

Фитосанитарное проектирование агроэкосистем и дистанционное зондирование

А. К. Лысов, В. А. Павлюшин

*Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
Санкт-Петербург, 196608, Россия
E-mail: alysov@vizr.spb.ru*

Основу фитосанитарной стабилизации агроэкосистем, обеспечения экологической безопасности для окружающей среды, животного мира и человека составляют современные технологии рационального и безопасного применения средств защиты растений, дифференциации их применения с учётом пространственной неоднородности распределения вредных объектов на участках поля. В представленной статье рассмотрена современная парадигма защиты растений, направленная на снижение стрессовых трансформаций агроэкосистем, оптимизацию технологий возделывания сельскохозяйственных культур, снижение селективного действия пестицидов на популяции вредных организмов, использование современных методов дистанционного фитосанитарного мониторинга, роботизации и автоматизации технологических процессов по защите растений в системах точного земледелия. Проведён анализ возможностей современных методов дистанционного фитосанитарного мониторинга на основе использования спутниковых данных дистанционного зондирования, беспилотных воздушных судов. Представлены результаты исследований по дистанционным методам получения информации на основе формирования библиотек спектральных характеристик отражения здоровых и больных растений, а также повреждённых вредителями. Анализ мультиспектральных образов здоровых и больных растений показывает, что существуют характерные отличия полученных кривых спектральной яркости в ближнем инфракрасном поддиапазоне излучения. Благодаря этим отличиям можно определять больные растения на начальных этапах развития болезни. Полученные результаты позволят создать основу для автоматической обработки и анализа данных дистанционного зондирования подстилающей поверхности сельскохозяйственных угодий на наличие вредоносных объектов и определять фитосанитарные риски с учётом качества урожая и экологической безопасности для окружающей среды.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, спектральные характеристики растений, сорные растения, дифференцированное внесение, средства защиты, экологическая безопасность

Одобрена к печати: 03.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-101-109

Введение

Современное растениеводство ставит перед фитосанитарией две крупные наукоёмкие задачи: гарантированную защиту урожая и его качество, а также достижение достаточного уровня экологической безопасности в агроэкосистемах. Мировые потери урожая от вредителей болезней и сорняков остаются значительными и достигают 25–30 %. В развитых странах растениеводство отличается интенсивным использованием пестицидов с глобальными объёмами фитосанитарных защитных мероприятий, сопровождаемых внесением огромного количества химических препаратов в почву и окружающую среду. По данным Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений, в 2019 г. в Российской Федерации фитосанитарные обработки проводились на площади 101,7 млн га и при этом на сельскохозяйственные угодья было внесено около 70 тыс. т пестицидов, а ассортимент средств защиты растений (СЗР) насчитывает 1750 препаратов, основу которых составляют 230 действующих веществ разной химической природы. В 1990 г. объём мероприятий по защите растений составлял около 51 млн га. В настоящее время ассортимент СЗР в США насчитывает около 19 тыс. препаратов, в Германии — около 10 тыс. препаратов. Экоотоксикологическая нагрузка в Российской Федерации на 1 га пашни находится в пределах 0,5–6,0 кг. Динамика пестицидной нагрузки пашни в РФ за период 2000–2019 гг. — в пределах 0,29–0,59 кг/га (Михайликова, Стребкова, 2021).

Вышеобозначенное требует перехода на новую парадигму в защите растений (Павлюшин и др., 2016), которая отличалась бы следующим:

- оптимальным видовым и внутривидовым биоразнообразием в агробиоценозах;
- ослаблением стрессовых трансформаций агроэкосистем;
- оптимизацией технологий возделывания сельскохозяйственных культур;
- снижением селективного действия средств защиты растений на популяции вредных организмов;
- рациональным соотношением химической, биологической и иммуногенетической защиты растений;
- использованием современных методов дистанционного фитосанитарного мониторинга на основных сельскохозяйственных культурах с учётом пространственной неоднородности распределения вредных объектов на участках поля;
- роботизацией и автоматизацией технологических процессов по защите растений в системах точного земледелия;
- многосторонним мониторингом экологических последствий антропогенного воздействия на агроэкосистемы и фитосанитарных рисков.

