ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

УДК 632.08:633.1 DOI: 10.31367/2079-8725-2023-84-1-94-98

ПРИМЕНЕНИЕ СПОРОУЛАВЛИВАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ БОЛЕЗНЕЙ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР (ОБЗОР)

О. Ю. Кремнева, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией фитосанитарного мониторинга агроэкосистем, kremenoks@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0982-6821;
К. Э. Гасиян, младший научный сотрудник, аспирант, gasiyankkk@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2192-3261
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (ФГБНУ ФНЦБЗР), 350039, Краснодарский край, г. Краснодар, п/о 39

Для того чтобы управлять фитосанитарной ситуацией в посевах сельскохозяйственных культур и получать максимальное количество качественного урожая, в первую очередь необходимо оценить состояние защищаемой культуры. На основании этой оценки впоследствии возможно построение наиболее эффективной и экономически оправданной системы защиты. Зерновые – важнейшие стратегические культуры, обеспечивающие продовольственную безопасность во всем мире. По данным ФАО в мире потери урожая от вредных организмов доходят до 40 %, и значительную роль среди вредных объектов составляют возбудители болезней грибной природы. Поэтому важнейшей задачей фитосанитарного мониторинга является своевременное обнаружение и идентификация болезни, причем до появления симптомов на самых ранних стадиях развития патогенов, что становится возможным при обнаружении инфекционного начала болезни. При мониторинге грибных болезней осуществить данную задачу позволяют спороулавливающие устройства. Цель данного обзора – описать имеющиеся устройства, которые можно использовать для мониторинга и раннего обнаружения возбудителей болезней сельскохозяйственных культур и выявить перспективные направления использования приборов на зерновых культурах для повышения эффективности защитных мероприятий. Во введении кратко описаны классические методы мониторинга и относительно новые методы, применяющиеся в настоящее время. В основной части рассмотрены спороулавливающие устройства, разработанные и применяющиеся как в зарубежной, так и в отечественной практике, способы применения спороулавливающей аппаратуры и приведены примеры использования этих устройств при мониторинге болезней зерновых культур. В выводах обобщены тенденции развития данного направления технического обеспечения фитосанитарного мониторинга и показаны направления, перспективные для дальнейших исследований.

Ключевые слова: *фитосанитарный мониторинг, болезни зерновых культур, спороулавливатель, защита растений.*

Для цитирования*: Кремнева О. Ю., Гасиян К. Э. Применение спороулавливающей аппаратуры для обнаружения болезней зерновых культур (обзор) // Зерновое хозяйство России. 2023. Т. 15, № 1. С. 94–98. DOI: 10.31367/2079-8725-2023-84-1-94-98.*

(cc) BY

THE USE OF SPORE-CATCHING EQUIPMENT DETECTING DISEASES OF GRAIN CROPS (REVIEW)

O. Yu. Kremneva, leading researcher, head of the laboratory for phytosanitary monitoring of agroecosystems, kremenoks@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0982-6821;
K. E. Gasiyan, junior researcher, postgraduate student, gasiyankkk@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2192-3261
Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Center of Biological Plant Protection», 350039, Krasnodar Kray, Krasnodar, p/o 39

In order to manage the phytosanitary situation on the sowings and get the maximum yields of high quality, at first it is necessary to estimate the condition of the protected crop. Based on this estimation, in future it is possible to establish the most effective and economically justified protection system. Grain crops are the most important strategic crops that ensure food security around the world. According to the FAO the world crop losses caused by pests have reached up to 40 % where fungal pathogens have played the most significant role. Therefore, the most important task of phytosanitary monitoring is the timely detection and identification of the disease before the beginning of symptoms at the earliest stages of pathogen development, which becomes possible when the infectious beginning of the disease has been detected. When monitoring fungal diseases, spore-catching equipment allow this issue to be solved. The purpose of the current review was to describe the existing developments of spore-catching equipment for monitoring grain crop diseases and to identify promising areas for using devices on crops to improve protective measures' efficiency. The introduction has briefly described the classical methods of monitoring and the relatively new methods currently used. In the main part there has been considered a spore-catching equipment developed and used both in foreign and domestic practice. There have been analyzed the methods of using spore-catching equipment and given the examples of the use of these devices in monitoring crop diseases. In the conclusions there have been summarized

the trends in the development of technical support for phytosanitary monitoring and shown areas that have been found promising for further research.

