На правах рукописи

Железова Софья Владиславовна

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ТОЧНОГО И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ ДЛЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В НЕЧЕРНОЗЁМНОЙ ЗОНЕ РФ

Специальность 06.01.03 – Агрофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора сельскохозяйственных наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Научном центре точного земледелия и на кафедре земледелия и методики опытного дела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Официальные оппоненты:

Иванов Дмитрий Анатольевич
доктор сельскохозяйственных наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, заведующий отделом мониторинга состояния и использования осушаемых земель Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель – филиала ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»

Суханов Павел Александрович
доктор сельскохозяйственных наук,
генеральный директор ООО «Агрохимзем»
(г. Санкт-Петербург, Пушкин)

Беляев Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сельскохозяйственной техники и технологий ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Верхневолжский федеральный аграрный научный центр»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2021 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 006.001.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Агрофизический научно-исследовательский институт» по адресу:195220, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, д.14.
Тел. +7 (812) 534-13-24, факс +7 (812) 534-19-00; e-mail: office@agrophys.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Агрофизического научно-исследовательского института и на сайте http://www.agrophys.ru, с авторефератом – на сайте http://vak.ed.gov.ru и http://www.agrophys.ru.

Автореферат разослан «___»_____ 2020 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14, ФГБНУ АФИ.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 006.001.01
доктор биологических наук _____ Е.В. Канаш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Концепция координатного точного земледелия (ТЗ) и ресурсосберегающие обработки почвы направлены на получение устойчивых урожаев при оптимизации материальных затрат и снижении отрицательной экологической нагрузки на окружающую среду. Эти требования, наряду с сохранением плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и защитой почвы от эрозии, являются основными положениями Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации (Доктрина…, 2020). Разработка и внедрение агротехнологий в концепции ТЗ базируется на адаптивно-ландшафтном подходе (Кирюшин, Иванов, 2005) и на знании потенциала урожайности конкретных сортов в определённых почвенно-климатических условиях. Для Нечернозёмной зоны РФ характерна высокая вариабельность почвенных свойств как в пределах агроладшафта, так и по площади отдельно взятых сельскохозяйственных полей, что во многом определяет условия роста и формирование урожая зерновых культур (Рухович с соавт., 2010).

В условиях Нечерноземья адаптация технологий ТЗ и ресурсосберегающего земледелия приобретает особую актуальность, т.к. поля этой зоны неоднородны по агрофизическим и агрохимическим свойствам, и всё ещё не достигнут потенциал урожайности зерновых при достаточной обеспеченности осадками. Адаптировать технологию растениеводства – значит с применением современных научно-технических достижений рационально использовать потенциал почвенного плодородия и оптимизировать затраты на получение урожая заданного качества.

Степень разработанности темы исследования

Точное земледелие – наукоёмкая технология, объединяющая новейшие исследования в сфере агрономии, механизации растениеводства, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), обработки данных с применением IT (Цифровая трансформация..., 2019). Применение технологий ТЗ имеет зональные особенности: в степных регионах эффективно используют системы параллельного вождения, автопилот и ресурсосберегающие технологии обработки почвы. Для Нечернозёмной зоны бóльший экономический эффект ожидаем от применения точных систем удобрения, что связано с высокой вариабельностью почвенного плодородия. Вариабельность свойств почвенного покрова на разных уровнях исследования (от педона до агроландшафта) является предметом изучения отечественной школы почвоведения, что отражено в трудах Е.А. Дмитриева, В.И. Кирюшина, А.Л. Иванова, А.С. Фрида, В.П. Самсоновой, Н.Б. Хитрова и др.; агрохимические аспекты этой проблемы отражены в работах В.Г. Сычёва, В.Г. Минеева, В.А. Романенкова, Р.А. Афанасьева, О.В. Рухович, А.И. Иванова и др.. Методы ДЗЗ для оценки неоднородности почвенного покрова и посевов используют в работе научные коллективы из МГУ имени М.В. Ломоносова, Почвенного института имени В.В. Докучаева, Омского ГАУ и ФГБУН ИКИ РАН. Обработка и анализ информации, моделирование продукционного процесса сельскохозяйственных культур в различных условиях возделывания – это информационный аспект ТЗ, чему посвящены научные разработки ФБГНУ «Агрофизический НИИ».

