

ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

СЕРЕДА ИГОРЬ ИГОРЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО
МОНИТОРИНГА НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БИОТЫ АГРОГЕОСИСТЕМ
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук по
специальности 24.04.01 «Геоэкология»

ЕРЕВАН – 2026

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՍԵՐԵԴԱ ԻԳՈՐ ԻԳՈՐԻ

**ԱԳՐՈԳԵՈՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԲԻՈՏԱՅԻ ՈՐՈՇ ՏԱՐՐԵՐԻ
ՏԱՐԱԾԱԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ՄՈՆԻԹՈՐԻՆԳԻ ՄԵԹՈԴԻԿԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄ
ՀԵՌԱԶՆՆՄԱՆ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ**

ԻԴ.04.01 «Երկրաբնապահպանություն» մասնագիտությամբ աշխարհագրական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2026

**Тема диссертации утверждена в
Центре эколого-ноосферных исследований НАН РА**

Научный руководитель:

к.г.н. О.В. Тутубалина

Официальные оппоненты:

д.г.н. О.Я. Саядян

к.г.н. А.С. Пилоян

Ведущая организация:

ГНО «Центр гидрометеорологии и мониторинга» МОС РА

Защита состоится 24 августа в 14:00 часов на заседании специализированного совета по специальности «Науки о Земле» (шифр 005), действующего при Ереванском государственном университете.

Адрес: Республика Армения, г. Ереван, 0025, ул. Алека Манукяна, 1, факультет географии и геологии ЕГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского государственного университета.

Автореферат диссертации разослан 10 июля 2026 г.

**Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат географических наук**

 **Т.А. Саргсян**

**Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ էկոլոգանոսֆերային
հետազոտությունների կենտրոնում**

Գիտական ղեկավար՝

աշխ. գիտ. թեկնածու Օ.Վ. Տուտուբալինա

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

աշխ. գիտ. դոկտոր Հ.Յ. Սայադյան

աշխ. գիտ. թեկնածու Ա.Ա. Փիլոյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

**ՀՀ ՇՄՆ «Հիդրոօդերևութաբանության
և մոնիթորինգի կենտրոն» ՊՈԱԿ**

Պաշտպանությունը կայանալու է 2026 թ. օգոստոսի 24-ին, ժամը 14:00-ին, Երևանի պետական համալսարանում գործող «Երկրագիտության» մասնագիտական խորհրդի (թվանիշ 005) նիստում:

Հասցեն՝ ՀՀ, ք. Երևան, 0025, Ալեք Մանուկյան 1, ԵՊՀ աշխարհագրության և երկրաբանության ֆակուլտետ:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Երևանի պետական համալսարանի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2026 թ. հուլիսի 10-ին:

Մասնագիտական խորհրդի

գիտական քարտուղար,

աշխ. գիտ. թեկնածու



Տ.Ա. Սարգսյան

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Под влиянием современных климатических процессов происходят изменения природной среды, затрагивающие особенности функционирования геосистем. Это выражается в изменении тепло- и влагообеспеченности, сезонной динамики природных процессов и пространственной неоднородности территорий. Для сельскохозяйственных земель такие изменения имеют особое значение, поскольку влияют на условия возникновения, распространения и развития заболеваний сельскохозяйственных культур, снижение урожайности которых становится одним из заметных последствий этих процессов.

При этом в системе управления сельскохозяйственными землями продолжает развиваться направление точного менеджмента сельскохозяйственных культур. Одним из наиболее эффективных методов получения информации для этого является дистанционное зондирование. Однако большая часть современных исследований в области точного земледелия с использованием космических или аэроснимков направлена на изучение абиотических стрессов растений. Но факторы биотического стресса также необходимо принимать во внимание, так как полный сельскохозяйственный менеджмент без этого осуществить проблематично.

Для Армении решение данного вопроса является стратегическим для продовольственной безопасности страны, ввиду ряда факторов, включая ограниченные природные ресурсы, уязвимость к климатическим изменениям, зависимость от импорта и геополитическую нестабильность. По данным Инспекционного органа по безопасности пищевых продуктов и Госсельхознадзора Республики Армения, в стране повсеместно используются пестициды для поддержания стабильных уровней урожая.

Также широкомасштабное использование пестицидов оказывает негативное воздействие на агрогеосистемы. Они загрязняют почву, нарушая микрофлору и снижая плодородие, особенно на горных склонах. Попадая в водные ресурсы, пестициды ухудшают качество питьевой воды и угрожают экосистемам рек и озер. Аэрозольное распространение химикатов загрязняет атмосферу, ухудшая качество воздуха и влияя на здоровье населения. Кроме того, снижение биоразнообразия из-за отравления нецелевых организмов нарушает экосистемный баланс.

В данной работе рассматривается методика пространственно-временного геоэкологического мониторинга состояния культурных растений как элементов биоты агрогеосистем Армении, направленная на распознавание заболеваний озимой пшеницы на основе ее спектрального образа. Такой подход позволяет учитывать особенности развития посевов в конкретной агрогеосистеме и определять участки с повышенным биотическим стрессом растений до внесения пестицидов, что является ключевым вопросом для точного земледелия. Тем самым, средства защиты растений возможно вносить только на участки, подверженные риску заболеваний, что позволит значительно снизить нагрузку на агрогеосистемы.

В качестве экспериментальной культуры в исследовании рассматривалась пшеница озимая, которая является одной из ключевых культур в Армении.

В работе используются различные данные дистанционного зондирования: наземное спектрометрирование, аэросъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), космические данные различного пространственного разрешения. Предполагается, что использование этих материалов на различных масштабных уровнях позволит комплексно подойти к решению задачи распознавания болезней сельскохозяйственных культур на ранних стадиях.

Цель и задачи. Цель работы состоит в разработке методики пространственно-временного геоэкологического мониторинга агрогеосистем с посевами пшеницы озимой, подверженным биотическому стрессу патогенов, на основе анализа динамики спектрального образа по данным дистанционного зондирования.

Достижение сформулированной цели предусматривает выполнение следующих задач:

1. Выявление особенностей временной динамики спектрального образа озимой пшеницы, пораженной патогенами, для оценки возможности прогнозирования развития патогенного фона по данным наземного, воздушного и спутникового спектрометрирования.
2. Разработка методики пространственно-временного мониторинга и раннего распознавания болезней культурных растений и связанных с этим патогенных организмов как элементов биоты агрогеосистем с использованием динамики спектрального образа на локальном уровне и ее апробация на территории Армении.
3. Оценка влияния климатических изменений в ландшафтных поясах Армении на риски возникновения патогенов пшеницы озимой.
4. Выявление особенностей размещения и фенологического развития зерновых культур в ландшафтных поясах Армении с учетом физико-географических особенностей территории.
5. Проведение геоэкологического районирования территории Армении для мониторинга проявлений биотических рисков пшеницы озимой на основе прогноза фенологического развития, данных дистанционного зондирования и физико-географических особенностей.

Объект исследования. Агрогеосистемы Армении и юга России, используемые для выращивания озимой пшеницы, и их биота.

