств, в том числе оптических, зараженного зерна имеет важное значение для прогнозирования потерь урожая, проведения обследования на наличие болезней, установления пороговых значений при принятии решений о дальнейших действиях по предотвращению негативных факторов и др.

Инфекции зерновых растений *Fusarium* spp. являются серьезной проблемой во всем мире из-за микотоксинов, потенциально продуцируемых этими грибами. Это обусловило потребность в разработке инструментов для раннего выявления инфекций. До этого для определения степени заражения использовали визуальную оценку, однако она субъективна и зачастую неточна на ранних стадиях. Она осуществляется вручную путем оценки формы зерна, цвета и блеска его поверхности, стекловидности и консистенции эндосперма, окраски зародыша и т.д.

Лабораторные методы таких недостатков не имеют, у них достаточно высокая точность и воспроизводимость, однако большие временные и экономические затраты также не делают их оптимальными для прогнозирования заражения пищевой продукции. Для диагностики поражения фузариозом используют микологический анализ, иммуноферментный анализ, полимеразную цепную реакцию в реальном времени [7] и количественную цифровую полимеразную цепную реакцию, определение с помощью маркеров на основе межгенных спейсеров [11]. Общими недостатками данных методов являются высокая стоимость приборов и расходных материалов, сравнительно долгое время анализа (до нескольких дней) и повышенные требования к квалификации обслуживающего персонала.

Альтернативным методом является получение и обработка изображений с использованием фотоэлектронных приемников излучения, чувствительных в диапазоне 380–770 нм, а также широкоспектральных и многодиапазонных матриц приемников [4]. Разработанные на их основе методики позволяют адекватно диагностировать заболевание, но могут быть усовершенствованы для широкого применения непосредственно в местах выращивания, хранения и переработки зерна. Вышеуказанные методики и реализующие их приборы особенно перспективны в сочетании с нейронными сетями для дальнейшей автоматизации измерений [5].

Если для камер видимого изображения заявлена разрешающая способность в несколько мегапикселей, то многодиапазонные матрицы имеют лучшие параметры качества [9]. Гиперспектральные и мультиспектральные приемники излучения детектируют строго определенные области спектра в сочетании с хорошей разрешающей способностью. Спектральный диапазон 400–2500 нм является информативным для изучения растительных биообъектов, в том числе в состоянии стресса. В нем могут быть получены области сепарации по различным признакам. Для диагностики также могут применяться коротковолновый диапазон (200–400 нм) [8] и диапазон свыше 2,5 мкм [10]. Приборы подобного рода классифицируются по разрешающей способности, используемому фотоприемнику и ценовой категории. Вместе с тем требования простоты и низкой стоимости противоречат таким параметрам качества, как ширина анализируемого спектра, разрешающая способность и объем обрабатываемых данных [9]. Например, среди недостатков приборов с широкодиапазонными приемниками можно отметить сложность, большие габаритные размеры, сравнительно высокую продолжительность измерений и высокую чувствительность к изменению условий детектирования сигнала. Все подобные приборы и комплексы состоят из источника и приемника оптического излучения, усилителя и системы управления измерением, хранением и обработкой полученных фотосигналов [13].

Другими способами оптической диагностики растительных патологий являются использование тепловизионного контроля собственного излучения зерна в инфракрасном диапазоне (8–13 мкм), а также флуоресценции хлорофилла.

Высоким потенциалом также обладают фотолюминесцентные методы диагностики в ультрафиолетовом (200–380 нм) и видимом спектральных диапазонах. Они, как и другие оптические методы, являются высокоточными, селективными, экспрессными, а также дистанционными и неразрушающими. Более того, они имеют более низкие показатели экономических затрат по сравнению с предыдущими методами. Среди прочих достоинств – простота и безопасность эксплуатации приборов для их реализации, минимум субъективных факторов и возможность интеграции в действующие современные сельскохозяйственные машины и аппараты.

Сортировка зерна, в том числе оптическая (например, фотосепарация), применяется для удаления внешних примесей, а также щуплого, битого и поврежденного зерна. Для получения семенного материала требуемого качества проводят сортировку (фракционирование) по таким признакам. как: 1) геометрические размеры (длина, ширина, толщина); 2) плотность или масса; 3) колориметрические свойства (цвет, интегральная и спектральная отражательная способность); 4) аэродинамические свойства. Как правило, в современных сельскохозяйственных машинах функции сортировки и очистки зерна совмещаются. Примером является серия фотосепараторов SmartSort (Барнаул) [1]. Принцип их работы основан на анализе спектра отраженного излучения, т.е. измерении цвета.