Ресурсосберегающие (почвозащитные) технологии земледелия исторически приурочены к степным регионам. Аспекты этих технологий зародились в трудах И.Е. Овсинского, Т.С. Мальцева, получили дальнейшее развитие в трудах научных школ А.И. Бараева, В.И. Кирюшина, ВНИИЗиЗПЭ (Курск), Ставропольского ГАУ и НИИСХ (В.К. Дридигер) и др. В Нечернозёмной зоне длительное воздействие почво-

сберегающих и противоэрозионных технологий земледелия изучали в многолетних полевых опытах МСХА им. К.А. Тимирязева (до 2009 г.).

В 2008 г. в РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева был заложен Полевой научно-производственный опыт Научного центра точного земледелия (ЦТЗ), в котором на примере типичных для Нечернозёмной зоны агродерново-подзолистых почвах в многолетнем ряду наблюдений в четырехпольном севообороте проводят комплексные исследования в области точного и ресурсосберегающего земледелия.

Цель исследования. Разработка научно-методического обоснования для адаптации приёмов технологий точного и ресурсосберегающего земледелия и комплексной оценки их эффективности при многолетнем интенсивном возделывании зерновых культур в зернопропашном севообороте на дерново-подзолистой почве.

Задачи исследования

- Разработать методические подходы к оценке пространственно-распределённых стабильных и динамичных свойств агрофитоценозов (АФЦ) зерновых культур в разных масштабах пространственного обследования с применением технических средств и геоинформационных систем;
- Оценить влияние и вклад разномасштабных факторов (рельефа, свойств почвы, способов обработки и др.) в пределах опытных полей на развитие пространственно-временных особенностей развития АФЦ и связей между всеми его компонентами;
- Сравнить возможности применения наземных исследований АФЦ и методов дистанционного зондирования (спутниковые снимки, беспилотная аэрофотосъёмка) для оценки состояния растительности опытных полей, провести сопоставление результатов наземных и дистанционных обследований;
- Оценить возможность использования пространственных карт показателя удельного электрического сопротивления в качестве меры совокупного влияния неоднородности почвенно-ландшафтных условий и технологии возделывания на развитие растительности АФЦ, урожайность и засорённость посевов зерновых культур в условиях многолетнего полевого эксперимента;
- Оценить пространственно-временные закономерности развития посевов зерновых культур и возможность прогнозирования урожайности по вегетационному индексу NDVI при разных технологиях возделывания в условиях вариабельности почвенного плодородия;
- На основе многолетнего ряда наблюдений по системе регулярного наземного сеточного картографирования засорённости посевов со стационарным размещением точек в пространстве и с применением инструментальных методов выявить пространственно-временные закономерности развития сегетального сообщества АФЦ зерновых культур в ротации севооборота с целью мониторинга и агроэкологического прогнозирования засорённости посевов при применении ресурсосберегающих и традиционных способов обработки почвы;
- Разработать иерархическую Базу данных для накопления и обработки результатов научно-производственного многофакторного полевого эксперимента по изучению биологической и экономической эффективности приёмов точного (координатного) и ресурсосберегающего земледелия и проведения многолетнего агроэкологического мониторинга.

Научная новизна

- На основе комплексных многолетних наблюдений при возделывании зерновых культур по интенсивным технологиям в зернопропашном севообороте на дерново-подзолистой почве показана главенствующая роль неоднородности почвенно-ландшафтных условий в развитии и продуктивности культурной и распространённости сорной растительности АФЦ;
- Впервые при проведении комплексных исследований в разномасштабных пространственно-временных шкалах в пределах отдельно взятого поля выявлены относительно устойчивые зоны различной продуктивности посевов, связанные с влиянием микрорельефа и агрофизических свойств почвы; пространственная стабильность этих зон определяет особенности развития растительных компонентов АФЦ в многолетней динамике, что может быть использовано для выбора стратегии и тактики ухода за посевами в концепции точного земледелия;
- Впервые в многолетнем полевом опыте в типичных для Нечерноземья условиях пестроты почвенного покрова изучено длительное воздействие применения ресурсосберегающей (нулевой и минимальной) обработки почвы на твёрдость (сопротивление пенетрации), удельное электрическое сопротивление почвы и связь этих показателей с развитием вегетативной массы посева (оцениваемой по индексу NDVI), с урожайностью зерновых культур и распространённостью сорных растений в посевах;
- Разработан метод прогноза урожайности зерновых культур на основе анализа временных рядов сезонной динамики вегетационного индекса NDVI посевов;
- Разработана и апробирована иерархическая База данных для накопления и обработки результатов научного многофакторного полевого эксперимента по изучению эффективности приёмов точного (координатного) и ресурсосберегающего земледелия и для проведения агроэкологического многолетнего мониторинга.

