

На правах рукописи

Дубровин Константин Николаевич



Разработка методики мониторинга пахотных земель Дальнего Востока
на основе данных дистанционного зондирования Земли и машинного обучения

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Вычислительном центре Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор фармацевтических наук Степанов Алексей Сергеевич.

Официальные оппоненты:

Алтынцев Максим Александрович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела;

Беленко Виктор Владимирович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», профессор кафедры космического мониторинга и экологии.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космических исследований Российской академии наук» (г. Москва).

Защита диссертации состоится 7 октября 2025 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»:

<https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/dubrovinkonstantin-nikolaevich/>

Автореферат разослан 25 августа 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 23.06.2025. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 68.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Эффективное использование земель сельскохозяйственного назначения является важным условием поступательного развития агропромышленного комплекса (АПК) на Дальнем Востоке России. В соответствии со стратегией социально-экономического развития Дальнего Востока и Байкальского региона, до 2025 г. планируется повысить роль экспортной составляющей в производстве зерновых и зернобобовых культур, для чего необходимо решить задачу планирования необходимых посевных площадей.

На текущий момент, во-первых, существующие федеральные и региональные базы данных о землях сельскохозяйственного назначения (ЗСН) содержат достаточно большое количество некорректных данных, во-вторых, собственники и арендаторы ЗСН, в том числе иностранные предприятия, зачастую предоставляют недостоверную информацию, в-третьих, для Дальнего Востока характерно наличие значительного объема заброшенных пахотных земель, что не отражено на существующих картах. При этом наземная визуальная экспертиза – это достаточно затратное мероприятие, а в ретроспективном периоде – невозможное. Решение вопросов сбора и обработки данных для макрорегиона осложняется большой площадью территории, что приводит к необходимости обработки разновременных спутниковых снимков и построению композитов. Дополнительную сложность для исследователей создают особенности климата южной части Дальнего Востока (большое количество облачных дней в ходе периода вегетации), что делает особенно актуальной задачу построения непрерывных временных рядов спутниковых данных.

Разработка методических подходов для распознавания посевов сельскохозяйственных культур с использованием машинного обучения и моделирование вегетационных циклов их развития является актуальной задачей в связи с отсутствием комплексных исследований в этой области, учитывающих особенности региона. Спутниковый мониторинг позволяет как восстанавливать сведения о севообороте на сельскохозяйственных полях (что особенно важно для регионов Дальнего Востока, где наблюдается острый дефицит архивных данных), так

и создавать качественные карты пахотных земель в оперативном режиме (в течение сельскохозяйственного сезона). Высокую значимость для науки имеет изучение возможности использования для классификации пахотных земель, наряду с оптическими, также и данных радиолокации, что способствует решению ряда проблем, связанных с облачными явлениями.

К актуальным направлениям исследований относится разработка принципов построения моделей раннего прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на основе методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на муниципальном и региональном уровне. Построение регрессионных моделей с использованием данных ДЗЗ позволяет оценивать урожайность сельскохозяйственных культур уже в середине сельскохозяйственного сезона. Оперативное получение детальных карт пахотных земель и раннее прогнозирование урожайности способствует получению предварительных оценок валового сбора сельскохозяйственных культур, финансовых рисков, заблаговременному планированию посевных площадей и мер поддержки сельскохозяйственных производителей.

Степень разработанности темы. Основными отечественными научными и образовательными организациями, ведущими исследования в области спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель, являются: Институт космических исследований РАН, Агрофизический научно-исследовательский институт, Почвенный институт имени В. В. Докучаева, Сибирский государственный университет гео-систем и технологий, Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Институт вычислительных технологий СО РАН, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. Значительный вклад в разработку методов ДЗЗ и использования спутниковых данных в мониторинге растительных покровов внесли ученые: Алтынцев М. А., Барталев С. А., Беленко В. В., Братков В. В., Гук А. П., Лупян Е. А., Малинников В. А., Савин И. Ю., Терехов А. Г., Чернов А. В., Якушев В. П., Huete A. R., Mandal D., McNairn H., Rouse J. W., Sakamoto T.

Цель и задачи исследования. Цель исследования заключается в разработке методики мониторинга пахотных земель с применением дешифрирования

данных ДЗЗ, которая позволяет восстанавливать сведения и контролировать соблюдение севооборотов, а также оперативно прогнозировать урожайность.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

- выполнить аналитический обзор современных технологий получения, обработки и использования данных ДЗЗ для решения задач сельскохозяйственного мониторинга;

- разработать алгоритм автоматизированного распознавания посевов с оценкой точности для основных сельскохозяйственных культур Дальнего Востока с использованием как оптических, так и радиолокационных данных;

- создать алгоритм раннего распознавания посевов сельскохозяйственных культур на основе мультиспектральных данных и методов машинного обучения;