Предмет исследования. Изменения состояния посевов озимой пшеницы под воздействием патогенов как элементов биотического стресса агрогеосистем, выявляемые на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли.

Основные положения, выдвигаемые на защиту:

1. Положительные отклонения от средних показателей КСЯ (коэффициента спектральной яркости) в ближнем инфракрасном диапазоне спектра на фенологических стадиях «выход в трубку» и ранних стадиях фенологической стадии «колошение», а также повышенное значение КСЯ в диапазонах 1445-1775 нм и 2050-2450 нм на поздних стадиях «колошения» озимой пшеницы, отражают пространственную неоднородность геосистем, подверженных усиленному негативному воздействию патогенного фона.
2. Спектральные характеристики, полученные с использованием наземных, воздушных и космических систем дистанционного зондирования, обеспечивают пространственно-временное количественное прогнозирование проявлений биотического стресса с учётом слабой, но значимой корреляции с динамикой развития отдельных болезней.
3. Сохранение современного тренда климатических изменений приводит к сокращению сроков прохождения фенологических фаз пшеницы озимой, в которые повышается риск развития болезней, при этом различия в физико-географических условиях регионов усиливают необходимость их оперативного мониторинга.
4. Разработана комплексная методика, включающая определение сроков мониторинга состояния посевов и геоэкологическое районирование территории

Армении, с составлением соответствующих картографических материалов, позволяющих учитывать фенологические фазы пшеницы и пространственно-временную неоднородность биотического стресса.

Научная новизна:

1. Впервые разработана автоматизированная методика бесконтактного наземного спектрометрирования растительных сообществ, включающая высокопериодичные измерения, синхронизацию получения значений солнечной радиации, оптимизацию измерений калибровочной панели и растительности, учет переотражения.
2. Впервые проведены мультиплатформенные (наземные, БПЛА и космические), мультивременные спектрометрические исследования для раннего определения признаков биотического стресса агроэcosystem на двух пространственных уровнях: локальном (в пределах малых экспериментальных участков и на уровне отдельных сельскохозяйственных полей), региональном (для всей территории Армении).
3. Разработана и апробирована методика раннего обнаружения и прогнозирования биотического стресса в агроэcosystem на примере посевов пшеницы озимой с использованием динамики спектрального образа, протестированная как в условиях однородных равнинных ландшафтов Краснодарского края (Россия), так и в условиях природного разнообразия Армении.
4. Впервые проведено геоэкологическое районирование агроэcosystem Армении, учитывающее фенологическое развитие культур, пространственно-временную неоднородность биотического стресса и рекомендации по мониторингу их состояния, на основе интеграции данных дистанционного зондирования с физико-географическими характеристиками территории.

Практическая значимость. Результаты данного исследования могут быть использованы для проведения работ по ранней диагностике биотического стресса в агроэcosystem с посевами пшеницы озимой в Армении и на юге России на региональном и локальном уровнях. Это может повысить своевременность и эффективность применения средств защиты растений для повышения продуктивности посевов и снижения нагрузки пестицидов на агроэcosystemы. Также материалы диссертации могут быть использованы для разработки аналогичных методов мониторинга других культур в разнообразных физико-географических условиях.

Фактический материал работы. В основе работы лежат авторские исследования, проводимые в 2016-2023 годах совместно с сотрудниками и студентами лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, а также сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института биологической защиты растений (ВНИИБЗР, г. Краснодар); работы, проводимые автором совместно с сотрудниками НИИ Центра эколого-ноосферных исследований Национальной академии наук Республики Армения в 2024 году. Исходными материалами являются данные наземного спектрометрирования в 2019-2023 гг., данные съемок с БПЛА 2020-2024 гг., космическая съемка 2022-2024 гг., результаты полевых работ и обработки данных дистанционного зондирования.

Исследование базируется на научно-методических принципах спектрометрирования и мониторинга сельскохозяйственной растительности, разработанных В.И. Рачкуликом, М.В. Ситниковой, получивших развитие в работах

М.В. Зими́на, Е.И. Голубево́й и О.В. Тутубалино́й; методах оценки патогенного фона сельскохозяйственных культур, предложенных Э.Ф. Смольяниновым и получивших развитие в работах Г.В. Волковой и О.Ю. Кремневой; методах геоэкологического картографирования, разработанных В.В. Докучаевым, Л.С. Бергом, А.А. Григорьевым, И.П. Герасимовым, Н.Л. Беручапвили; аэрокосмических методах географических исследований, разработанных Л.Е. Смирновым, Ю.Ф. Книжниковым, В.И. Кравцовой, И.А. Лабутиной. В рамках работы применяются спектрометрический, аэрокосмический, геоинформационный, картографический методы, методы математической статистики, математического анализа и машинного обучения.

Апробация работы. Материалы диссертации получены в рамках работ по гранту РФФИ № 19-416-2330043 р_а «Разработка научных и методических основ ранней диагностики основных возбудителей болезней пшеницы с использованием наземных гиперспектральных измерений и средств дистанционного мониторинга»; Государственному заданию № 075-00376-19-00 Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме № 0686-2019-0012; в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № ФГРН-2022-0001; а также в рамках исследовательского проекта № IRF-22_04 Комитета по высшему образованию и науке Министерства образования, науки, спорта и культуры Республики Армения.

Результаты исследования были представлены на авторитетных научных мероприятиях, включая XVII, XVIII, XX, XXI и XXII Открытые всероссийские конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2019, 2020, 2022, 2023, 2024), XI Международную научно-практическую конференцию "Biological Plant Protection as the Basis for the Stabilization of Agroecosystems" (Краснодар, 2020), международные семинары «Very High-Resolution Remote Sensing Data Acquisition and Processing for Environmental Monitoring» (Ереван, 2023) и «Very High-Resolution Remote Sensing Data for Environmental Mapping and Monitoring» (Ереван, 2024), «Ежегодной обзорной конференции» армянского академического сообщества (Ереван, 2024), международной конференции EGU General Assembly (Вена, 2025), Sevan Agritech Summit (Армения, 2025). По теме исследования опубликовано семь научных работ в изданиях, входящих в базы данных RSCI, Web of Science и Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, списка сокращений и терминов, приложений (16). Список использованной литературы включает 239 наименований. Работа изложена на 149 (218) страницах.