Теоретическая значимость работы. Многолетние наблюдения пространственно-временных связей в АФЦ зерновых культур при применении разных технологий возделывания значительно углубляют научные представления о применимости данных методов в Нечернозёмной зоне, являются теоретической основой для разработки внедрения таких методов в условиях разномасштабной неоднородности почвенного плодородия и для прогнозирования агроэкологической ситуации после перехода на точные и ресурсосберегающие технологии.

Практическая значимость работы. Предложенные способы наземного и дистанционного обследования полей служат для решения широкого спектра научных и производственных агрономических задач и могут быть рекомендованы для практического использования при возделывании зерновых культур в Нечерноземной зоне РФ. Выявление на полях зон пространственной неоднородности почвенного плодородия с помощью дистанционных и инструментальных методов служит основой для более эффективного использования удобрений и средств защиты растений при внесении их в дифференцированных дозах. Разработанный автором комплексный методический подход, лежащий в основе создания файлов-предписаний для дифференцированного внесения удобрений на основе многолетнего мониторинга вегетационного индекса NDVI и выявления зон неоднородности посевов, реализован в агроплатформе ExactFarming (www.exactfarming.com), что в сочетании с применением IT-решений для обработки больших массивов данных относится к актуальному направлению

цифровизации сельскохозяйственной отрасли и имеет большое практическое значение для повышения эффективности земледелия и растениеводства.

Изучение пространственно-временных закономерностей развития сорного компонента АФЦ имеет практическое значение для обоснования выбора сроков обследования и обработки полей гербицидами, для оценки эффективности их действия в условиях разных технологий возделывания зерновых культур в Нечерноземье. Апробирована методика дистанционного обследования засорённости полей.

Результаты исследований автора используются в качестве лекционных материалов и практических задач в учебной дисциплине «Точное земледелие», с 2014 г. включённой в программу подготовки бакалавров по направлению «Агрономия», направленность «Агробизнес» и «Агроменеджмент» в ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева (Рабочие программы дисциплины «Точное земледелие», 2014, 2017, 2020). Материалы работы включены в учебники, изданные в соавторстве: «Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие» (2013), «Технологии, техника и оборудование для координатного (точного) земледелия» (2016) и используются для проведения практических семинаров, экскурсий на курсах повышения квалификации для работников АПК, слушателей летних студенческих школ, иностранных делегаций, участников конгрессов в РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, с 2009 г. по настоящее время.

Основные защищаемые положения

- Неоднородность АФЦ обусловлена комплексом причин и явлений, как стабильных, так и изменяющихся во времени, проявляется как разномасштабная мозаичность и оказывает существенное влияние на оценку эффективности технологий возделывания сельскохозяйственных культур в научных и научно-производственных полевых опытах;
- Проведение разномасштабных исследований с применением дистанционных и наземных методов позволяет определить оптимальные параметры опробования для целей точного земледелия и агроэкологического мониторинга;
- Знание о зонах неоднородности, масштабах и устойчивости этих явлений на сельскохозяйственных полях, разработка конкретных сценариев обработки отдельных зон поля позволяет обоснованно перейти к внесению удобрений и пестицидов в дифференцированных дозах по технологиям *онлайн* и *офлайн* с последующим контролем эффективности обработок;
- Накопление в базах данных исходной и оперативной полевой информации о внесении удобрений, мелиорантов, пестицидов с последующей регистрацией соответствующего отклика АФЦ позволяет оценить биологическую и экономическую эффективность проведения технологических приёмов, осуществлять агроэкологический мониторинг и давать прогноз последствий применяемых технологий для агроэкосистемы.

Методология и методы исследования

Методология данной работы основана на научно-методическом принципе иерархического подхода для оценки и сравнения воздействия изучаемых технологий земледелия на состояние почвы и отклик растительности в АФЦ. Изучены пространственно-временные закономерности изменений свойств почвы, посевов зерновых культур и сорного компонента при разных технологиях возделывания. Программа исследований включала проведение экспериментов в полевых условиях на

научных и научно-производственных сельскохозяйственных объектах в Нечерноземной зоне РФ (Москва, Владимирская и Калужская области), проведение лабораторных анализов, обработку полевых и лабораторных данных методами геостатистики, вариационной статистики, дисперсионного, регрессионного, кластерного анализа, анализа временных рядов в пакетах программ Excel MS Office, STATISTICA 6.0.