- разработать принципы построения моделей для раннего прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур (на примере сои) с использованием спутниковых и метеорологических данных и оценить точность полученных моделей.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования выступают снимки, полученные в результате спутниковой съёмки сельскохозяйственных угодий. Предметом исследования является методика сельскохозяйственного мониторинга на основе машинного обучения и данных ДЗЗ.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем: разработан способ построения непрерывных временных рядов композитов NDVI посредством аппроксимации с использованием ряда Фурье для проведения многолетних исследований пахотных земель на обширной территории; впервые для Дальнего Востока построены «эталонные» кривые сезонного хода оптических и радиолокационных вегетационных индексов для основных сельскохозяйственных культур; разработан алгоритм раннего распознавания посевов основных сельскохозяйственных культур Дальнего Востока с использованием многолетних данных ДЗЗ и методов машинного обучения, позволяющий повысить оперативность построения карт пахотных земель; разработаны принципы построения моделей для раннего прогнозирования урожайности на районном уровне с использованием спутниковых и метеорологических данных, способствующие получению заблаговременного прогноза с низкой ошибкой.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке подходов к использованию многолетних данных ДЗЗ для распознавания основных сельскохозяйственных культур Дальнего Востока в течение сельскохозяйственного сезона. Также предложены принципы построения регрессионных моделей для раннего прогнозирования урожайности с использованием значений NDVI и климатических характеристик.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная методика может использоваться для автоматизированного создания масок сельскохозяйственных культур, выявления неиспользуемой пашни уже в середине сельскохозяйственного сезона, а также с высокой точностью оценивать урожайность сельхозкультур на уровне муниципальных районов. Разработанные модели на основе машинного обучения позволят оперативно строить карты пахотных земель, а также оценивать площади посевов сельскохозяйственных культур и неиспользуемой пашни на муниципальном и региональном уровне. Также автоматизированное распознавание посевов сельскохозяйственных культур может быть использовано для восстановления сведений о севообороте в предыдущие сельскохозяйственные сезоны.

Методология и методы исследования. В качестве методологической основы использованы методы обработки спутниковых изображений для получения значений вегетационных индексов, регрессионного анализа, машинного обучения. Эмпирической основой исследований служили снимки, полученные с космических аппаратов Terra, Sentinel-2A/B и Sentinel-1B (2010–2023 гг.), средние значения урожайности сои в районах Дальнего Востока (за период с 2010 по 2019 г.), данные наземных наблюдений о севообороте на полях сельскохозяйственных предприятий Хабаровского района, маски пахотных земель и метеорологические данные, полученные из сервиса Vega-Science.

Положения, выносимые на защиту:

– на основе аппроксимированных временных рядов индексов вегетации и методов машинного обучения разработан алгоритм распознавания посевов основных сельскохозяйственных культур Дальнего Востока. Разработанный

алгоритм позволяет восстанавливать сведения о севообороте пахотных земель, осуществлять картографирование в ретроспективном периоде, уточнять границы полей, выявлять неиспользуемые земли (соответствует п. 10, 12 паспорта научной специальности);

– предложен алгоритм раннего распознавания посевов сельскохозяйственных культур Дальнего Востока с использованием сокращенных аппроксимированных временных рядов индекса NDVI и машинного обучения. Разработанный алгоритм способствует оперативному построению карт пахотных земель, позволяет контролировать соблюдение севооборотов и корректировать посевную стратегию (соответствует п. 10, 12 паспорта научной специальности);

– сформулированы принципы, построены и апробированы модели раннего прогнозирования урожайности на районном уровне, основанные на предварительном расчете максимума временных рядов NDVI с использованием параметров аппроксимирующих функций. Предложенные модели обеспечивают возможность оперативной оценки урожайности в ходе вегетационного сезона с точностью свыше 90 % для планирования валового сбора сельхозкультур (соответствует п. 10 паспорта научной специальности).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует областям исследования: 10 – Развитие и применение методов обработки и анализа больших данных, формируемых средствами ДЗЗ, в том числе с применением машинного обучения и искусственного интеллекта, для решения задач геофизики, геодинамики, климатологии, океанологии и др. наук о Земле; 12 – Теория и методы автоматизации фотограмметрических измерений и дешифрирования изображений, в том числе на основе систем искусственного интеллекта, с целью картографирования и формирования ГИС различной тематической направленности паспорта научной специальности 1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Результаты выполненных исследований представлены: на Международной научно-прак-

тической конференции «Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса» (16–17 июля 2020 г., Хабаровск); I и III Международных конференциях по цифровизации сельского хозяйства и органическому производству (7–9 июня 2021 г., Санкт-Петербург; 5–7 июня 2023 г., Санкт-Петербург); VI и VII Международных научно-практических конференциях «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления» (14–16 сентября 2021 г., Хабаровск; 11–13 сентября 2023 г., Хабаровск); III Всероссийской научной конференции с международным участием «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве» (16–17 сентября 2021 г., Санкт-Петербург); XIX, XX, XXI и XXII Международных конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (15–19 ноября 2021 г., Москва; 14–18 ноября 2022 г., Москва; 13–17 ноября 2023 г., Москва; 11–15 ноября 2024 г., Москва); Международной научной конференции «Агрофизический институт: 90 лет на службе земледелия и растениеводства» (14–15 апреля 2022 г., Санкт-Петербург); IX Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (13–16 сентября 2022 г., Красноярск); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы, тенденции и перспективы научно-инновационного обеспечения агропромышленного комплекса» (18–19 апреля 2023 г., Благовещенск); Национальной научно-практической конференции «Чтения памяти доктора сельскохозяйственных наук, профессора Александра Петровича Ващенко» (20 марта 2024 г., Уссурийск); XX Международной выставке и научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2024» (15–17 мая 2024 г., Новосибирск).

Разработанная методика применяется в Хабаровском Федеральном исследовательском центре ДВО РАН для картографирования пахотных земель и прогнозирования урожайности сои в районах Дальнего Востока.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты представлены в 26 научных работах, 3 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата

наук; 7 статей входят в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы на ЭВМ и 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Структура диссертации. Общий объем составляет 148 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 163 наименования, содержит 17 таблиц, 52 рисунка, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит информацию об актуальности темы работы, в нём сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, соответствие диссертации паспорту специальности, приведена методологическая база исследования, указаны основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов исследования.

В *первом* разделе диссертации раскрыто понятие сельскохозяйственного мониторинга и приведены его основные задачи; представлены сведения о современных спутниковых аппаратах, данные с которых могут применяться для решения задач сельскохозяйственного мониторинга; представлена информация об основных вегетационных индексах, используемых для анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур; проведен анализ существующих методов применения данных ДЗЗ для решения задач сельскохозяйственного мониторинга.