Под фитосанитарным проектированием агроэкосистем следует понимать рациональное размещение сельскохозяйственных культур и их сортов с учётом очагов особо опасных вредоносных видов, мест перезимовки вредителей, болезней и сорняков, а также уровня супрессивности почвы, разграничения полей близкородственных сельскохозяйственных культур и розы ветров для оценки рисков аэрогенной инфекции и наличия соседствующих диких экосистем. Безусловно, с точки зрения полнообъёмного количественного анализа фитосанитарных событий и их оптимизации необходимо делать ставку на агроэкосистему, которая ограничивается севооборотной площадью и функционирует в режиме однотипных севооборотов. С учётом сложнейших задач новой парадигмы защиты растений под агроэкосистемой целесообразно понимать совокупность агробиоценозов сельскохозяйственных и естественных угодий определённого агроландшафта, образующих систему биоценотических взаимосвязей организмов, их составляющих (рис. 1).

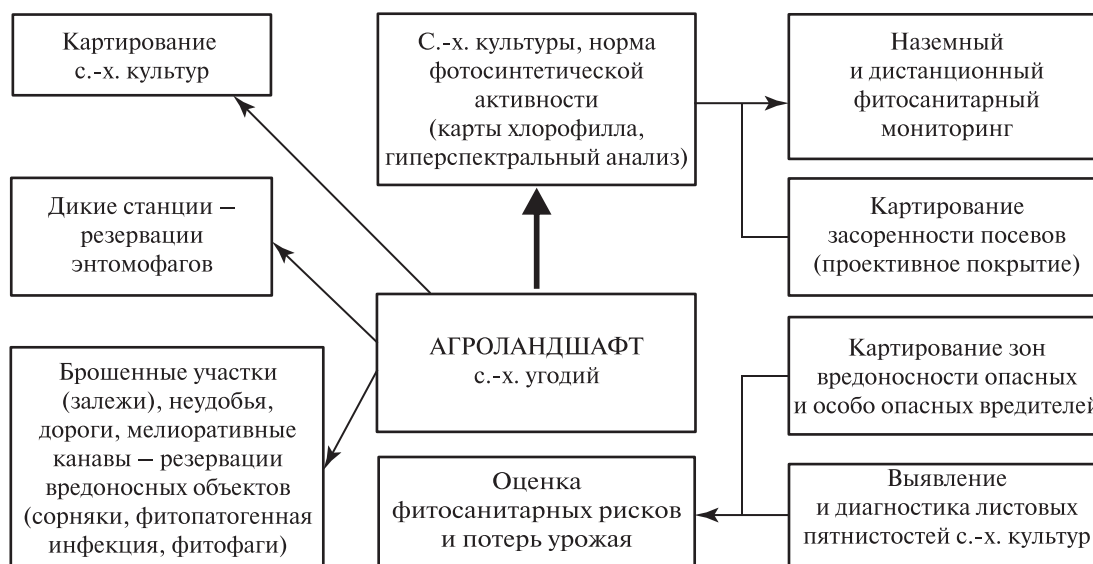


Рис. 1. Фитосанитарное проектирование агроэкосистем

Необходимость фитосанитарного проектирования можно продемонстрировать такими примерами, как сильное повышение заражённости пшеницы токсинпродуцирующими фузариевыми грибами после предшественника кукурузы (Гагкаева и др., 2011) или размещение

посадок капусты вблизи дорог, неудобий, где, как правило, перезимовывают крестоцветные блошки — опаснейшие вредители рассады, что приводит к значительным потерям урожая.

Игнорирование плодосмены (севооборота) при выращивании картофеля, особенно в частном секторе, привело к катастрофическому распространению и накоплению особо опасных возбудителей болезней (фитофтороз, ризоктониоз, парша, бактериозы и др.), что практически не позволяет получать урожай картофеля, соответствующего ГОСТу (Хютти и др., 2021). Так, проведённый фитосанитарный мониторинг сортов картофеля в период хранения в 2019 и 2020 г. на поражённость серебристой паршой (гриб *Helminthosporium solani*) в Северо-Западном регионе выявил распространённость заболевания в пределах от 5 до 100 %.

Весьма доказательны материалы многолетних агробиоценологических исследований, обосновывающие фитосанитарную устойчивость агроэкосистем в Каменной Степи (юго-восток Центрального Черноземья), которая достигается в условиях длительного (более 100 лет) рационального землепользования (Шпанев, Голубев, 2013).