Keywords: *phytosanitary monitoring, diseases of grain crops, spore-catching device, plant protection.*

Введение. Получение максимального количества качественного урожая во многом зависит от своевременного обнаружения болезней сельскохозяйственных культур. По данным ФАО в мире потери урожая от вредных организмов доходят до 40 %. Традиционно обнаружение болезней сельскохозяйственных культур осуществляется посредством визуальных методов, однако такой подход на больших площадях очень трудоемок и требует наличия глубоких знаний специалистов, проводящих обследования посевов (Nagasubramanian et al., 2019; Singh et al., 2020). В настоящее время, помимо визуальных осмотров, широко используются микробиологические, серологические, молекулярные методы выделения и идентификации патогенов, однако для их проведения требуется тщательная подготовка образца пораженной ткани. В связи с этим наиболее предпочтительными становятся неразрушающие методы диагностики, которые в последнее время приобретают большую популярность (Ali et al., 2019). К таким методам относят оптические методы в автоматизированных системах обнаружения болезней: визуализация RGB-изображений, мульти- и гиперспектральные датчики, термография, флуоресценция хлорофилла и др. (Mahlein, 2016). Активно ведутся работы по внедрению искусственного интеллекта в область диагностики и мониторинга болезней, а именно: разработка программ идентификации болезней на основе нейросетей, машинного зрения, применяются технологии с использованием ГИС-систем (Кремнева и др., 2020). Современные технические возможности позволяют сделать процесс идентификации возбудителей болезней более простым и быстрым. Однако важнейшей задачей фитосанитарного мониторинга является не просто обнаружение и идентификация болезни после ее проявления, а определение наличия болезни еще до появления симптомов на самых ранних стадиях развития патогенов, что становится возможным при обнаружении инфекционного начала болезни. При мониторинге грибных болезней осуществить данную задачу позволяют спороулавливающие устройства.

Аэробиологические исследования актуальны не только в сельском хозяйстве, но и в медицине, так как с помощью спороулавливателей возможен мониторинг лета пыльцы, вызывающей аллергические реакции людей, тем самым устройства могут обеспечить профилактику поллинозов.

Цель данного обзора – описать имеющиеся устройства, которые можно использовать для мониторинга и раннего обнаружения возбудителей болезней сельскохозяйственных культур и выявить перспективные направления использования приборов на зерновых культурах для повышения эффективности защитных мероприятий.

Спороулавливающая аппаратура в мировой практике. Среди существующих спороулавливающих устройств, применяемых для аэробиологических исследований, можно выделить два типа: гравиметрические, в которых частицы оседают на горизонтальную поверхность под действием силы тяжести, и импакторные, в которых движение частиц осуществляется с потоком воздуха, после чего они сталкиваются с различными поверхностями. При этом импакторные ловушки разделяются на два вида: естественные, в которых движение частиц происходит под влиянием ветра, и волюметрические, где воздух принудительно прокачивают с заданной скоростью с помощью специальных помп. В мировой практике первой широко используемой ловушкой для спор грибов и пыльцы стала ловушка Херста, состоящая из электродвигателя, подшипника для поворота воздухозаборника против ветра и часового механизма для перемещения собирающей поверхности мимо воздухозаборника. Простота конструкции позволила этому изобретению стать достаточно популярным – оно использовалось в фитопатологических исследованиях около 60 лет. Впоследствии механизм ловушки Херста стал основой стационарной ловушки для спор фирмы «Burkard» (Англия), в которой вместо предметного стекла для осаждения спор используется клейкая лента. Похожим устройством обладают спороулавливатели, принадлежащие фирмам «Lanzoni» (Италия) и «Rotord» (Araujo et al., 2021).

В более ранних работах встречаются пробоотборники воздуха, работающие на принципе термодиффузии («термические преципитаторы»), когда частицы из аэрозоля воздуха, отклоняясь от поверхности с более высокой температурой, осаждаются на поверхность с низкой температурой. Такие устройства более эффективны для анализа высококонцентрированного аэрозоля и небольшого объема исследуемого воздуха. При попадании частиц размером более 1 мкм у таких пробоотборников сокращается скорость отбирания проб, поэтому их практически не используют в исследованиях содержания в воздухе частиц биологического происхождения (Orr et al., 1956).