В России функционирует единая федеральная информационная система о землях сельскохозяйственного назначения (ЕФИС ЗСН), содержащая информацию о сельскохозяйственных полях муниципальных образований Российской Федерации. Для формирования карт сельскохозяйственных угодий используются как данные, собранные в результате наземных наблюдений, так и полученные посредством внедряемого автоматизированного распознавания пахотных земель и сельскохозяйственных культур на основе машинного обучения. Проведенный анализ масштабных карт пахотных земель показал, что их точность сравнительно невысока и сильно варьируется в различных регионах.

Выявлено, что в ЕФИС ЗСН сведения о севообороте полей для некоторых муниципальных районов Дальнего Востока либо отсутствовали, либо содержали неточную информацию: например, данные по Хабаровскому району в 2021 и 2022 гг. не были внесены в систему, информация о севообороте в 2019–2020 гг. была не вполне точной. При этом границы полей не уточнялись на протяжении многих лет, что определило их неактуальность в настоящее время. Все вышеизложенное обусловило потребность в создании региональных карт пахотных земель для Дальнего Востока с информацией о севообороте не только в текущем, но и ретроспективном периоде.

В России исследования, посвященные созданию масок сельскохозяйственных культур с использованием данных ДЗЗ, проводились преимущественно в европейской части РФ. Отличные от регионов Центрального, Сибирского, Поволжского и прочих федеральных округов сортовой состав, сроки сева и уборки урожая затрудняли применение существующих критериев распознавания посевов сельскохозяйственных культур для российского Дальнего Востока. Для Дальнего Востока РФ исследования имели локальный характер (для отдельных муниципалитетов или субъектов РФ).

Для идентификации посевов сельскохозяйственных культур по окончании вегетационного сезона на современном этапе применяются временные ряды значений вегетационных индексов, сформированных с использованием данных ДЗЗ. Не менее важной представляется задача распознавания сельскохозяйственной культуры уже по ходу сезона. Другой ключевой задачей является раннее прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на муниципальном и региональном уровнях. Решение этих задач – необходимое условие для проведения оперативного мониторинга пахотных земель. Количество исследований, посвященных оперативному распознаванию культур и прогнозированию их урожайности, пока не так велико, и зачастую сводится к использованию одного или нескольких космических снимков. Применение временных рядов позволяет существенно повысить потенциальные возможности сельскохозяйственного мониторинга.

Таким образом, анализ существующих научных работ показал, что разработка методики использования данных ДЗЗ и машинного обучения для усовершенствования системы мониторинга пахотных земель на уровне муниципальных образований Дальнего Востока (с учетом региональных особенностей) действительно необходима.

Во *втором* разделе диссертации описан алгоритм распознавания посевов сельскохозяйственных культур с использованием данных ДЗЗ и машинного обучения. Распознавание посевов является ключевым элементом предложенной методики мониторинга пахотных земель (рисунок 1) и осуществляется по окончании сезона (для верификации информации, уточнения границ, выявления неоднородностей и т. д.), в ходе сезона (для корректировки посевной стратегии, оценки состояния посевов и т. д.), по многолетним данным (ретроспективное восстановление сведений о севообороте). Созданные маски отдельных культур могут использоваться при раннем прогнозировании урожайности (для оценки валового сбора культуры на уровне муниципального образования, что способствует принятию оперативных решений, связанных с уточнением финансовых рисков планирования импортно-экспортных операций).



Рисунок 1 – Методика мониторинга пахотных земель с использованием данных ДЗЗ и методов машинного обучения

Распознавание посевов, являющееся основой для построения карт пахотных земель, сводится к следующим основным этапам: получение и предобработка спутниковых данных, сбор и верификация информации о границах и севообороте отдельных полей, формирование непрерывных временных рядов индекса вегетации, создание датасетов, машинное обучение, формирование масок сельскохозяйственных культур, оценка точности классификации (кросс-валидация).

Для распознавания посевов сельскохозяйственных культур использовались данные 2019–2023 гг. для пахотных земель Хабаровского района. Границы полей и информация о севообороте в 2021–2023 гг. были получены из разных источников (сельхозпроизводители, научные организации) и верифицированы экспертно, в ходе визуального осмотра. Данные 2019–2020 гг. были подготовлены на основе информации ЕФИС ЗСН.

По спутниковым снимкам Sentinel-2A/2B уровня обработки 2A с 17 по 43 календарную неделю (с конца апреля по конец октября) каждого года производился расчет значений NDVI для всех пикселей сельскохозяйственных полей области исследования. Для пикселей отдельных полей для каждой даты съемки проводилась 2 σ -фильтрация, неоднородные значения удалялись из выборки. Для всех пикселей были сформированы временные ряды значений NDVI, впоследствии рассчитывались недельные композиты для компенсации эффекта межгодового смещения дат спутниковой съемки и сокращения объема используемой информации.

Большое количество спутниковых снимков с плотным облачным покровом привело к разрывности временных рядов композитов. Для восстановления отсутствующих значений предложено аппроксимировать временные ряды с использованием двух первых членов разложения в ряд Фурье.

В ходе исследования были построены и изучены временные ряды значений NDVI для основных культур Дальнего Востока (сои, гречихи, кукурузы, зерновых культур, многолетних трав), а также для неиспользуемой пашни (на рисунке 2 представлены средние значения сезонного хода NDVI по данным 2023 г. для рассмотренных классов растительности). Показана связь между фазами роста и развития посевов и изменением значений NDVI.