Среди основных факторов фитосанитарной устойчивости — севообороты средней и длинной ротации, оптимизированная структура посевных площадей (зерновые занимают не более 40 % полей и др.), высокая агротехника, в том числе обработка почвы с оборотом пласта, возделывание сортов местной селекции, обладающих групповой устойчивостью к основным болезням. Выделяется роль биоценологических факторов устойчивости агроэкосистем. Так, выявлено большое биоразнообразие видов членистоногих и растений, причём сильным оказалось влияние энтомофагов на насекомых-фитофагов, что вызвало снижение численности злаковых тлей на 40 % и на 65 % — кладок яиц вредной черепашки (агроэкологический стационар Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений (ВИЗР) и Научно-исследовательского института сельского хозяйства центрально-чернозёмной полосы им. В. В. Докучаева (НИИСХ ЦЧП им. В. В. Докучаева)). Существенная роль в фитосанитарном проектировании агроэкосистем отводится пространственному размещению сортов сельскохозяйственных культур, особенно это касается сортов с генетической устойчивостью к вредоносным объектам. Устойчивые сорта, по многолетним данным ВИЗР (лаборатория сельскохозяйственной энтомологии и лаборатория иммунитета растений к болезням), имеют стратегическое значение для фитосанитарной стабилизации и интенсификации сельскохозяйственного производства.

Так, с меньшими затратами достигаются высокие урожаи, увеличиваются экологические пороги вредоносности, повышается эффективность минеральных удобрений и биологической регуляции и, что весьма важно, уменьшается кратность химических обработок. Требуется более чёткое выделение сортов и их размещение в агроландшафтах при дистанционном зондировании.

В условиях цифровизации сельскохозяйственного производства в части разработки методов прогнозирования и моделирования для интеллектуальных систем поддержки принятия решений по защите растений для планирования мероприятий, оперативности и эффективности их проведения необходимо иметь обширную информацию о состоянии посевов, неоднородности распределения вредных объектов на участках поля, а также по обеспечению требований по экологической безопасности. Существующие методы сбора необходимой информации на основе проведения наземных маршрутных обследований посевов сельскохозяйственных культур и мест резервации особо опасных вредителей весьма трудоёмки и самое главное — не позволяют оперативно получать данные в необходимом объёме. Серьёзным технологическим прорывом в проведении фитосанитарного мониторинга по оперативному сбору необходимой информации в больших объёмах стало использование методов дистанционного зондирования поверхности Земли (ДЗЗ). Получаемая оперативная информация об интересующих объектах на подстилающей поверхности сельскохозяйственных угодий базируется на результатах спутниковой и авиационной съёмки с геокодированной привязкой снимаемых участков с помощью спутниковых систем глобального позиционирования GPS/ГЛОНАСС (англ. Global Positioning System, система глобального позиционирования/Глобальная навигационная спутниковая система). В последнее время для дистанционного фитосанитарного

мониторинга всё чаще используют беспилотные воздушные судна, которые позволяют оперативно решать следующие задачи:

- получение детализированной информации для создания картографической основы сельскохозяйственных угодий, размещения сельскохозяйственных объектов с точными координатами с целью планирования и контроля технологических процессов сельскохозяйственного производства;
- проведение дистанционного мониторинга на основе мультиспектральной съёмки подстилающей поверхности сельскохозяйственных угодий для определения состояния и развития посевов, прогнозирования урожайности путём вычисления по результатам спектральной съёмки индекса вегетации и т. п.;
- оперативный контроль в реальном времени работы наземной техники и качества её выполнения;
- геокодированный фитосанитарный мониторинг сельскохозяйственных угодий по определению уровня засорённости посевов, вредоносности вредителей и появления болезней на ранней стадии развития;
- геокодированный мониторинг для картирования ареалов особо опасных массовых вредителей, таких как саранчовые, луговой мотылёк и мышевидные грызуны (особенно в труднодоступных местах);
- геокодированный дистанционный фитосанитарный мониторинг выявления ряда наиболее опасных возбудителей болезней сельскохозяйственных культур (на зерновых — бурая ржавчина, жёлтая ржавчина, корневые гнили, септориоз, вирус жёлтой карликовости ячменя (ВЖКЯ) и др.; на картофеле — фитофтороз, альтернариоз, золотистая картофельная нематода, вирозы; на сахарной свёкле — ризомания, ризоктониоз, нематоды);
- оценка вредоносности фитофагов (колорадский жук, тли, чешуекрылые и др.).