Цифровые методы в работе: накопление большого объёма фактического материала о почве и растительности в виде натурных измерений и результатов инструментальных обследований, оцифровка, разметка и стандартизация «сырых данных», хранение и обработка результатов в Базе данных и ГИС SMS Advanced Ag Leader, использование для получения и обработки данных функционала онлайн агроплатформы ExactFarming (www.exactfarming.com).

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов исследования обеспечена методической основой проведения полевых экспериментов и обработки данных, многолетними наблюдениями и большим объёмом полевых исследований в течение 18 лет на различных объектах в Нечернозёмной зоне, в том числе исследований в течение более 10 лет на опытном полигоне Научного центра точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, достаточной повторностью отбора проб и биометрических измерений в полевых экспериментах с последующей статистической обработкой данных. Отбор проб и лабораторные анализы проведены в соответствии с актуальными ГОСТ и утверждёнными Методиками с использованием сертифицированных приборов и оборудования. Основные результаты исследования опубликованы в статьях в рецензируемых журналах.

Апробация. Материалы, вошедшие в диссертацию, были доложены автором лично и соавторстве на ежегодных Научных конференциях профессорско-преподавательского состава РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (2010–2019), на Всероссийских и международных научно-практических конференциях в Москве, Подмосковье (2012–2019), Оренбурге (2013), Екатеринбурге (2014), Барнауле (2014–2016), Санкт-Петербурге (2015, 2017–2019), Ялте (2019), Перми (2019); а также за рубежом: в Китайской народной республике («China Development Forum and the 3rd International Conference on Smart Agriculture Innovative Development», Beijing, China, 2016), в Венгрии («Sustainable Agriculture», Debrecen, Hungary, 2012; «2nd Conference on Long-term field experiments LOTEX», Nyíregyháza, Hungary, 2019).

Методический подход и практические результаты из материалов научного исследования автора были использованы для разработки функционала онлайн сервиса для фермеров ExactFarming (www.exactfarming.com).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 66 работ, в том числе 14 статей в рецензируемых журналах из списков, рекомендуемых ВАК для публикации основных результатов диссертационных работ, 2 статьи в базе цитирования Scopus, 2 учебника и учебно-методические материалы курса «Точное земледелие» для высшего образования по направлению «Агрономия» в ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, более 40 статей в профессионально-ориентированных агрономических журналах и сборниках материалов конференций.

Личный вклад автора в исследование.

Диссертационная работа является результатом многолетних (2001–2019 гг.) исследований автора. Результаты исследований, представленные в диссертации,

получены автором самостоятельно и в составе коллективов исполнителей при выполнении тематических НИР в Нечернозёмной зоне РФ. Исследования в Научном центре точного земледелия (далее – ЦТЗ) при непосредственном участии автора стали обобщающим этапом работы, а также были частью научных разработок ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева ЦТЗ по заданию Министерства сельского хозяйства РФ «Проведение комплексной оценки влияния технологий точного земледелия на формирование урожая сельскохозяйственных культур» (2009–2015 гг.). Автору принадлежит решающая роль в выборе направления исследований, в постановке цели и задач, в развитии и апробации методических подходов, предложенных в работе, а также в обработке результатов экспериментов, подготовке научных отчётов и публикации статей. Общий личный вклад автора в объём диссертации составляет не менее 95%. В совместных исследованиях личный вклад автора заключался в постановке задач, в непосредственном участии и руководстве при проведении полевых работ, интерпретации результатов, в подготовке совместных публикаций.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы и приложений, изложена на 415 страницах машинописного текста, содержит 44 таблицы и 134 рисунка. Список литературы включает 593 источника, из них 231 на иностранных языках и 11 ссылок на международные базы данных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Технологии точного и ресурсосберегающего земледелия: научное развитие и практика применения

Точное земледелие (ТЗ) – это мультидисциплинарная концепция современной агрономии, земледелия и растениеводства. Главная цель ТЗ – повышение эффективности и обеспечение экологической безопасности производства продукции растениеводства путём регулирования техногенных затрат и снижения себестоимости продукции при выполнении экологических требований и нормативов (Точное сельское хозяйство…, 2009). Концепция ТЗ включает различные аспекты, объединяемые в блоки: природно-биологический, технический и информационно-аналитический.