Благодарности. Автор выражает благодарность за неоценимую помощь, поддержку и мотивацию на написание диссертации научному руководителю О.В. Тутубалиной; сотрудникам ВНИИБЗР О.Ю. Кремневой, Р.Ю. Данилову, А.А. Курилову, К.Е. Гасиян за организацию эксперимента и помощи в обработке данных; Ю.А. Подушину за предоставление данных аэросъемки с БПЛА; М.В. Зимину за консультации и предварительную обработку данных дистанционного зондирования; сотрудникам НИИ Центра эколого-ноосферных исследований НАН РА за возможность работы над диссертацией в Армении и всестороннюю помощь; А. Ареяну за предоставление полигонов для сбора данных в Армении; а также А.А. Медведеву, П.Г. Асмарян и В.С. Мурадян за консультации и поддержку.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ПАТОГЕНОВ ПШЕНИЦЫ ОЗИМОЙ

Представлен обзор научной литературы, охватывающий развитие методов спектральных исследований для мониторинга растительности и выявления биотического стресса культурных растений, вызванного патогенными элементами агроэcosystem. Особое внимание уделено раннему распознаванию грибковых заболеваний пшеницы озимой. Также описан геоэкологический эффект внесения средств защиты растений в агроэcosystemы и описан опыт использования точного земледелия для снижения негативных эффектов от этого. Дана краткая историческая справка о природно-ресурсной и научной основе сельского хозяйства Армении. Описаны физико-географические условия, определяющие развитие болезней пшеницы озимой на территориях Западного Предкавказья и Армении. Сделан вывод, что, для создания эффективной методики раннего распознавания и мониторинга биотического стресса сельскохозяйственных культур, использование данных дистанционного зондирования, в том числе и гиперспектральных, является перспективным. Однако, создание этой методики подразумевает использование различных масштабных уровней и географических методов анализа, для обеспечения ее универсальности и применимости в условиях разнообразия природных зон Армении.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика пространственно-временного геоэкологического мониторинга агроэcosystem Армении и юга России в целях распознавания биотического стресса пшеницы озимой, вызванного патогенами, разрабатывалась в два этапа. На первом этапе были выявлены характерные признаки спектральной динамики озимой пшеницы, позволяющие различать здоровые и поражённые растения в гомогенных равнинных условиях (рис.1). На втором этапе оценивалась применимость подхода в условиях Армении и выполнялось геоэкологическое районирование территории для организации мониторинга на уровне страны (рис.2).



Рис.1. I этап. Исследование возможности раннего определения повышенного патогенного фона пшеницы озимой по динамике ее спектрального образа



Рис. 2. II этап. Разработка методики пространственно-временного мониторинга некоторых элементов биоты агроэкосистем Армении

Для реализации первого этапа был организован эксперимент с большими и контрольными посевами на опытных полях института биологической защиты растений ФГБНУ ФНЦБЗР (Краснодарский край, Россия). Участки были поражены патогенами желтой ржавчины, бурой ржавчины, мучнистой росы, септориоза и желтой пятнистости, также распространенными и в Армении. В течение периода активного развития патогенов (апрель-июнь) каждого сезона 2019-2023гг. на этих полях проводились высокочастотные (2-3 раза в неделю) наземные осмотры и учеты, наземное спектрометрирование (спектрорадиометром «ASD FieldSpec 3 Hi-Res»), съемка с БПЛА (Parrot SEQUOIA+) и космическая съемка (Dove Planet).

При проведении измерений особое внимание уделялось минимизации влияния неблагоприятных природных факторов, таких как переменная облачность и переотражение солнечной радиации. Процесс предварительной обработки данных был автоматизирован с использованием языка Python, геоинформационной системы QGIS и библиотеки GDAL. Для дальнейшей обработки к полученным данным применялись методы математической статистики и машинного обучения.

Выполнение второго этапа проведения работ началось с апробации результатов, полученных в Краснодарском крае на уровне отдельных полей в условиях среднегорного степного ландшафтного пояса Арагацотнской области. Данная территория была выбрана, так как подобный ландшафт является распространенным для выращивания пшеницы в Армении и хорошо подходит для эксперимента.

В качестве культуры рассматривалась яровая пшеница. Несмотря на то, что яровая и озимая пшеницы – это разные культуры, архитектура их растений, сроки наступления фенофаз после кущения, а также особенности динамики спектрального образа во многом совпадают. Также применение методики к яровой пшенице дает представление о ее универсальности и возможности использования и для других зерновых культур.

Для этого в период с 26 апреля по 18 июня 2024 года проводились схожие исследования, которые включали наземные осмотры, мультиспектральную съемку с использованием БПЛА (DJI Mavic 3M), данные космической съемки (Dove Planet). Для

определения границ зон неоднородности была проведена кластеризация трёх участков с использованием алгоритма k-means. Объединённые спектральные каналы серии снимков анализировались в Python с библиотекой GDAL.

Полученные результаты позволили понять особенности спектральной динамики посевов, подверженных биотическому стрессу. Однако эффективное применение данной методики зависит от физико-географических особенностей территории и связанных с этим сроков наступления ключевых для мониторинга фенологических стадий развития культур и благоприятности условий для возникновения биотического стресса, вызванного болезнями. В этой связи необходимо было разработать систему геоэкологического районирования, которую можно использовать как основу для рекомендаций при внедрении данного подхода.

Ключевым предварительным этапом являлась локализация зон устойчивого, многолетнего выращивания зерновых культур в пределах Армении. Это было необходимо, так как именно такие зоны являются целевыми участками для практического применения методики мониторинга, а также поскольку понимание пространственной структуры посевов позволяет оценивать ландшафтно обусловленные риски поражения и, как следствие, потенциальные экономические потери и геоэкологические риски в случае массового развития болезней. Эти зоны выделялись по сезонной динамике NDVI за 2000–2025 годы: пиксели пахотных земель с характерным ранним пиком и коротким вегетационным сезоном, устойчиво наблюдаемые в этот период, рассматривались как зоны выращивания зерновых (рис. 5). Пиксели, которые были классифицированы как «зерновые» культуры не менее чем в 20 сезонах в период с 2000 по 2025 гг. были определены как маска зерновых культур Армении и в дальнейшем использовались как территории, относительно которых производился расчет климатических и морфометрических показателей для оценки комплекса физико-географических условий, формирующих ландшафтную структуру территории, а также обуславливающие различия фенологического развития посевов пшеницы озимой.

Для оценки влияния природных факторов на особенности развития пшеницы озимой рассматривались такие элементы ландшафта, как морфометрия (высоты, углы склонов, экспозиция), почвы (типы, поясность) и климат (температура, осадки, солнечная радиация), почвенный покров. В качестве территориальных единиц анализа влияния физико-географических факторов на фенологическое развитие зерновых культур в исследовании использовались ландшафтные пояса. Они рассматриваются как крупные единицы природной дифференциации территории Армении, отражающие закономерную смену природных условий в связи с высотной поясностью. Фенологические изменения зерновых культур (такие, как даты начала и пика сезона) оценивались с использованием вегетационного индекса NDVI, который хорошо коррелирует с объемом фотосинтетически активной фитомассы, которая, в свою очередь, является одним из основных показателей развития растений.

Составление карты «Геоэкологическое районирование агрогеосистем Армении по степени риска развития патогенов озимой пшеницы» осуществлялось на основе данных 2018–2023 гг. Для этого были использованы полученные данные о фенофазах, влажности, осадках и температурах, данных о рельефе, ландшафтных поясах, с использованием агроклиматических справочников и ранее изданных картографических материалов. Параметризация данных осуществлялась на основе известных благоприятных условий развития конкретных патогенов пшеницы озимой,

которые в данном случае являются индикаторами состояния агрогеосистем.

Определение степени риска развития биотического стресса было выполнено по следующему условию. Если в период формирования болезни погодные условия каждого года с 2019 по 2023 соответствовали благоприятным для того или иного патогена, угроза оценивалась как высокая, или регулярная. Если она наблюдалась не каждый год, угроза оценивалась как средняя, или периодическая. Если в период с 2019 по 2023 благоприятных условий для развития патогена не возникала, уровень опасности для агрогеосистемы признавался низким.