Применение беспилотного воздушного судна (БВС) для аэрофотосъёмки сельскохозяйственных угодий по сравнению с космическими снимками обеспечивает получение изображений с более высоким разрешением (до 1 см/пиксель) (Корнилов, 2008).

Для планирования мероприятий по защите растений БВС выступают необходимым и эффективным инструментом по созданию электронных карт полей, определению их достоверной площади и чётких границ с другими участками сельскохозяйственных культур, их фактического состояния, рельефа местности, наличия линий электропередач, лесополос, отдельно растущих деревьев, влияющих на безопасность проведения защитных мероприятий.

На современном этапе исследований возможностей дистанционного зондирования агроэкосистем для фитосанитарного проектирования получены положительные результаты по оценке засорённости участков поля, потерь урожая, по картированию зон неоднородности распределения с учётом экономических порогов вредоносности (Каплин и др., 2020; Павлюшин, Лысов, 2019).

Получены положительные результаты использования дистанционных методов съёма с помощью спектрометрии информации по оценке засорённости посевов зерновых культур и посадок картофеля более чем по 20 видам сорняков, в том числе и по такому вредоносному виду на землях несельскохозяйственного назначения, как борщевик Сосновского, на основе определения и анализа яркостных информативных признаков (Рыжиков, 2017).

Проводимые в Агрофизическом научно-исследовательском институте исследования позволили выявить различия оптических характеристик отражения растений, испытывающих дефицит азота и почвенной влаги (Якушев и др., 2019). Полученные результаты важны для определения информативных признаков, позволяющих при дешифрации фитосанитарного состояния сельскохозяйственных угодий чётко разделять, в каком случае растения имеют характерные признаки поражения болезнями, а в каком это признаки неинфекционной патологии из-за дефицита минерального питания или почвенной влаги. В связи с чем формирование баз данных на основе библиотек спектральных образов болезней различных сельскохозяйственных культур, а также спектральных образов данных культур, испытывающих

дефицит минерального питания или почвенной влаги, позволит на основе дистанционных методов зондирования принимать обоснованные и оперативные решения по стабилизации фитосанитарной обстановки или необходимости проведения комплекса агротехнических мероприятий для снятия стрессовых ситуаций на посевах, вызванных другими факторами. Специалистами института космических исследований имени академика У. М. Султангазина по гиперспектральным данным определены отличительные участки спектра для дистанционного мониторинга грибных болезней яровой пшеницы с учётом разных фаз поражения (Bekmukhamedov, Karabkina, 2013).

В сравнении с распознаванием сорных растений распознавание с помощью дистанционных методов поражений растений грибными, вирусными, бактериальными и нематодными болезнями представляется более сложной задачей, так как их проявление желательно фиксировать на начальном этапе развития, а в ряде случаев и в латентной форме.

В связи с чем нами определялись спектральные образы растений картофеля, поражаемых наиболее вредоносными болезнями, такими как альтернариоз, фитофтороз, а также поражённых золотистой картофельной нематодой. Ранее была установлена возможность по спектральным характеристикам отражения выявлять на начальном этапе поражения вегетативных органов картофеля вирусом-Y. Полученные данные спектральных характеристик отражения растений картофеля, поражённых грибами рода альтернария (рис. 2), показывают, что даже при начальном этапе развития болезни без визуальных признаков мы наблюдаем в ближнем инфракрасном поддиапазоне электромагнитного излучения снижение спектральной яркости по сравнению со здоровыми растениями.