Наибольшее распространение ТЗ *в производственных условиях* в мире и в России имеют агроинженерные и навигационные достижения технического блока ТЗ: параллельное вождение и автопилот. Их использование достигает 70–80% в развитых аграрных странах (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019), однако в РФ этот показатель на порядок ниже (Труфляк, 2018). Из широкого спектра технологий ТЗ в России в настоящее время более всего используют спутниковый мониторинг посевов. Также растёт интерес к дистанционной оценке посевов с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (Коротаев, Новопашин, 2015; Железова с соавт., 2016). Материалы ДЗЗ используют для создания карт рельефа, вегетационных индексов, зон продуктивности посевов. Другие элементы технического блока ТЗ – применение оптических датчиков, построение карт урожайности, технологии дифференцированного подхода (site specific management) для норм посева, внесения удобрений и средств защиты растений (СЗР) – не получили пока в РФ широкого распространения, что можно объяснить недостаточной технологической оснащённостью отрасли.

Научный интерес к теме ТЗ в России непрерывно растет: по данным *elibrary* на начало 2020 г. число публикаций по тематике ТЗ на русском языке достигло 2389, и в настоящее время ежегодно публикуется более 300 статей. В мировой научной прессе в тематике ТЗ по научным публикациям первое место (более 30% публикаций за

2009–2019 гг.) занимают темы использования оптических датчиков и дистанционного зондирования сельскохозяйственных полей.

Ресурсосберегающая технология в земледелии подразумевает эффективное использование и сбережение (экономию) ресурсов: в первую очередь, материально-технических и трудовых, но также и сохранение почвенного плодородия. Ресурсосберегающая и почвосберегающая технология – это взаимосвязанные, но не идентичные понятия. Внедрение ресурсосберегающей технологии обусловлено экономическими причинами, а почвозащитной – экологической необходимостью. В научных публикациях подчёркивается актуальность и обоснованность перехода к почвосберегающему земледелию (Soane et al., 2012; Lal, 2015; Байбеков, 2018).

Прямой посев, который некоторые хозяйства активно используют в степной зоне при выращивании зерновых (Беляев, 2015), является *приёмом* земледелия. В то же время *система земледелия No-till* подразумевает многолетнее (не менее 5 лет) использование прямого посева без предварительной механической обработки почвы (Дридигер, 2016), с соответствующим подбором культур специализированных севооборотов. В таком виде технология прямого посева при нулевой обработке почвы встречается в России пока достаточно редко, как в производстве, так и в опытном деле (Белобров с соавт., 2018). В мировом масштабе по данным на 2016 г. суммарная площадь под почвосберегающими технологиями составляла 142 млн. 453 тыс. га, и это 10% от всех возделываемых земель (FAO AQUASTAT, 2016). В эти 10% входят площади под нулевой обработкой (*No-till*), минимальной обработкой без оборота пласта с оставлением пожнивных остатков на поле (Conservation tillage) и территории многолетних насаждений с дерниной на поверхности почвы. В четырёх странах-лидерах внедрения *No-till* под данной технологией находится более 50% возделываемых площадей. В России нулевые обработки занимают менее 1% от суммарной площади возделываемых земель, но интерес к данной теме растёт, так как технология положительно зарекомендовала себя в степных регионах страны (Беляев, 2015; Дридигер, 2016; Байбеков, 2018; Юдин с соавт., 2019). К настоящему времени успешный опыт применения нулевой обработки и прямого посева есть в нескольких субъектах РФ: в Ростовской, Самарской, Белгородской, Воронежской областях, в Алтайском, Краснодарском, Ставропольском краях, в республиках Татарстан и Удмуртия, Крым. В Нечерноземье эта технология пока не получила широкого распространения.

В современных условиях комплексная оценка эффективности технологии земледелия в научно-производственном полевом опыте должна опираться не только на традиционные агрономические методы исследования, но и включать новые инструментальные и дистанционные способы обследования почвы и посевов, которые позволяют оценить пространственно-временную картину развития АФЦ и более эффективно управлять продукционным процессом. Сложность моделирования продукционного процесса в полевых экспериментах обусловлена тем, что влияние различных факторов проявляется комплексно (Усков, Моисеев, 2018) и неодинаково в пространстве. С внедрением концепции ТЗ традиционный подход к обследованию полей, к внесению удобрений и учёту урожайности претерпевает существенные изменения, которые касаются всех стадий производственного процесса в растениеводстве, от обследования почвы перед посевом, до учёта урожайности.