Для оценки динамики этих рисков в контексте изменения климата в Армении были получены многолетние суточные климатические ряды по набору векторизованных пикселей с участками произрастания зерновых культур в период 2000-2025 гг. на основе данных погодного реанализа ERA5-Land (ECMWF). На основе этих данных строились тренды изменения условий среды в выделенных агрогеосистемах и в Армении в целом.

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ СТЕПЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПАТОГЕННОГО ФОНА НА ПОСЕВЫ ПШЕНИЦЫ ОЗИМОЙ ПО ДИНАМИКЕ ЕЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ОБРАЗА В РАВНИННЫХ УСЛОВИЯХ

В ходе экспериментов, проведённых в Краснодарском крае, была разработана и апробирована методика наземного спектрометрирования растительности для мониторинга её состояния. Эти исследования также позволили выявить ключевые особенности биотического стресса озимой пшеницы, вызванного патогенами. Было показано, что спектральные характеристики больных растений отличаются от здоровых, и это открывает возможность дистанционного мониторинга развития патогенов на посевах уже на ранних этапах, до появления визуально заметных симптомов заболевания.

Выявлено, что повышение или менее значительное снижение значений КСЯ в ближнем инфракрасном диапазоне спектра в фенофазы «выход в трубку» - «колошение» являются характерными для посевов, подверженных повышенному биотическому стрессу. Более благоприятные участки, как правило, характеризуются более равномерным снижением в этот период. Другие лимитирующие факторы урожайности, такие как недостаток влаги или питательных веществ, не имеют подобных особенностей (рис.3). Также повышенное значение КСЯ в диапазонах 1445-1775 нм и 2050-2450 нм на более поздних стадиях фенологической стадии «колошение» сигнализирует о наличии повышенного биотического стресса для посевов.

Данные снимков, полученных с БПЛА и космических спутников при условии высокой периодичности позволили провести оценку степени поражения участков, так как основные признаки проявления болезней в полевых условиях были связаны не с изменениями в узких диапазонах спектра, а с их динамикой во времени. При этом чувствительным являлся достаточно широкий спектральный диапазон 720-1200 нм. Поскольку исследования показали, что временная динамика для детектирования патогенов пшеницы озимой имеет большее значение, чем выбор спектрального

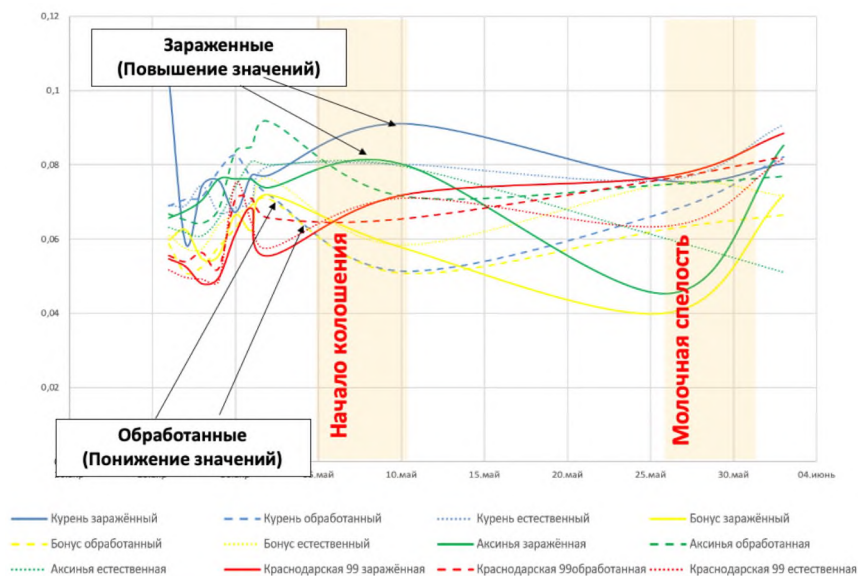


Рис.3. Графики временного изменения значений коэффициента спектральной яркости в канале 1600 нм на исследуемых сортах пшеницы озимой

диапазона, и по динамике БИК-диапазона патогенный фон распознается довольно уверенно, предлагается использование именно вегетационного индекса NDVI как наиболее простого и распространенного для большинства съемочных систем. Это позволит унифицировать использование различных съемочных систем и проще внедрить результаты проведенных исследований в практику точного земледелия.

Попытка заблаговременного определения уровня максимального биотического стресса показала, что прогнозирование по участкам с безотвальной обработкой почвы несколько более эффективно, чем по отвальным. Наземное спектрометрирование показало несколько лучшие результаты для мучнистой росы и желтой пятнистости в то время, как космическая съемка более эффективна для прогнозирования септориоза. Используемый в исследовании набор данных позволил подтвердить устойчивую зависимость между спектральным образом растительности и болезнями растений. Для измерений, соответствующих дню максимального возможного развития патогенов, удалось добиться относительно высоких показателей R^2 при моделировании их развития. Тем не менее, прогнозирование уровня максимального поражения за 1–2 недели до этого события дает значительно более низкие, хотя и значимые результаты.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПАТОГЕННЫМ ФОНОМ ПШЕНИЦЫ ОЗИМОЙ В ПРИРОДНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ АРМЕНИИ

В ходе исследования яровой пшеницы на участках с. Неркин Саснашен обработка данных показала выраженную неоднородность полей, изменяющуюся во времени, что

указывает на влияние не только почвенных и агротехнических, но и биотических факторов: болезней и сорной растительности. Пространственное распределение выделенных зон совпадает с результатами наземных наблюдений.

Результаты кластеризации опытных полей позволили выделить 4–5 классов участков, различающихся по временным изменениям спектральных показателей растительности. Аналогичные операции с данными спутников PlanetScope выявили схожие закономерности, но с меньшей чувствительностью и точностью локализации, чем при съёмке с БПЛА. Это связано с ограничениями пространственного разрешения и облачностью в ключевые периоды. Интерпретация классов подтверждена полевыми наблюдениями (рис.4).

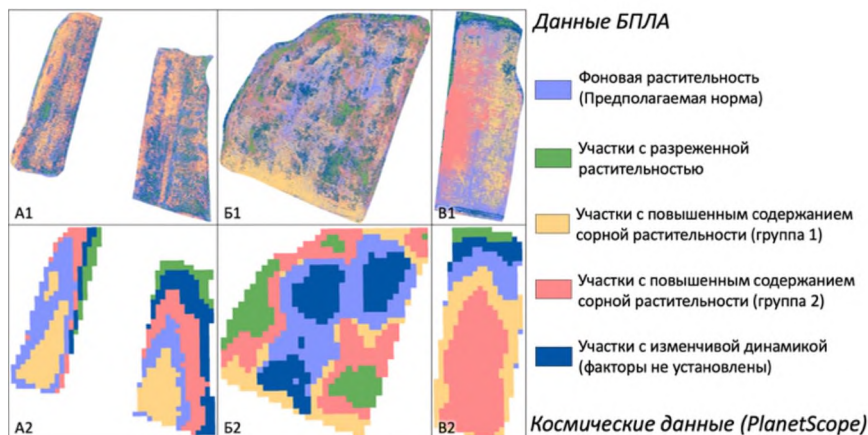


Рис.4. Сопоставление результатов кластеризации участков под Неркин Саснашен по данным БПЛА-съёмки (A1,B1,B1) и космической съёмки (A2,B2,B2)

Было определено, что для надёжного мониторинга биотического стресса растений, вызванного патогенами, необходима относительная гомогенность поля и высокое пространственное разрешение данных. Множественность факторов, влияющих на спектральный образ растений, значительно осложняет задачу раннего выявления болезней. Разработанная методика позволяет выделять 4–5 классов территорий с разным спектральным поведением, число которых может варьировать в зависимости от природных и агротехнических условий.