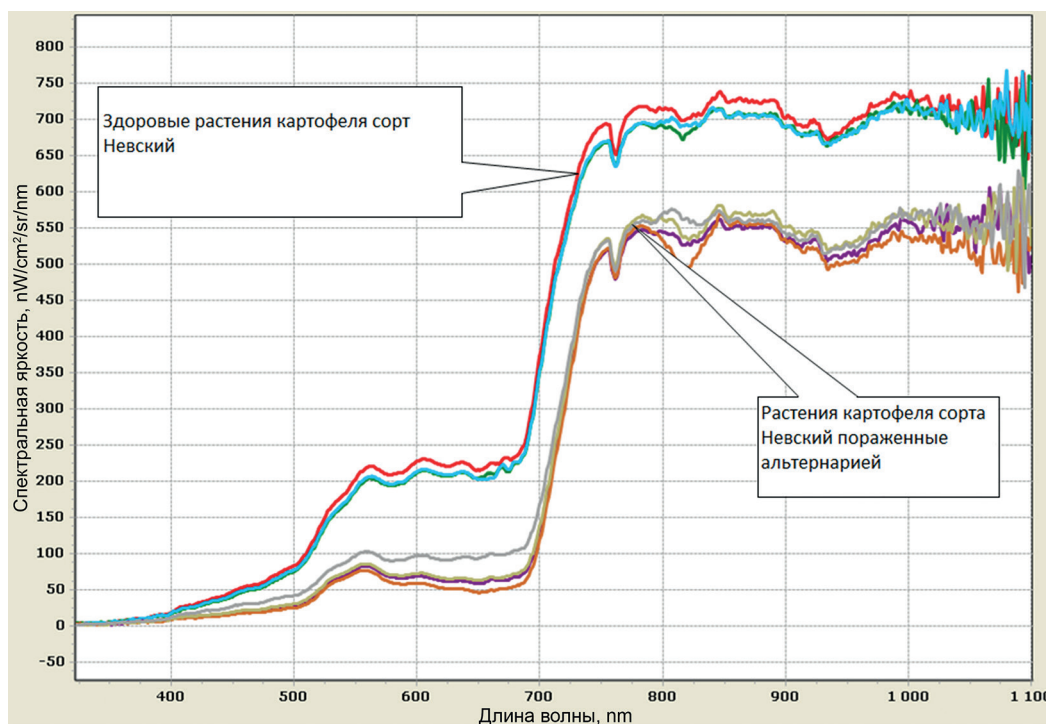


Рис. 2. Спектральные характеристики отражения здоровых и больных растений картофеля, поражённых альтернариозом, с визуально видимыми признаками

При поражении посадок картофеля фитофторозом (рис. 3, см. с. 106) на третий день после заражения мы наблюдаем резкое снижение спектральной яркости отражения в сравнении со здоровыми растениями, а через 7 сут после заражения значения спектральной яркости показывают, что растения практически погибли. В этом случае величина спектральной яркости у поражённых фитофторозом растений близка к значениям спектральной яркости отражения от почвы.