Автоматизированный классификатор был создан с использованием метода гистограммного градиентного бустинга. Выбор этого метода обусловлен его высокой гибкостью и скоростью в сочетании с высокой точностью классификации.

Временные ряды NDVI за 2019–2023 гг., прошедшие процедуру фильтрации и восстановленные с использованием рядов Фурье, были объединены в датасеты. Для построения карт пахотных земель в 2021–2023 гг. создавалось по два датасета: полный сезонный и сокращённый (с 17 по 29 календарную неделю) для решения задачи раннего распознавания культур. Оценка качества распознавания культур проводилась с использованием 10-кратной кросс-валидации.

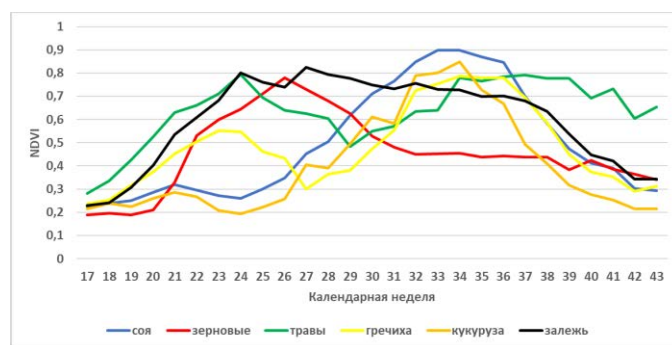


Рисунок 2 – Усреднённый сезонный ход NDVI для пахотных земель Хабаровского района в 2023 г.

Для решения задачи восстановления сведений о севообороте на полях Хабаровского района и уточнения их границ в 2019–2020 гг. сокращенные временные ряды для классов «залежь», «соя», «зерновые культуры», и «многолетние травы» за 2021–2023 гг. были объединены в одно обучающее множество. В качестве тестового множества выступали сокращённые временные ряды NDVI за 2019–2020 гг. Дополнительно была проведена оценка площади, занимаемой посевами сои, а также площади неиспользуемой пашни для каждого сельскохозяйственного сезона. Полученные результаты сравнивались с данными официальной статистики (Росстат) и показателями, представленными в ЕФИС ЗСН.

В *третьем* разделе представлен анализ полученных результатов распознавания посевов сельскохозяйственных культур и неиспользуемых земель.

Как показала проведенная кросс-валидация, общая точность разработанной модели на основе гистограммного градиентного бустинга оказалась высокой: в 2021 г. она составила 97,3 %, в 2022 г. и 2023 г. – 96,3 %. При этом значения метрики F1 для сои в этот период находились на уровне 0,97–0,98, для залежи варьировались от 0,94 до 0,99. Для зерновых культур и многолетних трав значения F1 в 2022–2023 гг. были в диапазоне от 0,94 до 0,97. На рисунке 3 представлена созданная при использовании полных временных рядов NDVI карта пахотных земель для исследуемых полей Хабаровского района в 2023 г.

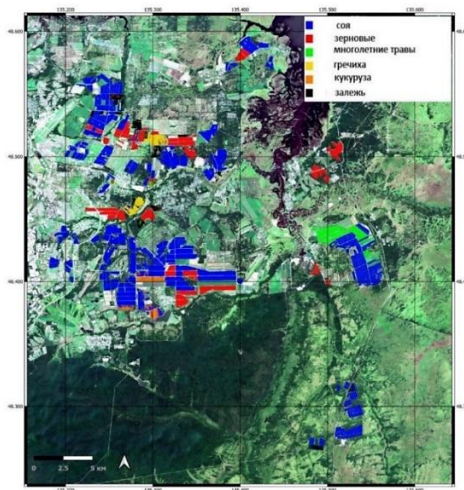


Рисунок 3 – Карта пахотных земель (Хабаровский район, 2023 г.)

Применение сокращенных временных рядов для решения задач оперативного мониторинга показало следующие результаты: точность распознавания хоть и снизилась на несколько процентов, но тем не менее осталась на достаточно высоком уровне: 92,2 % в 2021 г., 88,6 % в 2022 г., 88 % в 2023 г. Анализируя результаты исследования, можно сделать вывод о том, что сокращённые временные ряды могут успешно использоваться для построения масок сои (F1 варьировалась от 0,92 до 0,97) и заброшенных земель (F1 варьировалась от 0,90 до 0,97). Точность распознавания зерновых и многолетних трав также находилась на достаточно высоком уровне (F1 в 2022 и 2023 г. превысила 0,8).

С использованием модели ранней классификации пахотных земель для восстановления сведений о севообороте в 2019–2020 гг. была получена оценка

площади посевов сои для Хабаровского района (около 9 220 га для каждого года). Это значение существенно меньше показателей в отчетах Росстата и ЕФИС (почти на 30 %) в 2019 г. В 2020 г. рассчитанная по разработанной модели площадь посевов сои оказалась на 14 % меньше в сравнении с показателем Росстата и на 30 % меньше площади сои из отчёта ЕФИС.

Оценочная площадь неиспользуемой пашни в Хабаровском районе составила 5 132 га в 2019 г. и 4 659 га в 2020 г. Несмотря на незначительное уменьшение залежи в 2020 г., площадь неиспользуемой пашни превысила 25 % от общей заявленной площади пахотных земель, что подтвердило проблемы с актуальностью существующих карт пахотных земель Хабаровского края. Связано это как с ошибками занесения данных в информационные системы, так и с неоднородностью посевов и неактуализированными границами. На рисунке 4 представлен пример попиксельного распознавания поля по данным ДЗЗ в 2019 г. (тип культуры – соя в ЕФИС ЗСН). Показано, что заявленная площадь поля в ЕФИС примерно в два раза превышала фактическую площадь сева сои.