Алгоритм выделения территорий с устойчивым выращиванием зерновых культур на территории Армении был применен ко всем сезонам 2000–2025 гг. В результате для каждого года построены карты их вероятного размещения. Полученные оценки свидетельствуют о сравнительно стабильном пространственном распределении зерновых культур в Армении на протяжении рассматриваемого периода. Наиболее устойчивые зоны приурочены к горно-степным ландшафтам межгорных вулканотектонических котловин марзов Ширак, Арагацотн, Котайк и Гегаркуник, а также к долине р. Воротан (рис.5).

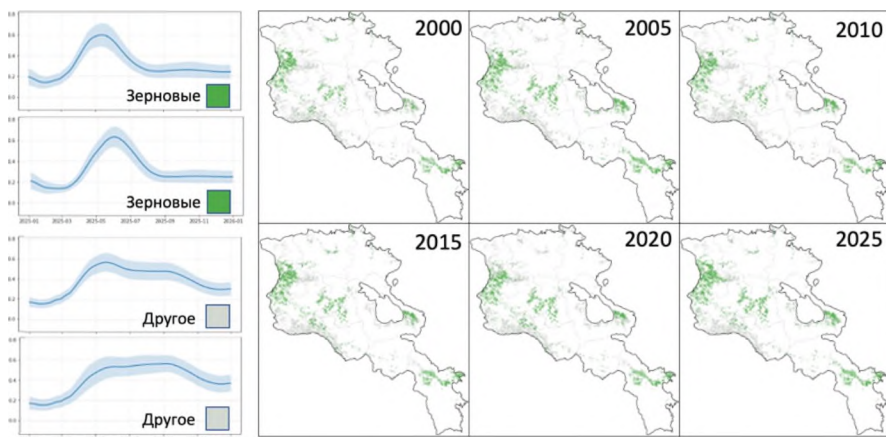


Рис.5. Результаты детектирования зерновых культур по данным дистанционного зондирования

Оценка влияния компонентов природной среды показала, что среди морфометрических факторов статистически значимое влияние на фенологическое развитие зерновых культур оказывает только высота. Крутизна и экспозиция склонов значимых различий не выявили. С повышением высоты от 400 до 2400 м начало и пик вегетации сдвигаются на более поздние сроки, а продолжительность роста фитомассы сокращается из-за задержки накопления активных температур и более короткого теплого периода. Пиковые значения NDVI снижаются до 1000–1200 м, затем возрастают, что связано с орошением долинных полей, смешиванием пикселей с другими культурами и зелеными насаждениями, а также ростом увлажненности с высотой. Основная часть зерновых выращивается на высотах 1400–2000 м, где условия влагообеспеченности и суммы активных температур наиболее благоприятны. Большая часть посевов зерновых приурочена к горно-степному ландшафтному поясу с преобладанием горных карбонатных, слаборазвитых черноземов и горно-флювиальных почв. Фенологическое поведение зерновых в целом соответствует высотной поясности: на горно-степных почвах вегетация начинается позже, но сезон остается достаточным для вызревания, а пик развития остается высоким.

В большинстве регионов Армении расхождения оценок даты начала мониторинга состояния озимой пшеницы (фенологическая стадия «выход в трубку») от справочных данных не превышают 10 дней. При этом модель корректно учитывает природные особенности: например, в горах Арагаца фенофаза наступает позже. Наибольшие расхождения отмечены в Араратской долине (Баграмян, Армавир, Вагаршапат, Масис, Арташат, Веди), а также в Апоцке, Дилижане, Иджеване, Вайке, Сисиане и Мегри. Динамика NDVI показывает, что в Араратской долине максимум приходится на июль–август, что свидетельствует о незначительных площадях зерновых.

На основе данных о потенциальной угрозе для посевов, материалов Атласа сельского хозяйства Армянской ССР, метеоинформации и спутниковых данных была создана карта «Геоэкологическое районирование агроэосистем Армении по степени риска развития патогенов озимой пшеницы» (рис.5).

определяющих возможность развития основных листостеблевых грибковых заболеваний озимой пшеницы. Дополнительно были составлены таблицы (табл.1) и тематические карты, показывающие степень риска их распространения. На картах нанесены изолинии среднесезонных сроков наступления фазы «выход в трубку», соответствующие оптимальному периоду для начала спектрометрического мониторинга. Также обозначены основные автодороги и предложены пункты фитосанитарного наблюдения вдоль них. Их создание поможет снизить риск переноса инфекционного материала между зонами с разными сроками развития посевов, тем самым снизив геоэкологические риски для Армении.



Рис. 7. Динамика рисков возникновения патогенов пшеницы озимой при сохранении текущего тренда климатических изменений в Армении

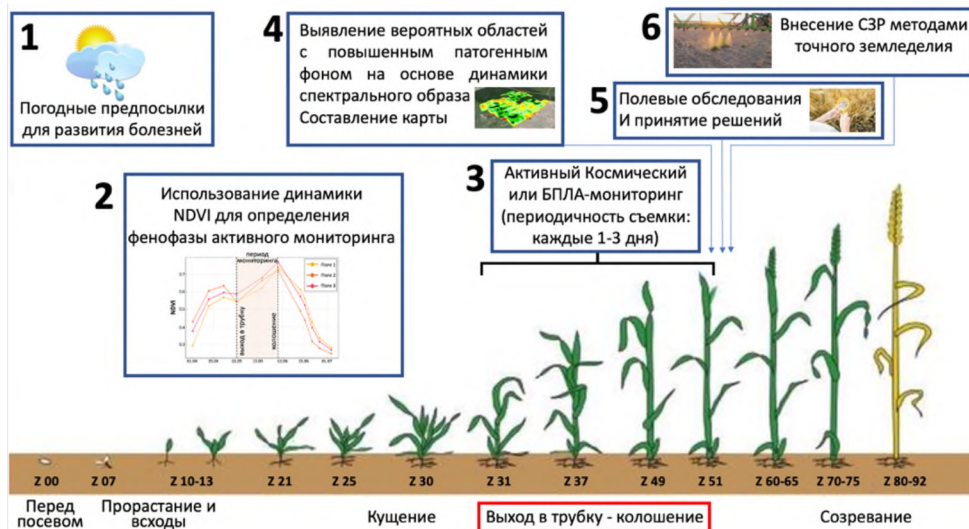


Рис. 8. Общая предлагаемая схема мониторинга заболеваний пшеницы озимой на основе спектральных данных дистанционного зондирования

В результате обработки метеорологических данных были получены тренды, указывающие на аридизацию климата Армении. В большинстве случаев это приводит к сокращению периода активного развития факторов биотического стресса и смещению оптимальных сроков мониторинга на более ранние даты. Показатели NDVI подтверждают этот тренд: период роста надземной фитомассы сократился на 2 дня, максимум вегетации наступает на 8 дней раньше, начало сезона — на 1 день раньше, а максимальный NDVI вырос на 0,016. При сохранении этих изменений доля посевов в среднегорных луговых степях может увеличиваться вследствие повышения благоприятности условий выращивания. Однако именно в среднегорных ландшафтных поясах Армении повышается риск биотического стресса агрогеосистем вследствие развития патогенов пшеницы озимой, в то время как для низкогорных ландшафтных поясов он снижается (рис.7).