В концепции ТЗ для обследования пространственной неоднородности почвы используют эффективный инструментальный метод измерения электропроводности почвы или удельного электрического сопротивления (УЭС). УЭС почвы – комплекс-

ный интегральный показатель, который зависит от запасов органики в почве, её гранулометрического и химического состава, влагонасыщенности, плотности сложения и температуры (Wertz, 2002; Friedman, 2005; Grisso et al., 2009; Кондрашкин с соавт., 2011; Gholizadeh et al., 2012; Поздняков с соавт., 2015). Пространственная карта УЭС (или электропроводности) верхнего слоя почвы на поле отражает наличие зон неодинакового плодородия, и может служить основой для дифференцированного подхода в точном земледелии (Barbosa & Overstreet, 2010; Cillis et al., 2017).

Пространственно-временную картину развития посевов в концепции ТЗ также изучают с помощью растительных индексов и методов дистанционного зондирования. Методы ДЗЗ применяют уже около 50 лет, но данный способ обследования не теряет своей актуальности и поныне (Mulla, 2013; Барталев с соавт., 2015), более того, он становится все более точным за счёт использования снимков высокого разрешения и применения съёмки в разных диапазонах длин волн (Блохина, 2018). Метод ДЗЗ в сельском хозяйстве используется для разных целей: 1) мониторинг развития посевов (Зверев с соавт., 2013; Сладких с соавт., 2016; и др.); 2) распознавание видов возделываемых культур на полях (Савин, 2015, Плотников с соавт., 2017; и др.); 3) прогнозирование урожайности (de Wit, 2007; Куссуль с соавт., 2012; Береза с соавт., 2015; и др.); 4) косвенная оценка почвенных свойств сельскохозяйственных земель по состоянию посевов (Устюжанин с соавт., 2014; Рухович Д., 2016; и др.); 5) оценка воздействия аномальных метеоусловий и засух (Зейлигер, Ермолаева, 2014; Рухович, Шаповалов, 2015; и др.); 6) фитосанитарная оценка засорённости посевов (Peña-Barragán et al., 2007; Самсонова, 2015; Михайленко, 2015; Немцева, Голубева, 2018; и др.).

Помимо дистанционной оценки состояния посевов с применением съёмки со спутников и БПЛА используют также и обследования наземными оптическими датчиками (Raun et al., 1998, 2005; Точное сельское хозяйство, 2009; Железова с соавт., 2013). Практической целью использования оптических датчиков является разработка алгоритмов внесения азотных подкормок в дифференцированных дозах в зависимости от развития биомассы посевов в разных местах поля (Raun et al., 2002; Li et al., 2008; Murdock et al., 2010; Walsh et al., 2013). Для этой же цели могут быть рекомендованы спутниковые снимки высокого разрешения (Канаш, 2015).

Информация о поле, об АФЦ в сезонном и многолетнем развитии, получаемая разными методами, как правило, является разномасштабной. Сопоставление и совместная обработка такой информации – отдельная методическая задача, которой в концепции ТЗ должно уделяться особое внимание (Якушев, Якушев, 2007; Kühn et al., 2009). Для этого, в частности, применяют алгоритмы геостатистической обработки данных (Geostatistical Applications…, 2010; Oliver & Webster, 2014). При исследовании взаимосвязей в пределах любого АФЦ выделяют уровни неоднородности, связанные с воздействием природных и антропогенных факторов в разном масштабе (Wright, 1998; Самсонова, 2006; Сидорова с соавт., 2012; и др.). При изучении АФЦ как научного объекта, и при дальнейшем внедрении этих знаний в производство необходимо использовать многоуровневый подход, начиная с планирования научно-производственных экспериментов, и заканчивая созданием Баз данных, как основы аналитических платформ с привлечением BigData.

Глава 2. Реализация программы исследования: объекты, методы, апробация

Объект исследования. Основная часть исследований проведена в 2009–2019 гг. на Полевой опытной станции РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, на полигоне

Научного центра точного земледелия (ЦТЗ). Полевой опыт ЦТЗ заложен в 2008 г. на ровном участке размером 240×250 м, площадью 6 га (Положение о порядке организации… «Полевого опыта по изучению технологий точного земледелия», 2009) (рисунок 1). Опыт представляет собой четырёхпольный зернопропашной севооборот с набором культур, характерных для Нечернозёмной зоны РФ: озимая пшеница + горчица пожнивно; картофель; ячмень; викоовсяная смесь. Учётные площади полей опыта за вычетом дорог и краевых защитных полос составляют для полей №№ 1 и 3 по 0,75 га, для полей №№ 2 и 4 – по 1,4 га (далее в тексте используются сокращенные названия полей 1–ЦТЗ, 2–ЦТЗ и т.д.).