Технологический процесс сортировки семян должен на выходе обеспечивать запас незараженного зерна, пригодного для переработки и употребления в пищу, либо для посева и хранения.

Целью данного исследования является выработка числовых критериев зараженности фузариозом зерна пшеницы, овса и ячменя при фотолюминесцентной сортировке.

Материалы и методы. Исследования проводили на достаточно распространенной и опасной для людей болезни – фузариозе, возбудителями которого являются грибки рода *Fusarium*. В качестве биоматериала использовали семена озимой пшеницы Иришка 172, ячменя Московский 86 и овса Залп.

В исследуемых зернах определяли степень поражения семян р. *Fusarium*. Исследования проводили в Федеральном центре оценки безопасности и качества зерна и продуктов их переработки Федеральной службой по ветеринарному и фитосанитарному надзору. Масса пробы 3,2 кг. Определение фузариозных зерен выполняли по ГОСТ 31646-2012. Используемое оборудование: хроматограф жидкостный Prominence со спектроскопическим детектором SPD-M20A, спектрофлуориметрический детектор RF-20AXS. Степень поражения семян составила 98 %.

Исследование люминесценции проводили на аппаратно-программном комплексе, состоящем из многофункционального спектрофлуориметра «Флюорат-02-Панорама», компьютера с установленным программным обеспечением Panorama Pro и внешней камеры для исследуемых образцов. Измерение спектров возбуждения и фотолюминесценции проводили аналогично ранее проведенным измерениям [9]. Статистическую обработку полученных результатов проводили по общепринятой методике.

Результаты исследований. В основу работы предлагаемой схемы сепарации положен принцип разделения зерна по его фотолюминесцентным свойствам. В работе [3] показано, что эффективность анализа качества семян возрастает в силу неинвазивного характера воздействия и оперативности анализа.

При разработке методики сортировки зерна целесообразным представляется использование двух длин волн возбуждения и, соответственно, регистрацию двух потоков фотолюминесценции. В качестве критерия идентификации единичного семени (здоровое/зараженное) необходимо использовать отношение потоков фотолюминесценции. Это позволит избежать необходимости градуировки для каждой партии сортируемого зерна. Желательно, чтобы для одной длины волны возбуждения поток люминесценции заметно изменялся при заражении, а для второй – изменялся в обратную сторону, либо оставался неизменным, а в наименее предпочтительном варианте изменялся существенно меньше.

Ранее определили спектры поглощения (возбуждения) и на их основе спектральные характеристики фотолюминесценции здоровых и зараженных фузариозом зернах пшеницы, ячменя и овса [8]. Установили информативные диапазоны регистрации фотолюминесцентного свечения при возбуждении излучением длин волн $\lambda = 232$ нм, $\lambda = 362$ нм, $\lambda = 424$ нм и $\lambda = 485$нм. Рассчитали интегральные потоки Φ_λ для 250 зараженных и здоровых зерен пшеницы, ячменя и овса. Результаты расчетов потоков и доверительных интервалов для надежности $\alpha = 0{,}95$ представлены в таблице.

Из таблицы следует, что относительная погрешность измерений ε при $\alpha = 0{,}95$ не превышает 11 %.

На рисунках 1 и 2 в качестве наглядного примера представили гистограммы распределения количества образцов зерен пшеницы по интервалу интегральных потоков Φ_{362} и Φ_{424}.

Из гистограммы рисунка 1 следует, что большинство здоровых зерен находятся в диапазоне 100–400 о.е. – 166 образцов (в 2,3 раза больше, чем зараженных), а зараженных в диапазоне 401–800 о.е. – 147 образцов (в 2,3 раза больше, чем здоровых). В интервалах 801–1200 и 1201–1600 о.е. находится сравнительно малое количество образцов, при этом количество зараженных в 1,5–3,5 раза превосходит количество здоровых.

Из гистограммы рисунка 2 следует, что 315 семян укладываются в диапазон 451–900 о.е., данное количество составляет 63 % от общего числа образцов. На остальных интервалах образцов значительно меньше, а соотношение здоровых и зараженных зерен примерно одинаковое.