Для мониторинга агрогеосистем с посевами пшеницы озимой, подверженным биотическому стрессу патогенов, предлагается последовательность шагов. Сначала оцениваются погодные условия и устанавливается, благоприятствуют ли они развитию патогенов. Определяются оптимальные сроки мониторинга на основе многолетних и текущих данных о погоде, рельефе и посевах. Временные рамки уточняются с использованием сезонной динамики NDVI как индикатора фенологических фаз. Для мониторинга территории Армении доступно достаточное количество снимков Landsat, Sentinel и MODIS. На этапе активного наблюдения для детектирования зон с повышенным патогенным фоном рекомендуется применять БПЛА с мультиспектральными камерами, обеспечивающими пространственное разрешение не хуже 1 м. Съёмку желательно проводить каждые 1–3 дня в период выхода в трубку – колошения, с последующим построением карт зон риска. Эти зоны подлежат валидации агрономами, которые подтверждают наличие и тип биотического стресса. Составляются технические карты для нужд точного земледелия, позволяющие снизить внесение пестицидов в агрогеосистемы. Эффективная реализация методики требует взаимодействия специалистов по дистанционному зондированию и агрономов, обеспечивающих интерпретацию и управление полем (рис.8).

ВЫВОДЫ

Проведенная работа позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Спектральные данные дистанционного зондирования показали высокую информативность для раннего выявления патогенов сельскохозяйственных культур, но для построения прогностических моделей и анализа пространственно-временной динамики заболеваний требуется использование географических методов, включая картографический и ландшафтно-экологический анализ.
2. Комплексное использование наземных, воздушных (БПЛА) и космических съемочных систем позволяет детектировать негативное воздействие патогенного фона на посевы озимой пшеницы на ранних стадиях ее развития в БИК-диапазоне спектра при условии высокой периодичности съёмки (не реже 2 раз в неделю).
3. Для инфицированных растений в фенологические фазы «выход в трубку» – «колошение» (Z 40–Z 50) наблюдается рост спектральной яркости в БИК-диапазоне спектра. Повышенное значение спектральной яркости в диапазонах 1445-1775 нм и 2050-2450 нм на более поздних этапах фенологической стадии «колошение» (Z 51) также отражает пространственную неоднородность агрогеосистем и сигнализирует о наличии повышенного патогенного фона.

4. Наиболее информативными длинами волн для прогнозирования заболеваний по спектральным данным дистанционного зондирования являются 443, 490 и 865 нм; наименее — 610, 665 и 705 нм. Прогнозирование было эффективнее на участках с безотвальной обработкой. Максимальные значения R^2 в день пика заболевания составили: мучнистая роса — 0.46, септориоз — 0.37, желтая пятнистость — 0.7, общий патогенный фон — 0.64.
5. Прогнозирование сроков наступления ключевых фенофаз озимой пшеницы, значимых для геоэкологического мониторинга, становится возможным благодаря анализу пиковых значений NDVI в сочетании с метеорологическими данными и характеристиками рельефа, что обеспечивает погрешность, не превышающую 10 дней.
6. Составлена карта агрогеосистем Армении, характеризующихся разной степенью геоэкологического риска, с рекомендациями по проведению геоэкологического мониторинга.
7. Современный тренд аридизации климатических условий геосистем Армении приводит к сокращению сроков прохождения фенологических фаз зерновых культур, наиболее уязвимых к грибковым заболеваниям, что требует повышения оперативности их мониторинга.
8. При сохранении текущих климатических изменений снижается риск биотического стресса агрогеосистем вследствие развития листостебельных грибковых патогенов пшеницы озимой в низкогорных ландшафтных поясах и повышается в среднегорных ландшафтных поясах Армении.
9. Раннее обнаружение биотического стресса пшеницы озимой и прогнозирование степени его развития в агрогеосистемах возможно на основе комплексного мониторинга спектрального образа растительности с применением наземных, воздушных и космических платформ в условиях физико-географического разнообразия территории.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Разработанная методика имеет ряд ограничений:

1. Для территории Армении разрабатываемая методика не тестировалась для специально инфицированных площадок, в различных агрогеосистемах, на основе многолетних данных и для других сортов и культур, что ограничивает её универсальность и повышает возможные проявления факторов и условий, не выявленных на этапе текущих исследований. Возможным решением являются дальнейшие многолетние исследования особенностей динамики спектрального образа перспективных сельскохозяйственных культур, пораженных патогенами, с учетом геоэкологических особенностей агрогеосистем и факторов гетерогенности сельскохозяйственных полей.
2. Ключевым условием работоспособности методики является высокая периодичность данных дистанционного зондирования, получение которых может быть ограничено вследствие погодных условий, отсутствия требуемого оборудования и других возможных факторов. Возможным решением является исследование потенциала использования всех доступных данных космической съемки для увеличения периодичности получения данных, а также обеспечение исполнителей БПЛА с мультиспектральными камерами.
3. Выполнение работ по мониторингу сельскохозяйственных культур с

использованием предложенной методики является трудоемким процессом и требует от исполнителя высокой квалификации в области дистанционного зондирования, геоэкологии и агрономии. Возможным решением является создание центра компетенций, в обязанности которого будут входить разработка подробных методических рекомендаций и справочников по предлагаемой методике, автоматизация процессов обработки, обучение квалифицированных кадров и их дальнейшая информационная поддержка.