Дополнительно проведено исследование возможности использования данных радиолокации, качество которых не зависит от освещенности и облачных явлений, для распознавания сои, овса и залежных земель в Хабаровском крае на основе временных рядов радиолокационного вегетационного индекса с двойной поляризацией (DpRVI) и метода RF в 2021 г. Также произведена оценка возможности использования классификатора, обученного на рядах DpRVI полей Хабаровского края, при распознавании тех же культур и неиспользуемых земель в Амурской области.

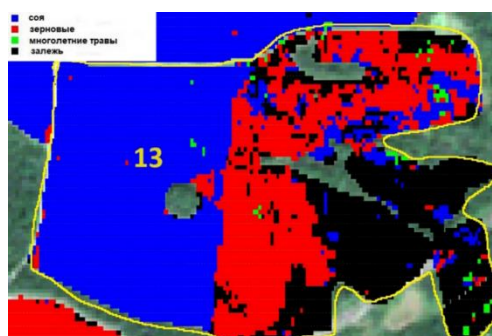


Рисунок 4 – Результат работы алгоритма распознавания на одном из полей (Хабаровский район, 2019 г.; границы поля ЕФИС обозначены желтым)

В результате анализа было обнаружено сходство вегетационных кривых для двух регионов, а также различия в сезонном ходе DpRVI между классами. Общая точность распознавания для Хабаровского края составила 82 %, а в Амурской области – 83,1 %. На рисунке 5 представлены примеры распознавания посевов на полях Амурской области. Распознавание на основе DpRVI может применяться как для идентификации культур (рис. 5, а) и уточнения границ (рис. 5, б), так и для выявления залежных земель (рис. 5, в) и поиска неоднородностей (рис. 5, г).

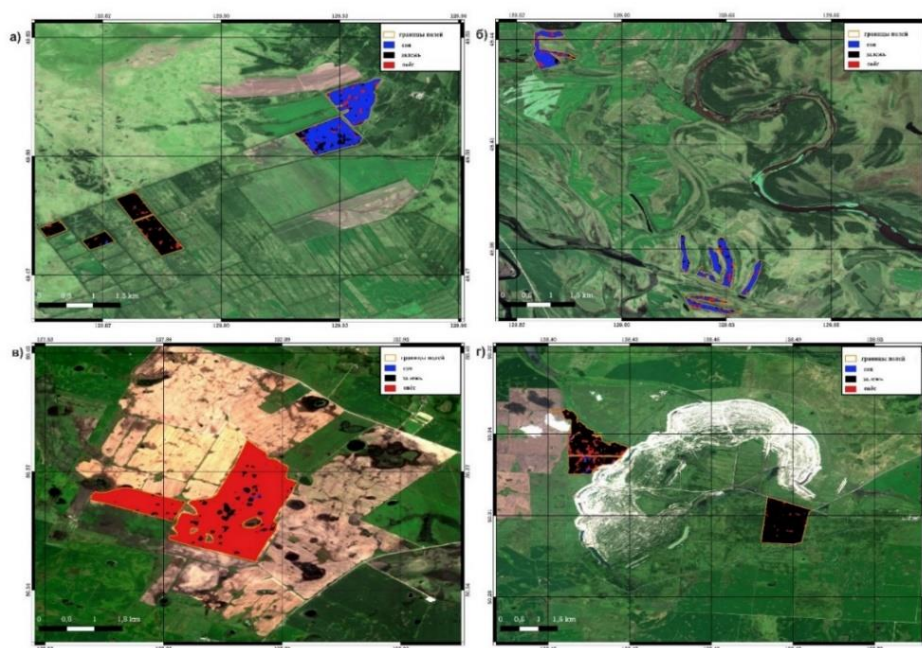


Рисунок 5 – Примеры работы алгоритма распознавания в Амурской области:

- а) поля с соей (выделены синим цветом) и залежь (выделена чёрным цветом),
- б) поля с соей, в) поля с овсом (обозначены красным цветом),
- г) неиспользуемая пашня

В *четвертом* разделе описаны основные принципы и построены модели раннего прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур для муниципальных образований Дальнего Востока с использованием данных ДЗЗ и метеорологических характеристик.

Для исследования возможности построения регрессионной модели прогнозирования урожайности сои был выбран Хабаровский район Хабаровского края.

В качестве спутниковых данных использовались недельные композиты MODIS NDVI за 15–42 календарные недели (третья декада апреля – вторая декада октября) 2010–2019 гг. Для обоснования возможности использования маски пахотных земель для прогнозирования урожайности сои была построена модель пахотных земель, учитывающая соотношение посевных площадей сельскохозяйственных культур района. Было выявлено, что максимальные значения NDVI (2014–2018 гг.) для пашни в Хабаровском районе сильно коррелируют с максимальными значениями NDVI для полей сои ($R = 0,73$).

Максимум NDVI и пять метеорологических характеристик рассматривались в качестве предикторов регрессионной модели. В построенной итоговой модели (после проведения корреляционного и регрессионного анализа) для расчета урожайности использовались только две переменные: максимум NDVI и количество дней со среднесуточной температуры свыше 10°C в ходе сезона. Регрессионное уравнение, характеризующее зависимость урожайности сои в Хабаровском районе от включенных в модель предикторов, построенное по данным 2010–2018 гг., имело следующий вид:

$$y = -8,24 + 9,39x_1 + 0,036x_2, \quad (1)$$

где x_1 – максимум NDVI;

x_2 – количество дней со среднесуточной температуры свыше 10°C .

Коэффициент детерминации модели (R^2) составил 0,72. Все коэффициенты уравнения регрессии значимы ($p < 0,05$). Ошибка по результатам кросс-валидации модели (за 2010–2018 гг.) составила 7,8 %. Ошибка прогнозирования урожайности сои на 2019 год с использованием модели (1) составила 6,3 %. На рисунке 6 представлена динамика реальной и расчётной урожайности.