Интегральные параметры спектров люминесценции здоровых и зараженных семян пшеницы, ячменя и овса

Integral parameters of luminescence spectra of healthy and contaminated wheat, barley and oat seeds

Зерно	$Ф_{232}$, о.е.	$Ф_{362}$, о.е.	$Ф_{424}$, о.е.	$Ф_{485}$, о.е.
Пшеница				
здоровое	36±4	387±28	833±53	501±26
зараженное	95±8	556±31	746±32	545±21
Ячмень				
здоровое	21±2	152±8	653±23	694±24
зараженное	66±5	386±18	870±34	633±25
Овес				
здоровое	21±2	586±23	1312±43	652±19
зараженное	36±4	641±37	1706±76	745±23

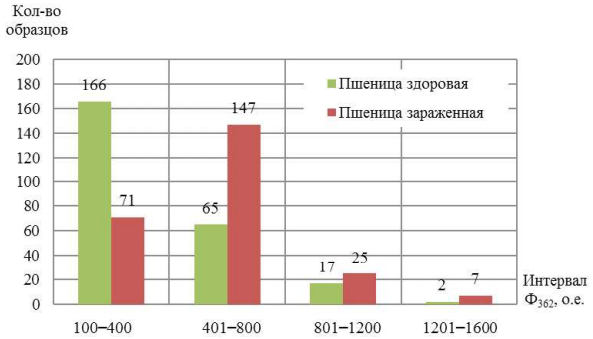

Рисунок 1 – Гистограмма распределения количества образцов зерен пшеницы по интервалам интегральных параметров для $Ф_{362}$

Figure 1 – Histogram of the distribution of the number of wheat grain samples over the intervals of integral parameters for F_{362}

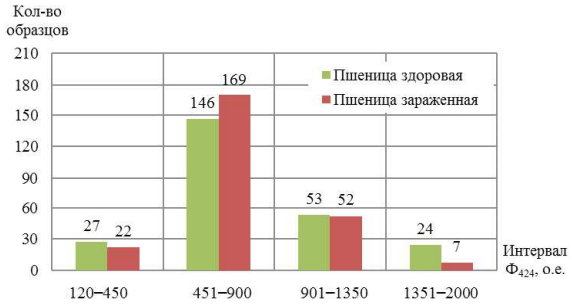

Рисунок 2 – Гистограмма распределения количества образцов зерен пшеницы по интервалам интегральных параметров для $Ф_{424}$

Figure 2 – Histogram of the distribution of the number of wheat grain samples over the intervals of integral parameters for F_{424}

Значительные изменения потоков фотолюминесценции происходят при возбуждении ультрафиолетовым излучением 232 нм, но его использованию препятствуют два крайне важных фактора. Во-первых, источник столь коротковолнового излучения достаточно дорог, наименее распространен. Кроме того, до сих пор идут споры о медицинских аспектах безопасности применения такого излучения. Во-вторых, абсолютные значения потоков $Ф_{232}$ в 5–62 раза меньше, чем потоки при более длинноволновых возбуждениях. Для малых сигналов фотолюминесценции это может быть критичным при их детектировании и последующей идентификации зерна. Поэтому из анализа данных таблицы представляется наиболее целесообразным использование следующих отношений потоков: для зерна пшеницы – $Ф_{362}/Ф_{424}$, для зерна ячменя – $Ф_{362}/Ф_{485}$, для зерна овса – $Ф_{424}/Ф_{362}$. Для данных потоков относительная погрешность не превышает 7 %.

По итогам сепарации получают четыре группы зерен: I – здоровые, II – сомнительные, III – зараженные, IV – зерна, не удовлетворяющие никаким критериям, сюда могут входить некондиционные зерна и посторонние объекты. Результаты для зерна пшеницы устанавливают

следующие границы критерия разделения партии по наличию заражения фузариозом при длинах волн возбуждения 362 нм и 424 нм: группа I (0,405–0,532), группа II (0,532–0,675), группа III (0,675–0,822). Вариативности колебаний отношений потоков отличаются незначительно: группа I (0,127), группа II (0,143), группа III (0,147).

При определении более четкой границы для сепарации зерна на здоровое и зараженное возможны нижеприведенные подходы.

Разделить промежуточный «зазор» (группа II) строго пополам, приняв за условно здоровые зерна с отношением потоков $Ф_{362}/Ф_{424} < 0,603$. Однако такой подход представляется слишком упрощенным и может при определенных условиях допустить попадание зараженных зерен в здоровые.