Список публикаций по теме диссертации

1. **Серeda И.И.** (2026). Оценка рисков развития патогенов пшеницы озимой в ландшафтных поясах Армении с учетом климатических изменений. *Proceedings of the Yerevan state university*, 60(1). <https://doi.org/10.46991/PYSUC.2026.60.1.050>
2. **Sereda, I.** (2024). Monitoring the Onset of Phenological Phases “Stem Elongation” and “Heading” of Winter Wheat in the Republic of Armenia Using Remote Sensing Methods. *AgriScience and Technology*, 317–325. <https://doi.org/10.52276/25792822-2024.4-317>
3. Danilov, R., Kremneva, O., **Sereda, I.**, Gasiyan, K., Zimin, M., Istomin, D., & Pachkin, A. (2024). Study of the Spectral Characteristics of Crops of Winter Wheat Varieties Infected with Pathogens of Leaf Diseases. *Plants*, 13(14), 1892. <https://doi.org/10.3390/plants13141892>
4. **Sereda, I.**, Danilov, R., Kremneva, O., Zimin, M., & Podushin, Y. (2023). Development of Methods for Remote Monitoring of Leaf Diseases in Wheat Agroecosystems. *Plants*, 12(18), 3223. <https://doi.org/10.3390/plants12183223>
5. Kremneva, O. Yu., Danilov, R. Yu., **Sereda, I. I.**, Tutubalina, O. V., Pachkin, A. A., & Zimin, M. V. (2023). Spectral characteristics of winter wheat varieties depending on the development degree of *Pyrenophora tritici-repentis*. *Precision Agriculture*, 24(3), 830–852. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09976-2>
6. Kremneva, O. Yu., Tutubalina, O. V., **Sereda, I. I.**, Danilov, R. Yu., Zimin, M. V., & Kurilov, A. A. (2020). Studies of changes in the spectral characteristics of winter wheat varieties depending on the degree of infection with pathogens. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa*, 17(3), 149–161. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-149-161>
7. Kremneva, O., Danilov, R., Tutubalina, O., **Sereda, I.**, & Artem, K. (2020). Designing a methodological concept for the diagnosis of early development of the main wheat diseases pathogens. *BIO Web of Conferences*, 21, 00002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202100002>

ՍԵՐԵԴԱ ԻԳՈՐ ԻԳՈՐԻ ԱՄՓՈՓՈՒՄ

Գյուղատնտեսական հողերի օգտագործման ոլորտում ճշգրիտ երկրագործությունը դառնում է առավել կարևոր ուղղություն: Հեռազննումը հանդիսանում է այդ նպատակների համար առավել արդյունավետ գործիքներից մեկը: Միևնույն ժամանակ, ժամանակակից կլիմայական գործընթացների ազդեցության ներքո տեղի են ունենում բնական միջավայրի փոփոխություններ, որոնք անդրադառնում են ագրոգեոհամակարգերի ֆունկցիոնալ առանձնահատկությունների վրա: Սա ազդում է ագրոհամակարգերի բիոտայի տարրերի առաջացման, տարածման և զարգացման պայմանների վրա: Այդ գործընթացների առավել նկատելի հետևանքներից մեկը բերքատվության նվազումն է:

Հայաստանում կենսաբանական սթրեսի խնդրի լուծումը, պարենային անվտանգության տեսանկյունից, ռազմավարական կարևոր նշանակություն ունի՝ հաշվի առնելով երկրի բնական ռեսուրսների սահմանափակությունը, կլիմայի փոփոխության նկատմամբ խոցելիությունը և ներմուծումից կախվածությունը:

Թունաքիմիկատների լայնածավալ կիրառումը, որը գյուղատնտեսական մշակաբույսերի հիվանդությունների նկատմամբ սովորական արձագանք է, բացասաբար է ազդում հողերի և էկոհամակարգերի վրա: Այն նվազեցնում է հողի բերրիությունը, հատկապես լեռնալանջերերին, և վնաս հասցնում կենսաբազմազանությանը:

Սույն աշխատանքում ներկայացվում է ագրոգեոհամակարգերի բիոտայի տարր հանդիսացող մշակովի բույսերի վիճակի տարածաժամանակային գեոէկոլոգիական մոնիթորինգի մեթոդիկա, որն ուղղված է աշնանացան ցորենի հիվանդությունների բացահայտմանը՝ դրա սպեկտրալ պատկերի հիման վրա: Նման մոտեցումը հնարավորություն է տալիս հաշվի առնել ցանքատարածությունների զարգացման առանձնահատկությունները ագրոգեոհամակարգում և որոշել բույսերի բարձր բիոտիկ սթրես ունեցող հատվածները մինչև թունաքիմիկատների կիրառումը՝ այդպիսով զգալիորեն նվազեցնելով ագրոգեոհամակարգերի ծանրաբեռնվածությունը:

Այս հետազոտությունը սկսվել է Ռուսաստանի արևմտյան նախակովկասի հարթավայրի տափաստանային լանդշաֆտում, ապա փորձարկվել և իր հիմնական զարգացումն ստացել է Հայաստանի գեոհամակարգերի բազմազանության պայմաններում:

Աշխատանքի նպատակն է մշակել ախտաձիններով կենսաբանական սթրեսի ենթարկված աշնանացան ցորենի ցանքատարածություններով ագրոգեոհամակարգերի տարածաժամանակային գեոէկոլոգիական մոնիթորինգի մեթոդիկա՝ հիմնված հեռազննման տվյալներով սպեկտրալ պատկերի դինամիկայի վերլուծության վրա: Առաջադրված նպատակին հասնելու

համար նախատեսվում են հետևյալ խնդիրների լուծում. (1) Ախտածիններով ախտահարված աշնանացան ցորենի սպեկտրալ պատկերի ժամանակային դինամիկայի առանձնահատկությունների բացահայտում՝ վերգետնյա, օդային և արբանյակային սպեկտրաչափական տվյալների հիման վրա ախտածին ֆոնի զարգացման կանխատեսման հնարավորության գնահատման համար, (2) Մշակովի բույսերի հիվանդությունների և դրանց հետ կապված ախտածին օրգանիզմների՝ որպես ագրոգեոհամակարգերի բիոտայի տարր, վաղ հայտնաբերման և տարածաժամանակային մոնիթորինգի մեթոդիկայի մշակում՝ տեղային մակարդակում սպեկտրալ պատկերի դինամիկայի կիրառմամբ, և դրա փորձարկումը Հայաստանի տարածքում, (3) Հայաստանի լանդշաֆտային գոտիներում կլիմայական փոփոխությունների, աշնանացան ցորենի ախտածինների առաջացման ռիսկերի վրա, ազդեցության գնահատում, (4) Հայաստանի լանդշաֆտային գոտիներում հացահատիկային մշակաբույսերի տեղաբաշխման և ֆենոլոգիական զարգացման առանձնահատկությունների բացահայտում՝ հաշվի առնելով տարածքի ֆիզիկաաշխարհագրական պայմանները: Հիմնական արդյունքները ներառում են հետևյալը. (1) հիմնավորվել է գեոէկոլոգիական մոտեցման բարձր արդյունավետությունը ագրոգեոհամակարգերի վիճակի տարածաժամանակային մոնիթորինգի համար՝ բացասական բիոտիկ ազդեցության պայմաններում: Ցամաքային, անօդաչու և արբանյակային նկարահանումների սպեկտրային տվյալները հաստատել են դրանց բարձր արդյունավետությունը ագրոգեոհամակարգերում աշնանացան ցորենի բիոտիկ սթրեսի դրսևորումների վաղ հայտնաբերման գործում: Այս նպատակների համար առավել տեղեկատվական է գտնվել մոտինֆրակարմիր տիրույթը, որն արտացոլում է ցանքատարածությունների ֆիզիոլոգիական վիճակի փոփոխությունները: Մոնիթորինգի համար որպես կրիտիկական ժամանակահատված սահմանվել է «խողովակակալման» փուլից մինչև «հասկակալման» փուլն ընկած միջակայքը, երբ բույսերի սպեկտրային արձագանքը առավել զգայուն է բիոտիկ սթրեսի գործոնների ազդեցության նկատմամբ: Հիվանդությունների կանխատեսումը բացահայտել է նշանակալի, թեև չափավոր, կորելյացիաներ ինչպես ցանքատարածությունների ընդհանուր սթրեսային վիճակի, այնպես էլ առանձին հիվանդությունների հետ: Հայաստանի Արագածոտնի մարզի Ներքին Սասնաշեն բնակավայրում իրականացված դաշտային փորձարկումները հնարավորություն են տվել առանձնացնել մինչև հինգ սպեկտրային դաս, ներառյալ՝ ախտածին ֆոնով պայմանավորված բիոտիկ սթրեսի զարգացման բարձր ռիսկ ունեցող հատվածները, ինչը հաստատում է սպեկտրային տվյալների կիրառելիությունը ագրոգեոհամակարգերի տարածաժամանակային գեոէկոլոգիական մոնիթորինգի համար: (2) NDVI-ի համադրումը եղանակային և տեղագրական տվյալների հետ հնարավորություն է տվել մինչև 10 օր ճշգրտությամբ կանխատեսել հիմնական ֆենոլոգիական փուլերը: Հայաստանի լանդշաֆտային գոտիների վերլուծությունը ցույց է տվել