В настоящее время активно проводятся работы по усовершенствованию отбора проб, которые направлены на повышение эффективности улавливания на более высоких скоростях сбора объема воздуха, упрощение обработки полученного материала, так как после получения осажденных на предметное стекло или клейкие ленты спор фитопатогенов проводится последующий анализ посредством микроскопа, что требует значительных временных затрат. Это упрощение связано с применением диагностики на основе ДНК, например, ПЦР, TwistDX и LAMP, использованием биосенсоров, например, автоматический про-

боотборник SYield, который по беспроводной связи сообщает о результатах на месте без доставки образца в лабораторию

(West, 2015). Быстро развивающимся направлением становится разработка пробоотборников воздуха, в которых споры не оседают на твердые поверхности, а собираются в жидкой среде, что позволяет проводить экспресс-анализ несколькими методами, включая ПЦР-анализ и серологический анализ. Например, так работает пробоотборник воздуха «Coriolis δ» французского производства «Bertin Technologies» (Carvalho et al, 2008).

Спороулавливающая аппаратура в Российской Федерации. В Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (ФГБНУ ФНЦБЗР) г. Краснодар были разработаны следующие приборы.

– ***Устройство для определения заспоренности растений*** (Соколов и др., 2018) – импактор, в котором размещается предметное стекло, предварительно покрытое удерживающим составом (чаще всего используется вазелин). Снизу устройства находится щелевой патрубок, через который воздух вместе с содержащимися в нем спорами возбудителей болезней попадает к предметному стеклу, при этом создается слабая тяга посредством работы аспиратора.

– ***Портативное спороулавливающее устройство*** – также импакторного типа, оснащенное дистанционным механизмом управления.

– ***Ловушка «ПЛС-15»***, представляющая собой стойку с флюгером, у которого в передней части закреплена специальная пластиковая рамка, покрытая вазелином, на нее осаждаются споры возбудителей болезней.

В ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет» разработано спороулавливающее устройство, в котором споры фитопатогенов попадают внутрь через специальные улавливающие отверстия и остаются на поверхности растения. Через 1–7 дней после установки этого спороулавливателя устройство вместе с участком растения переносят в лабораторию и проводят идентификацию и подсчет спор. С помощью этого устройства возможно определять количество спор возбудителей грибных болезней на единицу поверхности растений (Сафин и др., 2018).

Способы применения спороулавливающей аппаратуры. Спороулавливающие устройства могут устанавливаться стационарно в посевах или использоваться портативно. Например, ловушки «Burkard», и «ПЛС-15», описанные выше, являются стационарными. Устройство для определения заспоренности растений ФГБНУ ФНЦБЗР является ручным спороулавливателем – при его применении исследователь, передвигаясь по диагонали исследуемого участка посевов, удерживает устройство на специальном ремне. Портативное спороулавливающее устройство можно устанавливать на беспилотные летательные аппараты и управлять им с земли, тем самым обеспечивая мониторинг на больших посевных площадях.

Анализ литературных источников выявил исследования, в которых показана наибольшая эффективность портативных спороулавливателей по сравнению со стационарными. Однако также были получены выводы о том, что наиболее эффективным способом мониторинга болезней является их совместное использование для дополнения полученных данных (Гасиян и др., 2022) или интеграция данных от нескольких стационарно установленных спороулавливающих устройств.

Применение спороулавливающей аппаратуры для мониторинга болезней зерновых культур. Возможности применения спороулавливающей аппаратуры на зерновых культурах показаны в ряде исследований. Например, в исследованиях по испытанию спороулавливателя ПСЛ-3 в комплекте с дистанционно пилотируемым летательным аппаратом было установлено, что устройства ПСЛ-3 и ОЗР-1мп отлавливают одинаковое количество спор, а также не отличаются по отлову спор в отношении видового состава. Однако применение дистанционного устройства более предпочтительно, так как с его помощью можно обследовать большие площади за короткий промежуток времени (Кремнева и др., 2020). В исследовании влияния обработки почвы на развитие болезней пшеницы использовался спороулавливатель ОЗР-1мп, и были получены выводы о различиях качественного и количественного состава спор фитопатогенов в зависимости от обработки почвы (Kremneva et al, 2021). Посредством дистанционного мониторинга посевов пшеницы спороулавливателем ПСЛ-2 была получена линейная закономерность между количеством спор ржавчинных грибов и степенью развития болезней. Так, при степени развития 5 % прибором было отловлено 70 шт. спор на пробу, при 25 % – 270 шт., при 50 % – 380 шт. (Соколов и др., 2018)