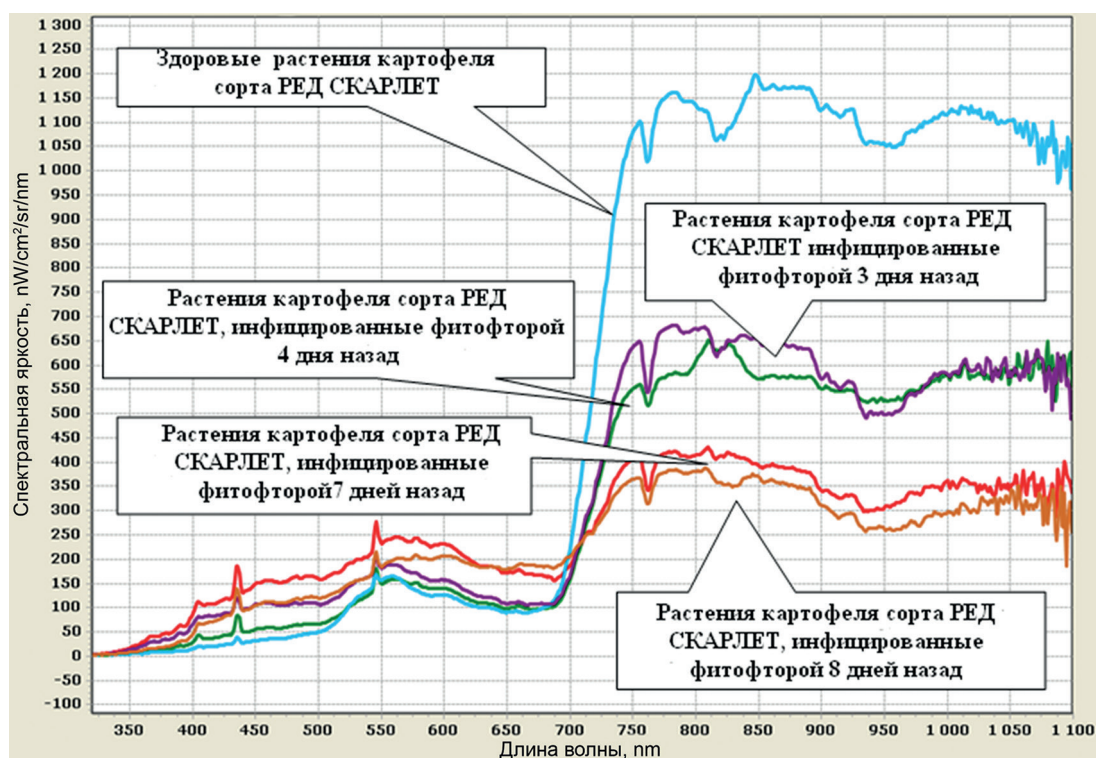


Рис. 3. Спектральные характеристики отражения здоровых и больных растений картофеля, поражённых фитофторозом, в динамике развития болезни по суткам

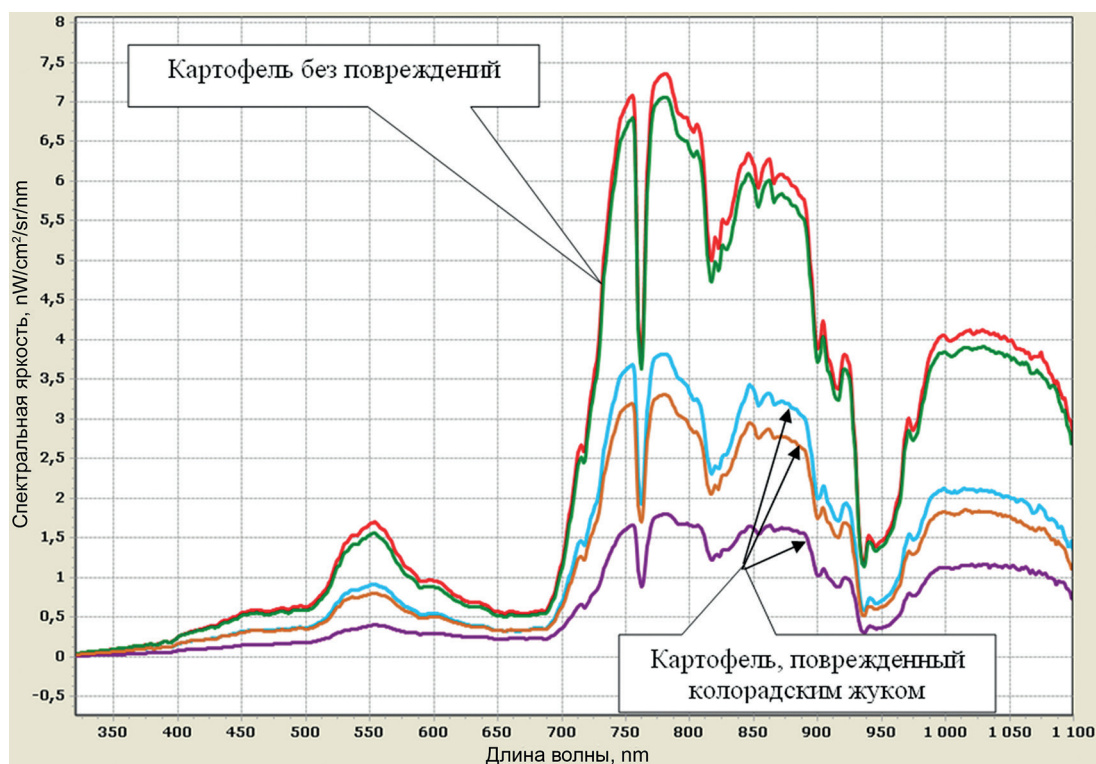


Рис. 4. Спектральные характеристики отражения растений картофеля, в разной степени повреждённых колорадским жуком

При повреждении растений картофеля колорадским жуком из-за потери биомассы растений мы также наблюдаем снижение значений спектральной яркости отражения в 2–3 раза

по сравнению с растениями без повреждения вредителем. На *рис. 4* (см. с. 106) представлены данные по спектральной яркости отражения растений картофеля с учётом разной степени их повреждения. Полученные данные имеют большое значение для дистанционного метода выявления очагов поражения растений картофеля колорадским жуком.