հացահատիկային մշակաբույսերի զարգացման առանձնահատկությունները՝ կախված ֆիզիկաաշխարհագրական պայմաններից: Այս տվյալների հիման վրա կազմվել է Հայաստանի ագրոգեոհամակարգերի գեոէկոլոգիական շրջանացման քարտեզ՝ ըստ աշնանացան ցորենի ախտածինների զարգացման դիսկի աստիճանի: Կլիմայական միտումների վերլուծությունը ցույց է տվել միջին լեռնային տարածքները, որպես աշնանացան ցորենի ցանքերով ագրոգեոհամակարգերում բիոտիկ ռիսկերի հնարավոր աճի գոտի:

Ստացված արդյունքները կարող են կիրառվել ագրոգեոհամակարգերում աշնանացան ցորենի մոնիթորինգի և դրա բիոտիկ սթրեսի ախտահիշների որոշման համար ինչպես տեղական, այնպես էլ ռեգիոնալ մակարդակներում: Սա կարող է բարձրացնել թունաքիմիկատների կիրառման միջոցառումների ժամանակին իրականացումն ու արդյունավետությունը, ինչը դրական ազդեցություն կունենա գեոհամակարգերի վրա: Առաջարկվող մոտեցումը կարող է հարմարեցվել նաև այլ գյուղատնտեսական մշակաբույսերի մոնիթորինգի համար՝ տարբեր բնական պայմաններում: Հետազոտության արդյունքները հրապարակվել են յոթ գիտական աշխատություններում՝ երկու հոդված՝ RSCI ցանկում և հինգ հոդված՝ Web of Science և Scopus շտեմարաններում:

SEREDA IGOR IGOREVICH

SUMMARY

Precision agriculture is becoming an increasingly important direction in the use of agricultural land. Remote sensing is one of the most effective tools for this purpose. At the same time, modern climatic processes are causing changes in the natural environment, which affect the functioning of agroecosystems. These changes influence the conditions for the emergence, spread, and development of biotic elements within agroecosystems. One of the noticeable consequences of these processes is a decrease in crop yield.

In Armenia, addressing biotic stress is a strategically important issue for food security, given the country's limited natural resources, vulnerability to climate change, and dependence on imports. The large-scale use of pesticides, which is a common response to crop diseases, has a negative impact on soils and ecosystems. It reduces soil fertility, especially on mountain slopes, and damages biodiversity. This study considers a methodology for spatio-temporal geoeological monitoring of the condition of cultivated plants as elements of the biota of Armenia's agroecosystems. The methodology is aimed at detecting winter wheat diseases based on its spectral pattern. This approach makes it possible to consider the specific development of crops within a particular agroecosystem and to identify areas with increased plant biotic stress before pesticide application, thereby significantly reducing the pressure on agroecosystems. The study was initiated in the plain-steppe landscape of the Western Ciscaucasia in Russia and was then tested and further developed under the diverse geosystem conditions of Armenia.

The aim of the dissertation is to develop a methodology for spatio-temporal geoeological monitoring of agroecosystems with winter wheat crops affected by pathogen-related biotic stress, based on the analysis of spectral response dynamics using remote sensing data. To achieve this aim, the following tasks were addressed: (1) to identify the temporal dynamics of the spectral response of winter wheat affected by pathogens in order to assess

the possibility of predicting biotic stress development using ground-based, airborne and satellite spectrometry data; (2) to develop a methodology for spatio-temporal monitoring and early detection of crop diseases and associated pathogenic organisms as components of agroecosystem biota, using spectral response dynamics at the local level, and to test this methodology in Armenia; (3) to assess the influence of climatic changes in the landscape belts of Armenia on the risks of winter wheat pathogen occurrence; (4) to identify the spatial distribution and phenological development of cereal crops in the landscape belts of Armenia, taking into account the physical-geographical characteristics of the territory; and (5) to carry out geoecological zoning of Armenia for monitoring biotic risks in winter wheat based on phenological development forecasts, remote sensing data and physical-geographical characteristics.

The main results are as follows. (1) The study substantiated the high efficiency of the geoecological approach to spatio-temporal monitoring of agroecosystem conditions under negative biotic influence. Spectral data from ground-based, unmanned aerial vehicle and satellite surveys confirmed their high effectiveness for the early detection of biotic stress in wheat within agroecosystems. The near-infrared spectral range was found to be the most informative for this purpose, as it reflects changes in the physiological state of crops. The critical monitoring period was defined as the interval from the stem elongation stage to the heading stage, when the spectral response of plants is most sensitive to the influence of biotic stress factors. Disease prediction showed significant, although moderate, correlations both with the general level of crop stress and with individual diseases. Field trials in Nerkin Sasnashen, Aragatsotn Province, Armenia, made it possible to distinguish up to five spectral classes, including areas with an increased risk of biotic stress development caused by the pathogenic background. This confirms the applicability of spectral data for spatio-temporal geoecological monitoring of agroecosystems. (2) The integration of NDVI with weather and topographic data made it possible to predict key phenological stages with an accuracy of up to 10 days. The analysis of Armenia's landscape belts revealed specific features of cereal crop development depending on physical-geographical conditions. These data were used to create a geoecological zoning map of Armenia's agroecosystems according to the risk level of winter wheat pathogen development. The analysis of climatic trends indicated that middle-mountain areas may become a zone of potentially increasing biotic risks in agroecosystems with winter wheat crops.

The obtained results can be applied to the monitoring of winter wheat in agroecosystems and to the detection of signs of its biotic stress at both local and regional levels. This can improve the timeliness and effectiveness of pesticide application measures, which may have a positive effect on geosystems. The proposed approach can also be adapted for monitoring other agricultural crops under different natural conditions.

The results of the study have been published in seven scientific papers: two of them were indexed in the RSCI list and five were indexed in Web of Science and Scopus.

A stylized, handwritten signature in dark ink, likely belonging to the author or a representative of the institution.