Более надежной сепарацией является разделение группы II на три подгруппы: первую подгруппу $Ф_{362}/Ф_{424} = 0,532–0,580$ относят к здоровым, а вторую и третью – к зараженным. Тогда граница сепарации при отношении потоков $Ф_{362}/Ф_{424}=0,580$ будет следующей: семена с большим отношением будут отнесены к зараженным, а с меньшим – к здоровым.

Максимально жестким подходом, серьезно усложняющим техническую реализацию и увеличивающим стоимость сепарации, является отбраковка или повторная проверка зерна группы II либо в полном диапазоне отношений потоков (0,532–0,675), либо в уменьшенном до средней трети (0,580–0,627).

Наиболее рациональным представляется компромиссный второй подход к выбору критерия сепарации.

Результаты для зерна ячменя устанавливают следующие границы критерия разделения партии по наличию заражения фузариозом при длинах волн возбуждения 362 нм и 485 нм: группа I (0,201–0,239), группа II (0,239–0,559), группа III (0,559–0,822). Наименьшей вариативностью колебаний отношений потоков внутри групп обладает группа I (0,038), средней – группа III (0,105) и максимальной – группа II (0,320). Большое значение «зазора» в группе II позволяет в дальнейшем рассмотреть вопрос о расширении границ критериев для групп I и III с использованием вышеизложенных подходов, но это следует делать после практических испытаний установки, реализующей фотолюминесцентный метод сортировки. При использовании второго компромиссного подхода граница здоровых зерен $Ф_{362}/Ф_{485} < 0,345$.

Результаты для зерна овса устанавливают следующие границы критерия разделения партии по наличию заражения фузариозом при длинах волн возбуждения 362 нм и 424 нм: группа I (2,084–2,407), группа III (2,404–2,950). Вариативности колебаний отношений потоков группы I (0,323), группы III (0,546). Границы критериев групп I и III пересекаются на незначительном отрезке (0,003), группа II отсутствует. В данном случае следует установить границу здоровых зерен $Ф_{424}/Ф_{362} < 2,404$.

Методика сепарации зерна включает нижеследующие этапы.

1. Пробоподготовка с выделением отдельных зерен и помещением каждого в темную светонепроницаемую камеру.
2. Возбуждение фотолюминесценции последовательно двумя источниками излучения.
3. Регистрация люминесценции фотоприемником.
4. Усиление полученных сигналов, расчет их отношения с передачей результата на микроконтроллер.
5. Отнесение исследуемого зерна к соответствующей группе (здоровые, зараженные или иные) на основании выбранных критериев и дальнейшие действия с ними.

Заключение. Для фотолюминесцентной сортировки представляется наиболее целесообразным использование следующих отношений потоков: для зерна пшеницы – при возбуждении излучением 362 нм и 424 нм, для зерна ячменя – при возбуждении излучением 362 нм и 485 нм, для зерна овса – при возбуждении излучением 424 нм и 362 нм. Вариативности колебаний отношений потоков зерна пшеницы отличаются незначительно. Для зерна ячменя имеет большое значение «зазор» (группы II), что может быть использовано при изменении критерия сепарирования. Для зерна овса границы групп здорового и зараженного зерна незначительно пересекаются. Границы критериев сепарации: для здорового зерна пшеницы $Ф_{362}/Ф_{424} < 0,580$; для здорового зерна ячменя $Ф_{362}/Ф_{485} < 0,345$, для здорового зерна овса $Ф_{424}/Ф_{362} < 2,404$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутовченко А. В. Применение механизированной очистки и фотосепарации семенного зерна и початков кукурузы в современных технологиях // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2018. № 135. С. 158–168.

2. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15. № 4. С. 6–10.

3. Соколов С. В., Новиков А. И. Новые оптоэлектронные системы экспресс-анализа семян в лесохозяйственном производстве // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9. № 2. С. 5–13.

4. Barbedo J. G., Guarienti E. M., Tibola C. S. Detection of sprout damage in wheat kernels using NIR hyperspectral imaging // Biosystems Engineering. 2018. Vol. 175. P. 124–132.

5. Bock C. H., Barbedo J. G., Del Ponte E. M. From visual estimates to fully automated sensor-based measurements of plant disease severity: status and challenges for improving accuracy // Phytopathology Research. 2020. Vol. 2. No. 9.

6. Design of device for optical luminescent diagnostic of the seeds infected by *Fusarium* / M. N. Moskovskiy et al. // *Agriculture.* 2023. Vol. 13. No. 3. 619.