На практике управление агропромышленным комплексом региона часто требует как можно более раннего прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур. Для решения этой задачи был предложен следующий подход, заключающийся в расчете предикторов уравнения (1) в ходе сезона :

аппроксимация сезонного хода NDVI пахотных земель муниципального района с использованием функции Гаусса и двойной логистической (DL) функции; расчет параметров функций за 5 лет, предшествующих прогнозируемому году; прогнозирование текущего максимума NDVI. Значение второго независимого параметра (количества дней со среднесуточной температуры свыше 10°C) может быть рассчитано путем прибавления к уже достигнутому значению показателя на момент прогнозирования числа оставшихся календарных дней до недели предполагаемого максимума. Для оценки возможности, точности и сроков прогнозирования урожайности сои с использованием расчётного максимума NDVI были выбраны два муниципальных образования Еврейской Автономной Области (ЕАО) – Ленинский и Октябрьский муниципальные районы.

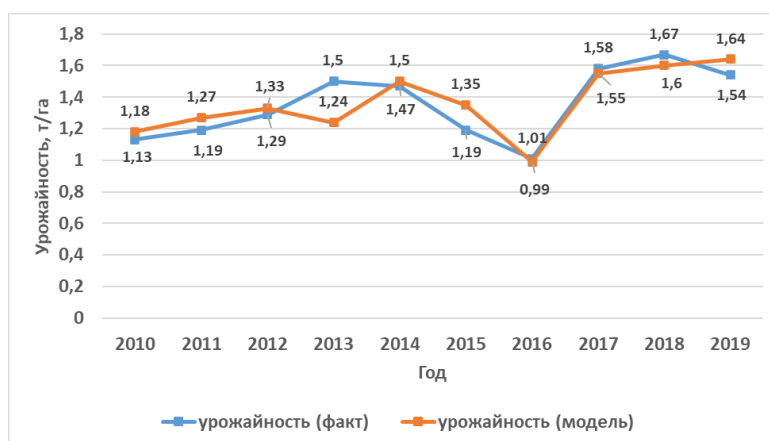


Рисунок 6 – Реальная и расчётная урожайность сои в Хабаровском районе в период с 2010 по 2019 г.

Для Ленинского и Октябрьского районов ЕАО были построены уравнения линейной регрессии, аналогичные уравнению (1). Ошибка прогнозирования урожайности сои составила 4,5 % для Ленинского района и 6,8 % для Октябрьского района. В таблице 1 представлены значения средней многолетней относительной ошибки (APE) в различные недели при раннем прогнозировании урожайности с использованием функции Гаусса и DL функции. В ходе проведения двухфакторного дисперсионного анализа с применением апостериорного критерия Тьюки было установлено, что использование при раннем прогнозировании функции

Гаусса позволяет значительно уменьшить ошибку прогнозирования по сравнению с функцией DL ($p < 0,05$). Для обоих районов при приближении к максимуму точность предсказания урожайности выросла. Уже на 27 неделе (первая декада июля), за 5–6 недель до достижения максимума возможно прогнозирование с точностью свыше 90 %.

Таблица 1 – Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для прогнозирования урожайности сои с использованием двух аппроксимирующих функций в двух районах ЕАО

Фактор	Значение фактора	APE, %							
		Неделя прогнозирования максимума							
		25	26	27	28	29	30	31	32
Функция	Гаусса	9,5 ± 5,0	7,0 ± 3,5	4,3 ± 2,2	3,4 ± 2,2	3,1 ± 1,6	2,4 ± 1,1	1,9 ± 1,7	0,7 ± 0,4
	DL	17,1 ± 5,3	11,7 ± 3,0	8,2 ± 3,3	6,6 ± 2,9	6,3 ± 2,6	4,3 ± 1,3	3,0 ± 0,7	1,9 ± 0,9
p		p<0,05	p<0,05	p<0,05	p<0,05	p<0,05	p<0,05	p>0,05	p>0,05
Район	Ленинский	13,5 ± 6,5	8,5 ± 3,9	5,3 ± 3,0	4,9 ± 2,4	4,6 ± 2,0	3,9 ± 1,3	2,4 ± 1,1	1,5 ± 0,9
	Октябрьский	13,1 ± 5,3	10,2 ± 3,3	7,2 ± 3,1	5,1 ± 3,3	4,7 ± 2,9	2,7 ± 1,3	2,5 ± 1,6	1,1 ± 0,6
p		p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05

Для дополнительной оценки качества модели раннего прогнозирования была проведена оценка урожайности сои в трех других соеопроизводящих районах Дальнего Востока. Для тестирования модели с использованием функции Гаусса в каждом регионе было выбрано по одному муниципальному образованию. В Хорольском районе Приморского края ошибка прогнозирования урожайности за 4 недели до максимума (во второй декаде июля) составила около 10 %, а при расчёте урожайности за 1–3 недели до достижения максимума опустилась ниже 5 %. В Тамбовском районе Амурской области прогнозирование с ошибкой около 9 % также возможно во второй декаде июля (за 3 недели до максимума). В Вяземском районе Хабаровского края максимум NDVI был достигнут уже на 30 неделе. При этом ошибка прогнозирования, начиная с первой декады июля (за 3 недели до достижения максимума), также становилась меньше 9 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведённого диссертационного исследования разработана методика мониторинга пахотных земель на основе дешифрирования данных ДЗЗ, позволяющая контролировать соблюдение севооборотов и восстанавливать сведения о сельскохозяйственных полях, а также прогнозировать урожайность сельскохозяйственных культур. При решении поставленных задач получены следующие результаты.