На основе данных, полученных спороулавливающими устройствами, возможно проведение различных исследований, связанных с анализом переноса инокулята спор фитопатогенных грибов на различные расстояния, с сезонной и суточной динамикой лета спор. Ученые из Курганской сельскохозяйственной академии предлагают при проведении отлова спор фитопатогенов зерновых культур учитывать фактор осевого вращения Земли, вызывающего движение воздушных масс. Ими была получена закономерность, согласно которой число отловленных спор с одной (правой) стороны (это объясняется проведением исследований в Северном полушарии) от вектора движения воздуха (в районе господствует ветер юго-западного направления) было в 2–2,7 раза больше, чем с другой (Богданова и др., 2010).

Выводы. Со времен разработки первой спороловушки было предложено множество способов усовершенствования спороулавливающих устройств. Чаще стали использоваться устройства, которые отбирают пробы воздуха с содержащимися в нем спорами фитопатогенов в пробирки, чтобы сделать обработку полученного материала более удобной для пользователя, посредством автоматизированного анализа образцов. Сам процесс сбора материала также совершенствуется – спороулавливающая аппаратура устанавливается на беспилотные летательные аппараты, обеспечивая менее трудоемкий, быстрый и точный фитосанитарный мониторинг. Спороулавливатели, устанавливаемые на транспортных средствах и беспилотных летательных аппаратах, вероятно, будут все шире использоваться как в исследованиях, направленных на понимание местонахождения источников распространения инфекции, так и в практических сетях оповещения о рисках возникновения тех или иных болезней. Стационарные спороулавливатели могут применяться для проведения анализа даже неспециалистами и повысить точность решений по борьбе с болезнями в полевых, фермерских и региональных масштабах.

Разработка современной спороулавливающей аппаратуры, осуществляющей обработку данных с помощью искусственного интеллекта, приведет к более широкому ее использованию сельхозтоваропроизводителями.

В настоящий момент уже имеется достаточная техническая база спороулавливающих устройств, однако необходима разработка методик по ихприменению, в том числе на зерновых культурах. Также тщательного рассмотрения требуют пороговые концентрации спор, используемые для инициирования мер по борьбе с болезнями. Это позволит создать стандартизированную систему фитосанитарного мониторинга, обеспечивающую своевременную и эффективную защиту сельскохозяйственных культур.

Финансирование. Исследования выполнены согласно Государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме № FGRN-2022-0008.

Библиографические ссылки

1. Богданова В. В., Евсеев В. В., Голощапов А. К. Новый подход к мониторингу аэрогенной инфекции зерновых культур // Защита и карантин растений. 2010. № 8. С. 47–48.

2. Гасиян К. Э., Кремнева О. Ю., Гапоненко А. А. Сравнительные испытания стационарной и портативной спороловушек на посевах пшеницы // Биологическая защита растений – основа стабилизации агроэкосистем: материалы Международной научно-практической конференции, Краснодар, 13–15 сентября 2022 г. Вып. 11. Краснодар: Издательство «ЭДВИ», 2022. С. 139–146.

3. Кремнева О. Ю., Гасиян К. Э., Зеленский Р. А., Селиванов В. Г. Испытание пробоотборника воздуха ПСЛ-3 для дистанционного обнаружения возбудителей болезней озимой пшеницы // Техника и оборудование для села. 2020. № 11(281). С. 9–11. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-11-9-11.

4. Кремнева О. Ю., Костенко И. А., Пачкин А. А., Данилов Р. Ю., Пономарев А. В., Ким Ю. С. Картирование распространения и развития фитапатогенов на пшенице и ячмене с использованием NEXTGIS // Зерновое хозяйство России. 2020. № 3(69). С. 61–66. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-69-3-61-66.