Рисунок 1 – Общий вид полевого опыта Центра точного земледелия: снимок GoogleEarth от 13.09.2012 с границами и номерами полей.
Координаты опытного полигона:
N 55,8369˚; E 37,5636˚

Почва участка агродерново-подзолистая окультуренная средне- и легкосуглинистая на моренных валунных лёгких и средних суглинках. Полигон полевого опыта ЦТЗ расположен на пологом (0,9–1,2˚) склоне северо-восточной экспозиции на нескольких почвенных контурах, которые различаются степенью оподзоленности почвы (Гречин, 1955) и гранулометрическим составом подпахотных горизонтов, унаследованным от почвообразующей породы (Хитров, 2014).

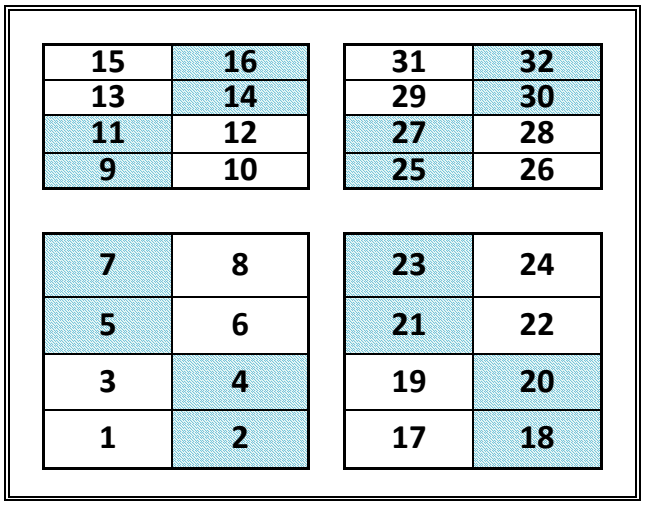
Изучаемые факторы. Научно-производственный опыт ЦТЗ представляет собой многолетний двухфакторый полевой эксперимент по изучению технологий возделывания культур. Опыт заложен систематически, двухъярусно, в двукратной повторности (рисунок 2). Два основных фактора, изучаемых в опыте: (А) технология возделывания и (В) способ обработки почвы.

Фактор А, технология возделывания полевых культур: традиционная (А1) и точная (А2). Традиционная технология (А1) основана на традиционных зональных технологических приёмах и параметрах обработки, сроках и нормативах их выполнения для выращивания продукции растениеводства по интенсивной технологии. Технология ТЗ (А2) основана на принципах использования спутниковой навигационной системы GPS, с помощью которой выполняются агроприёмы посадки, посева, а также внесение удобрений и средств защиты растений в дифференцированных дозах.

Фактор В, приём основной обработки почвы: классическая традиционная на основе вспашки (В1) и ресурсосберегающая технология (В2 – минимальная обработка под ячмень и картофель; В3 – нулевая обработка под пшеницу и вико-овсяную смесь).

Каждое поле севооборота разделено на 8 стационарных учётных делянок по изучению технологий, общее количество таких делянок – 32, их площади составляют 1800 м^2 и 900 м^2. Размеры делянок были спроектированы исходя из размеров рабочих органов почвообрабатывающих орудий, ширины захвата сеялок, распределителя твёрдых минеральных удобрений и секций опрыскивателя. Из года в год обработки делянок проводят согласно схеме опыта без смещения. Это позволяет в течение сезо-

на, ротации севооборота и за более долгий период анализировать пространственную вариабельность и динамику показателей АФЦ в условиях многолетнего применения разных технологий возделывания.



Фактор В – способ обработки почвы:
← ресурсосберегающая
← классическая вспашка
← ресурсосберегающая
← классическая вспашка

← ресурсосберегающая
← классическая вспашка
← ресурсосберегающая
← классическая вспашка

Фактор А – технология земледелия
А2 точная
А1 традиционная

Рисунок 2 – Схема полевого опыта Центра точного земледелия.
1–32 – номера стационарных опытных делянок.