– Выполнен анализ существующих методов сельскохозяйственного мониторинга с использованием данных ДЗЗ, доказана необходимость разработки методов распознавания культур и прогнозирования урожайности, учитывающих региональные особенности Дальнего Востока; выявлена проблема недостаточности и недостоверности данных о севообороте в регионах Дальнего Востока, показана необходимость восстановления сведений о землях сельскохозяйственного назначения; описаны методы распознавания посевов сельскохозяйственных культур с использованием данных ДЗЗ и машинного обучения.

– Предложен способ построения непрерывных временных рядов композитов вегетационного индекса NDVI с использованием аппроксимации рядами Фурье; разработаны алгоритмы распознавания посевов основных сельскохозяйственных культур Дальнего Востока с использованием как данных оптических диапазонов (рядов индекса NDVI), так и данных радиолокации (рядов индекса DpRVI); ошибка классификации на основе NDVI не превышала 4 %, а на основе DpRVI – 18 %; предложенная методика распознавания сельскохозяйственных культур с использованием сезонных рядов NDVI применена для построения карт пахотных земель Хабаровского района в 2021–2023 гг.

– Предложен алгоритм раннего распознавания посевов сельскохозяйственных культур с использованием временных рядов NDVI; точность классификации находилась в диапазоне от 88 до 92 %; проведены оценка площадей залежи и посевов сои, а также сравнение полученных результатов с данными

официальной статистики (в 2019–2020 гг. было выявлено превышение заявленной площади посевов сои до 30 %).

– Предложены принципы построения моделей раннего прогнозирования урожайности сои, основанных на расчёте максимума вегетации с использованием параметров аппроксимации кривых NDVI за предыдущие 5 лет; установлена возможность прогнозирования с точностью свыше 90 % на 5–6 недель раньше регрессионных моделей на основе фактического максимума NDVI; произведена оценка точности моделей для муниципальных образований субъектов Дальнего Востока.

Результаты исследования могут быть рекомендованы к использованию органам исполнительной власти (региональным министерствам сельского хозяйства) для картографирования сельскохозяйственных угодий Дальнего Востока, восстановления сведений о севообороте, оценки объемов неиспользуемой пашни (для введения неиспользуемых земель в севооборот), прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на районном уровне (в том числе, в оперативном режиме). Предложенные в работе методики могут применяться и в других сельскохозяйственных регионах (с поправкой на региональные особенности).

Перспективными направлениями дальнейших исследований является использование данных высокого пространственного разрешения для уточнения границ сельскохозяйственных полей и выявления неоднородностей вегетации в рамках одного сельскохозяйственного поля, прогнозирования урожайностей на уровне отдельных хозяйств и участков, а также оценки состояния мелиоративных систем.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Идентификация сельскохозяйственных культур с использованием радарных изображений / К. Н. Дубровин, А. С. Степанов, А. Л. Верхотуров, Т. А. Асеева. – Текст : непосредственный // Информатика и автоматизация. – 2022. – Т. 21, № 2. – С. 405–426.

2 Аппроксимация временных рядов индексов вегетации (NDVI и EVI) для мониторинга сельхозкультур (посевов) Хабаровского края / А. С. Степанов, Е. А. Фомина, Л. В. Илларионова, К. Н. Дубровин, Д. В. Федосеев. – Текст: непосредственный // Информатика и автоматизация. – 2023. – Т. 22, № 6. – С. 1473–1498 (K1).

3 Дубровин, К. Н. Решение задач идентификации сельскохозяйственных культур и актуализации границ сельскохозяйственных полей (на примере Хабаровского муниципального района) / К. Н. Дубровин, Л. В. Илларионова, А. С. Степанов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 1. – С. 48–58 (K1).

4 Свидетельство о государственной регистрации № 2020612600 программы для ЭВМ Российская Федерация. Программный комплекс для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур : № 2019667148 : дата поступления 24.12.2019 : дата регистрации 27.02.2020 / К. Н. Дубровин, А. С. Степанов ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (RU). – Текст : непосредственный.

5 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680556 Российская Федерация. Программный комплекс для моделирования временных рядов вегетационных индексов с использованием аппроксимирующих функций: № 2022669010: дата поступления 14.10.2022: дата регистрации 02.11.2022 / Дубровин, К.Н., Фомина Е.А., Степанов А. С., Илларионова Л. В.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (RU). – Текст: непосредственный.

6 Свидетельство о государственной регистрации № 2024684901 программы для ЭВМ Российская Федерация. Программный комплекс автоматизированной обработки композитных изображений спутника Метеор для получения сезонных временных рядов NDVI для сельхозугодий Хабаровского края: № 2024683116 : дата поступления 08.10.2024 : дата регистрации 22.10.2024 / Л. В. Илларионова , А. С. Степанов, Е. А. Фомина , К. Н. Дубровин, А. С. Бордаков ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (RU). – Текст : непосредственный.

7 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620115 Российская Федерация. Результаты мониторинга сельскохозяйственных угодий юга Дальнего Востока: № 2023624666: дата поступления 11.12.2023 : дата регистрации 11.01.2024 / Д. В. Федосеев, К. Н. Дубровин, А. С. Степанов, Л. В. Илларионова, А. Л. Верхотуров, И. О. Прохорец ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (RU). – Текст : непосредственный.

8 Степанов, А. С. Построение и оценка точности регрессионных моделей для определения урожайности зерновых и зернобобовых культур на основе данных дистанционного зондирования Земли и климатических характеристик / А. С. Степанов, Т. А. Асеева, К. Н. Дубровин. – Текст : непосредственный // Интер-Карто. ИнтерГИС. – 2020. – Т. 26, № 3. – С. 159–169.