5. Спороулавливатель для сбора инфекционного начала фитопатогенных грибов с поверхности растений / Сафин Р. И., Валиев А. Р., Каримова Л. З., Валидов Ш. З., Низамов Р. М., Зиганшин Б. Г., Филиппова Е. А., Сабиров Р. Ф. Патент № 184233 Российская Федерация. Заявка 2018112097, 2018.04.03; опубл. 2018.10.18.

6. Соколов Ю. Г., Садковский В. Т., Кремнева О. Ю., Данилов Р. Ю., Пачкин А. А., Зеленский Р. А., Курилов А. А. Разработка технологии обнаружения очагов ржавчинных болезней пшеницы // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12–2(78). С. 29–33. https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.042.

7. Ali M. M., Bachik N. A., Muhadi N. A., Yusof T. N. T., Gomes Ch. Non-destructive techniques of detecting plant diseases: A review // Physiological and Molecular Plant Pathology. 2019. Vol. 108, Article number 101426. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2019.101426.

8. Araujo G. T., Amundsen E., Frick M., Gaudet D. A., Aboukhaddour R., Selinger B., Thomas J., Laroche A. Detection and quantification of airborne spores from six important wheat fungal pathogens in southern Alberta // Canadian Journal of Plant Pathology. 2021. Vol. 43(3), P. 439–454. https://doi.org/10.1080/07060661.2020.1817795.

9. Carvalho E., Sindt Ch., Verdier A., C. Galán, O'Donoghue L., Parks S., Thibaudon M. Performance of the Coriolis air sampler, a high-volume aerosol-collection system for quantification of airborne spores and pollen grains // Aerobiologia. 2008. Vol. 24(4), P. 191–201. https://doi.org/10.1007/s10453-008-9098-y.

10. Kremneva O. Yu., Gasiyan K. E., Ponomarev A. V., Kokhmetova A. and Novoseletsky S. I. Influence of the tillage method on the development of leaf diseases of winter wheat // E3S Web of Conferences. International Conference on Advances in Agrobusiness and Biotechnology Research (ABR 2021). Krasnodar, 2021. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128502027.

11. Mahlein A.-K. Plant Disease Detection by Imaging Sensors – Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping // Plant Disease. 2016. P. 241–25. https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE.

12. Nagasubramanian K., Jones S., Singh A.K., Sarkar S., Singh A., Ganapathysubramanian B. Plant disease identification using explainable 3D deep learning on hyperspectral images // Plant Methods. 2019. Vol. 15. Article number 98. https://doi.org/10.1186/s13007-019-0479-8.

13. Orr C. J., Gordon M. T., Kordecki M. C. Thermal precipitation for sampling air-borne microorganisms: comparison with other methods // Applied and Environmental Microbiology Journal. 1956. Vol. 4(3). P. 116–118. DOI: 10.1128/am.4.3.116-118.1956.

14. Singh V., Sharma N., Singh S. A review of imaging techniques for plant disease detection // Artificial Intelligence in Agriculture. 2020. Vol. 4(4), P. 229–242. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.10.002.
15. West J. S. Innovations in air sampling to detect plant pathogens // Annals of Applied Biology. 2015. Vol. 166, P. 4–17. https://doi.org/10.1111/aab.12191.