7. Development of a real-time fluorescence loop-mediated isothermal amplification assay for rapid and quantitative detection of *Fusarium mangiferae* associated with mango malformation / J. Pu et al. // Physiological and Molecular Plant Pathology. 2014. Vol. 86. P. 81–88.

8. Extending hyperspectral imaging for plant phenotyping to the UV-range / A. Brugger et al. // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. No. 12. P. 1401.

9. Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: state of the art / A-K. Mahlein et al. // Annual Review of Phytopathology. 2018. Vol. 56. P. 535–558.

10. Metro maps of plant disease dynamics – Automated Mining of Differences Using Hyperspectral Images / M. Wahabzada et al. // PLoS ONE. 2015. Vol. 10. No. 1. e0116902.

11. Quantitative detection of pathogen load of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* infected wilt resistant and susceptible genotypes of chickpea using intergenic spacer region-based marker / P. Priyadarshini et al. // Physiological and Molecular Plant Pathology. 2021. Vol. 114. 101622.

12. Spectral photoluminescent parameters of barley seeds (*Hordéum vulgáre*) infected with *Fusarium* spp. / M. N. Moskovsky et al. // Photochemistry and Photobiology. 2023. Vol. 99. P. 29–34.

13. Thomas S., Kuska M. T., Bohnenkamp D. Benefits of hyperspectral imaging for plant disease detection and plant protection: a technical perspective // Journal of Plant Diseases and Protection. 2018. Vol. 125. P. 5–20.

REFERENCES

1. Butovchenko A. V. Use of mechanical cleaning and color sorting of seed grain and corn cobs in modern technologies. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2018;(135):158–168. (In Russ.).

2. Lobachevsky Ya. P., Dorokhov A. S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6–10. (In Russ.).

3. Sokolov S. V., Novikov A. I. New optoelectronic systems for express analysis of seeds in forestry production. *Forestry Engineering Journal*. 2019;9(2):5–13. (In Russ.).

4. Barbedo J. G., Guarienti E. M., Tibola C. S. Detection of sprout damage in wheat kernels using NIR hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*. 2018;(175):124–132.

5. Bock C.H., Barbedo J. G., Del Ponte E.M. From visual estimates to fully automated sensor-based measurements of plant disease severity: status and challenges for improving accuracy. *Phytopathology Research.* 2020;2(9).

6. Design of Device for Optical Luminescent Diagnostic of the Seeds Infected by *Fusarium* / M. N. Moskovskiy, M. V. Belyakov, A. S. Dorokhov, A. A. Boyko. *.Agriculture.* 2023;13(3):619.

7. Development of a real-time fluorescence loop-mediated isothermal amplification assay for rapid and quantitative detection of *Fusarium mangiferae* associated with mango malformation / J. Pu, Yi. Xie, H. Zhang, X. Zhang, Ya. Qi, J. Peng. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2014;86:81–88.

8. Extending hyperspectral imaging for plant phenotyping to the UV-range / A. Brugger, J. Behmann, S. Paulus, H.-G. Luigs. *Remote Sensing*. 2019;11(12):1401.

9. Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: state of the art / A.-K. Mahlein, M. T. Kuska, J. Behmann, G. Polder, A. Walter. *Annual Review of Phytopathology*. 2018;(56):535–58.

10. Metro maps of plant disease dynamics – Automated Mining of Differences Using Hyperspectral Images / M. Wahabzada, A.-K. Mahlein, C. Bauckhage, U. Steiner. *PLoS ONE*. 2015;10(1):e0116902.

11. Quantitative detection of pathogen load of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* infected wilt resistant and susceptible genotypes of chickpea using intergenic spacer region-based marker / P. Priyadarshini, D. Kohli, Sh. Yadav, N. Shrinvasa. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2021;(114):101622.

12. Spectral photoluminescent parameters of barley seeds (*Hordéum vulgáre*) infected with *Fusarium* spp. / M. N. Moskovsky, Yu. H. Shogenov, A. V. Lavrov, A. A. Gulyaev, I. Yu. Efremenkov. *Photochemistry and Photobiology*. 2023;(99):29–34.

13. Thomas S., Kuska M. T., Bohnenkamp D. Benefits of hyperspectral imaging for plant disease detection and plant protection: a technical perspective. *Journal of Plant Diseases and Protection*. 2018;(125):5–20.

Статья поступила в редакцию 23.08.2024; одобрена после рецензирования 21.09.2024; принята к публикации 29.09.2024.
The article was submitted 23.08.2024; approved after reviewing 21.09.2024; accepted for publication 29.09.2024.