Выводы

В настоящее время по результатам проведённых исследований по определению информативных признаков на основе спектральной яркости отражения от здоровых и больных растений картофеля, а также повреждённых колорадским жуком установлены наиболее информативные спектральные поддиапазоны длин волн электромагнитного излучения для использования мультиспектральной съёмки подстилающей поверхности сельскохозяйственных угодий с помощью современных систем ДЗЗ. Анализ спектральных образов здоровых и больных растений показывает, что характерные отличия полученных кривых спектральной яркости в поддиапазонах синего, зелёного, красного и ближнего инфракрасного электромагнитного излучения от растений картофеля мы наблюдаем в ближнем инфракрасном поддиапазоне.

Литература

1. Бекмухамедов Н. Э., Карабкина Н. Н. Изменение спектральных характеристик растений яровой пшеницы зараженных грибковыми болезнями // Сельское, лесное и водное хозяйство. 2013. № 10. URL: <https://agro.snauka.ru/2013/10/1169> (дата обращения: 26.01.2022).
2. Гагкаева Т. Ю., Гаврилова О. П., Левитин М. М., Новожилов К. В. Фузариоз зерновых культур // Защита и карантин растений. 2011. № 55. С. 69–120.
3. Каплин В. Г., Корнилов Т. В., Кочин Д. А., Федченко В. Г., Чичкова Е. Ф. Эшелонированный мониторинг посевов сельскохозяйственных культур в лесостепи Самарской области // Тр. Военно-косм. акад. им. А. Ф. Можайского. 2020. № 674. С. 195–199.
4. Корнилов Т. В. Перспективы применения беспилотной авиации // Защита и карантин растений. 2008. № 5. С. 48–49.
5. Михайликова В. В., Стребкова Н. С. Анализ рынка пестицидов в Российской Федерации // Тр. Кубанского гос. аграр. ун-та. 2021. № 91. С. 225–227. DOI: 10.21515/1999-1703-91-225-227.
6. Павлюшин В. А., Лысов А. К. Фитосанитарная безопасность агроэкосистем и дистанционный фитосанитарный мониторинг в защите растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 69–78. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-69-78.
7. Павлюшин В. А., Вилкова Н. А., Сухорученко Г. И., Тютерева С. Л., Нефедова Л. И. Новая парадигма защиты растений и ее концептуальное научно-практическое решение // Вестн. защиты растений. 2016. № 3(89). С. 126–127.
8. Рыжиков Д. М. Метод обработки мультиспектральных спутниковых данных для решения задач контроля зон произрастания борщевика Сосновского // Информационно-управляющие системы. 2017. № 6. С. 43–51. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.43.
9. Хютти А. В., Лазарев А. М., Чеботарь В. К. Серебристая парша картофеля // Сельскохозяйственные вести. 2021. № 1(124). С. 56–57.
10. Шпанев А. М., Голубев С. В. Фитосанитарная устойчивость агроэкосистем юго-востока ЦЧЗ // Материалы Всерос. съезда по защите растений «Фитосанитарная оптимизация агроэкосистем». СПб.: ВИЗР, 2015. Т. 1. С. 99–101.
11. Якушев В. П., Канаиш Е. В., Якушев В. В., Матвеев Д. А., Русаков Д. В., Блохина С. Ю., Петрушин А. Ф., Митрофанов Е. П. Новые возможности автоматизации процесса обнаружения внутривидовой неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 24–32. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32.