9 Predicting soybean yield at the regional scale using remote sensing and climatic data / A. Stepanov, T. Aseeva, K. Dubrovin, A. Sorokin. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, No. 12. – P. 1936.

10 Stepanov, A. Function fitting for modeling seasonal normalized difference vegetation index time series and early forecasting of soybean yield / A. Stepanov, K. Dubrovin, A. Sorokin. – Текст : непосредственный // The Crop Journal. – 2022. – Vol. 10, No. 5. – P. 1452–1459.

11 Dubrovin, K. Cropland mapping using Sentinel-1 data in the southern part of the Russian Far East / K. Dubrovin, A. Stepanov, A. Verkhoturov. – Текст : электронный // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 18. – P. 7902.

12 Multi-Year Cropland Mapping Based on Remote Sensing Data: A Case Study for the Khabarovsk Territory, Russia / K. Dubrovin, A. Verkhoturov, A. Stepanov, T. Aseeva. – Текст : электронный // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16(9). – P. 1633.

13 Enhancement of Comparative Assessment Approaches for Synthetic Aperture Radar (SAR) Vegetation Indices for Crop Monitoring and Identification – Khabarovsk Territory (Russia) Case Study / A. Sorokin, A. Stepanov, K. Dubrovin, A. Verkhoturov. – Текст : электронный // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16. – 2532.

14 Опыт использования данных прибора КМСС КА «Метеор-М» № 2 для задач мониторинга сельскохозяйственных угодий юга Хабаровского края / Л. В. Илларионова, А. С. Степанов, К. Н. Дубровин, Е. А. Фомина, А. А. Сорокин, А. Л. Верхотуров, В. А. Елисеев. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 1. – С. 81–92.

15 Степанов, А. С. Влияние климатических характеристик и значений вегетационного индекса NDVI на урожайность сои (на примере районов Приморского края) / А. С. Степанов, Т. А. Асеева, К. Н. Дубровин. – Текст : непосредственный // Аграрный вестник Урала. – 2020. – № 1(192). – С. 10–19.

16 Stepanov, A. S. Modelling soybean yield for the early prediction in the Russian Far East using remote sensing data / A. S. Stepanov, K. N. Dubrovin. – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth Environment and Science. – 2020. – Vol. 547. – 012039.

17 Степанов, А. С. Моделирование сезонной динамики NDVI и LAI сельскохозяйственных культур юга Дальнего Востока (на примере сои) / А. С. Степанов, К. Н. Дубровин. – Текст : непосредственный // Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве: Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2021 года. – Санкт-Петербург: Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН, 2021. – С. 80–83.

18 Перспективы использования оптических и радарных изображений для контроля за соблюдением севооборотов в Хабаровском крае / А. С. Степанов, К. Н. Дубровин, А. Л. Верхотуров, Н. А. Селезнёва, А. А. Суняйкин. – Текст : непосредственный // Достижения науки и техники АПК. – 2021. – Т. 35, № 12. – С. 23–28.

19 Дубровин, К. Н. Использование нейронных сетей для классификации пахотных земель южной части российского Дальнего Востока / К. Н. Дубровин, А. С. Степанов. – Текст : непосредственный // Агрофизический институт: 90 лет

на службе земледелия и растениеводства: Материалы международной научной конференции, Санкт-Петербург, 14–15 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург : Агрофизический научно-исследовательский институт, 2022. – С. 885–890.

20 Дубровин, К. Н. Классификация земель сельскохозяйственного назначения с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса / К. Н. Дубровин, А. С. Степанов, А. Л. Верхотуров. – Текст : непосредственный // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы IX Международной научной конференции, Красноярск, 13–16 сентября 2022 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 49–52.

21 Применение данных ДЗЗ в решении задач идентификации и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на Дальнем Востоке / А. С. Степанов, К. Н. Дубровин, Л. В. Илларионова, Е. А. Фомина. – Текст : непосредственный // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы IX Международной научной конференции, Красноярск, 13–16 сентября 2022 года / Научный редактор Е. А. Ваганов, отв. редактор Г. М. Цибульский. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 286–289.

22 Особенности проведения классификации сельскохозяйственных земель Хабаровского края с использованием спутниковых данных / А. С. Степанов, К. Н. Дубровин, А. Л. Верхотуров, Т. А. Асеева. – Текст : непосредственный // Дальневосточный аграрный вестник. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 54–62.

23 Dubrovin, K. N. Application of LAI and NDVI to model soybean yield in the regions of the Russian Far East / K. N. Dubrovin, A. S. Stepanov, T. A. Aseeva. – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Yekaterinburg, 15–16 октября 2021 года. – Yekaterinburg, 2022. – 012030.

24 Stepanov, A. Forecasting Soybean Yield in Agricultural Regions of the Russian Far East Using Remote Sensing Data / A. Stepanov, T. Aseeva, K. Dubrovin. – Текст: непосредственный // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 245. – P. 349–358.

25 Степанов, А. С. Моделирование вегетационных циклов сои в южной части Дальнего Востока на основе оптических и радарных спутниковых изображений / А. С. Степанов, К. Н. Дубровин. – Текст : непосредственный // Достижения науки и техники АПК. – 2023. – Т. 37, № 6. – С. 80–85.

26 Using NDVI Time Series for Interannual Cropland Classification in the Khabarovsk District / L. Illarionova, K. Dubrovin, A. Stepanov, T. Aseeva. – Текст: непосредственный // Agriculture Digitalization and Organic Production: Proceedings of the Third International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production (ADOP 2023), St. Petersburg, 05–07 июня 2023 года. – St. Petersburg : Springer Nature Singapore, 2023. – P. 327–338.