References

1. Bogdanova V. V., Evseev V. V., Goloshchapov A. K. Novyi podkhod k monitoringu aerogennoi infektsii zernovykh kul'tur [A new approach to monitoring aerogenic infection of grain crops] // Zashchita i karantin rastenii. 2010. № 8. S. 47–48.
2. Gasiyan K. E., Kremneva O. Yu., Gaponenko A. A. Sravnitel'nye ispytaniya statsionarnoi i portativnoi sporolovushek na posevakh pshenitsy [Comparative tests of stationary and portable spore traps on wheat crops] // Biologicheskaya zashchita rastenii - osnova stabilizatsii agroekosistem: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Krasnodar, 13–15 sentyabrya 2022 g. Vyp. 11. Krasnodar: Izdatel'stvo «EDVI», 2022. S. 139–146.
3. Kremneva O. Yu., Gasiyan K. E., Zelenskii R. A., Selivanov V. G. Ispytanie probootbornika vozdukha PSL-3 dlya distantsionnogo obnaruzheniya vozbuditelei boleznei ozimoi pshenitsy [Testing of air sampler PSL-3 for remote detection of winter wheat pathogens] // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2020. № 11(281). S. 9–11. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-11-9-11.
4. Kremneva O. Yu., Kostenko I. A., Pachkin A. A., Danilov R. Yu., Ponomarev A. V., Kim Yu. S. Kartirovanie rasprostraneniya i razvitiya fitapatogenov na pshenitse i yachmene s ispol'zovaniem NEXTGIS [Mapping the distribution and development of phytopathogens on wheat and barley using NEXTGIS] // Zernovoe khozyaistvo Rossii. 2020. № 3(69). S. 61–66. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-69-3-61-66.
5. Sporoulavlivatel' dlya sbora infektsionnogo nachala fitopatogennykh gribov s poverkhnosti rastenii [Spore catching equipment for collecting the infectious beginning of phytopathogenic fungi from the surface of plants] / Safin R. I., Valiev A. R., Karimova L. Z., Validov Sh. Z., Nizamov R. M., Ziganshin B. G., Filippova E. A., Sabirov R. F. Patent № 184233 Rossiiskaya Federatsiya. Zayavka 2018112097, 2018.04.03; opubl. 2018.10.18.
6. Sokolov Yu. G., Sadkovskii V. T., Kremneva O. Yu., Danilov R. Yu., Pachkin A. A., Zelenskii R. A., Kurilov A. A. Razrabotka tekhnologii obnaruzheniya ochagov rzhavchinnykh boleznei pshenitsy [Development of technology for detecting foci of wheat rust diseases] // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. 2018. № 12–2(78). S. 29–33. https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.042.
7. Ali M. M., Bachik N. A., Muhadi N. A., Yusof T. N. T., Gomes Ch. Non-destructive techniques of detecting plant diseases: A review // Physiological and Molecular Plant Pathology. 2019. Vol. 108, Article number 101426. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2019.101426.
8. Araujo G. T., Amundsen E., Frick M., Gaudet D. A., Aboukhaddour R., Selinger B., Thomas J., Laroche A. Detection and quantification of airborne spores from six important wheat fungal pathogens in southern Alberta // Canadian Journal of Plant Pathology. 2021. Vol. 43(3), P. 439–454. https://doi.org/10.1080/07060661.2020.1817795.
9. Carvalho E., Sindt Ch., Verdier A., C. Galán, O'Donoghue L., Parks S., Thibaudon M. Performance of the Coriolis air sampler, a high-volume aerosol-collection system for quantification of airborne spores and pollen grains // Aerobiologia. 2008. Vol. 24(4), P. 191–201. https://doi.org/10.1007/s10453-008-9098-y.
10. Kremneva O. Yu., Gasiyan K. E., Ponomarev A. V., Kokhmetova A. and Novoseletsky S. I. Influence of the tillage method on the development of leaf diseases of winter wheat // E3S Web of Conferences. International Conference on Advances in Agrobusiness and Biotechnology Research (ABR 2021). Krasnodar, 2021. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128502027.
11. Mahlein A.-K. Plant Disease Detection by Imaging Sensors – Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping // Plant Disease. 2016. P. 241–25. https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE.
12. Nagasubramanian K., Jones S., Singh A.K., Sarkar S., Singh A., Ganapathysubramanian B. Plant disease identification using explainable 3D deep learning on hyperspectral images // Plant Methods. 2019. Vol. 15. Article number 98. https://doi.org/10.1186/s13007-019-0479-8.
13. Orr C. J., Gordon M. T., Kordecki M. C. Thermal precipitation for sampling air-borne microorganisms: comparison with other methods // Applied and Environmental Microbiology Journal. 1956. Vol. 4(3). P. 116–118. DOI: 10.1128/am.4.3.116-118.1956.
14. Singh V., Sharma N., Singh S. A review of imaging techniques for plant disease detection // Artificial Intelligence in Agriculture. 2020. Vol. 4(4), P. 229–242. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.10.002.
15. West J. S. Innovations in air sampling to detect plant pathogens // Annals of Applied Biology. 2015. Vol. 166, P. 4–17. https://doi.org/10.1111/aab.12191.

Поступила: 30.11.22; доработана после рецензирования: 28.12.22; принята к публикации: 19.01.23.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Кремнева О. Ю. – концептуализация и проектирование исследования, анализ и интерпретация данных; Гасиян К. Э. – сбор, анализ и интерпретация данных, подготовка рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.