Phytosanitary design of agroecosystems and remote sensing

A. K. Lysov, V. A. Pavlyushin

All-Russian Institute of Plant Protection, Saint Petersburg, Pushkin 196608, Russia
E-mail: alysov@vizr.spb.ru

Phytosanitary stabilization of agroecosystems ensuring ecological safety for the environment, wildlife and humans is based on modern technologies for the rational and safe use of plant protection products, differentiation of their use, taking into account the spatial heterogeneity of the distribution of harmful objects in the field. The article discusses the modern paradigm of plant protection, based on the reduction of stress transformations of agroecosystems, optimization of crop cultivation technologies, reduction of selective effect of pesticides on pest populations using modern methods of remote phytosanitary monitoring, robotization and automation of technological processes for plant protection in precision farming systems. An analysis of the prospects for the use of modern methods of phytosanitary monitoring based on the use of satellite and unmanned aircraft remote sensing data is carried out. The results of research on remote methods of information acquisition based on reference spectrum libraries of reflection of healthy and sick plants, as well as plants damaged by pests, are presented. Analysis of multispectral images of healthy and diseased plants shows that there are reliable differences between them in the near-infrared subrange of radiation. These differences may be used for identifying sick plants at the initial stages of disease development. The results obtained will make it possible, in the near future, to create a basis for automatic processing and analysis of the remote sensing data of the underlying surface of agricultural lands for the presence of harmful objects and to determine phytosanitary risks, taking into account the quality of the crop and environmental safety.

Keywords: remote sensing, spectral characteristics of plants, weeds, variable rate application, means of protection, environmental safety

Accepted: 03.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-101-109

References

1. Bekmukhamedov N. E., Karabkina N. N., Spectral characteristics change of spring wheat plants infected by fungal diseases, *Agriculture, forestry and water management*, 2013, No. 10 (in Russian), available at: <https://agro.snauka.ru/2013/10/1169> (accessed 26.01.2022).
2. Gagkaeva T. Yu., Gavrilova O. P., Levitin M. M., Novozhilov K. V., Fusariosis of grain crops, *Zashchita i karantin rastenii*, 2011, No. S5, pp. 69–120 (in Russian).
3. Kaplin V. G., Kornilov T. V., Kochin D. A., Fedchenko V. G., Chichkova E. F., Echeloned monitoring of crops in the forest-steppe of the Samara region, *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo*, 2020, No. 674, pp. 195–199 (in Russian).
4. Kornilov T. V., Perspektivy primeneniya bespilotnoi aviatsii, *Zashchita i karantin rastenii*, 2008, No. 5, pp. 48–49 (in Russian).
5. Mikhailikova V. V., Strebkova N. S., Analysis of the pesticide market in the Russian Federation, *Trudy Kubanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*, 2021, No. 91, pp. 225–227 (in Russian), DOI: 10.21515/1999-1703-91-225-227.
6. Pavlyushin V. A., Lysov A. K., Phytosanitary safety of agro-ecological systems and remote phytosanitary monitoring in plant protection, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 69–78 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-69-78.
7. Pavlyushin V. A., Vilkova N. A., Sukhoruchenko G. I., Tyuterev S. L., Nefedova L. I., New paradigm of plant protection development and concept of its scientific and practical resolution, *Vestnik zashchity rastenii*, 2016, Vol. 3(89), pp. 126–127 (in Russian).
8. Ryzhikov D. M., Heracleum Sosnowskyi growth area control by multispectral satellite data, *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2017, No. 6, pp. 43–51 (in Russian), DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.43.
9. Khyutti A. V., Lazarev A. M., Chebotar' V. K., Silver scab potato, *Sel'skokhozyaistvennye vesti*, 2021, No. 1(124), pp. 56–57 (in Russian).
10. Shpanev A. M., Golubev S. V., Phytosanitary sustainability of agroecosystems of the southeast of the Central Chernozem region, *Fitosanitarnaya optimizatsiya agroekosistem* (Phytosanitary optimiza-

- tion of agroecosystems), Proc. All-Russia Science Congress, Saint Petersburg: VIZR, 2015, pp. 99–100 (in Russian).
11. Yakushev V. P., Kanash E. V., Yakushev V. V., Matveenko D. A., Rusakov D. V., Blokhina S. Yu., Petrushin A. F., Mitrofanov E. P., Advanced features of automated detection of within-field variability based on hyperspectral images and optical criteria, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 24–32 (in Russian), DOI: 1021046/2070-7401-2019-16-3-24-32.