В рамках постоянно воспроизводимого двухфакторного эксперимента для решения производственных задач по разработке и апробации новых технологий дополнительно по необходимости для изучения вводят и другие технологические факторы (внесение азотных подкормок на озимой пшенице, влияние СЗР и др.).

Весь полигон опыта ЦТЗ представляет собой соподчинённую структуру с фиксированной площадью учёта для пяти разных уровней иерархии (рисунок 3), на которых исследования проводят как в крупном, так и в более мелком масштабах:

1 уровень – севооборот в целом – 6 га (6×10^4 м^2);
2 уровень – каждое поле севооборота – 0,8–1,4 га ($0{,}8–1{,}4\times10^4$ м^2);
3 уровень – делянки изучения технологий – 900 и 1800 м^2 ($0{,}9\times10^3$ и $1{,}8\times10^3$ м^2);
4 уровень – плоты (от *plot* – единичная делянка) – 31 м^2 ($3{,}1\times10^1$ м^2);
5 уровень – «точки» – все обследования с площадью опробования ≤ 1м^2 (1×10^{-3}–10^0 м^2): стационарные микроделянки, учётные рамки, точки отбора почвенных проб.

Рисунок 3 – Учётные делянки опыта и уровни иерархии Базы данных ЦТЗ:
(а) – уровни: 1 (севооборот), 2 (поле) и 3 (делянка);
(б) – уровни: 3 (делянка), 4 (плот) и 5 («точка»).

Методы исследования почвы и растительности. Пространственно-временную картину неоднородности почвы и растительности изучали наземными и дистанционными методами. Наземные методы: отборы проб в фиксированных точках, метод трансект и сеточное картографирование с построением пространственных карт. Дистанционные методы: спектрозональная съёмка с БПЛА и использование спутниковых снимков систем Landsat, Sentinel. Временно́й шаг пространственных обследований растительных компонентов АФЦ и почвы зависел от преследуемых целей и составлял от 1 раза в неделю до 1 раза в вегетационный сезон.

Методы изучения свойств почвы (слой 0–30 см): отбор образцов по сетке и проведение агрохимических анализов по ГОСТ; определение удельного электрического сопротивления (УЭС) верхнего слоя почвы методом горизонтального электрического профилирования с применением прибора Landmapper ERM-02 LandVisor (Поздняков, 2009; Рабинович с соавт, 2018); определение влажности почвы весовым методом и с применением почвенного щупа-влагомера Aquaterr; определение твёрдости почвы (сопротивления пенетрации) с применением твердомера конструкции Ревякина и пенетрометров SCT (Dickey-John Corp., США) и Wile Soil (Farmcomp Oy, Финляндия); сезонный посуточный мониторинг температуры пахотного слоя почвы с применением программируемых термодатчиков Thermochron i-Button. В работе также использовали косвенный метод оценки плодородия почвы по биомассе посева по результатам дистанционных и наземных измерений NDVI. При апробации результатов научных исследований в производственных условиях на посевах озимой пшеницы в Калужской области помимо этих методов применяли оценку различных зон плодородия на основе спутникового мониторинга NDVI с использованием возможностей онлайн платформы ExactFarming (www.exactfarming.com).

Методы исследования растительности: биометрические измерения, прямой учёт биомассы, количественный и весовой анализ сорного компонента АФЦ, дистанционная с БПЛА и наземная оценка NDVI с помощью оптических датчиков (Железова с соавт., 2013, 2016; Железова, 2018, *а*), анализ временных рядов сезонного изменения NDVI, дробный учёт урожайности зерновых с составлением карт урожайности и карт сбора белка (Железова с соавт., 2014).

Исследования на полигоне ЦТЗ проведены как по впервые предложенным методикам, так и по апробированным ранее на других научных и научно-производственных сельскохозяйственных объектах в Нечерноземной зоне РФ. Ранее были разработаны элементы методики исследования пространственно-временных закономерностей свойств почвы и растительности (Жарова с соавт., 2002; Бекецкая с соавт., 2010), которые в дальнейшем были развиты и дополнены в многолетних исследованиях на полигоне ЦТЗ (Самсонова с соавт., 2010; Железова с соавт., 2013, 2014). Практическая апробация методов обследования посевов с применением индекса NDVI, разработанных на полигоне ЦТЗ (Железова с соавт., 2016; Зейлигер с соавт., 2019), была проведена также на других объектах с применением функционала онлайн агроплатформы www.exactfarming.com (Железова с соавт., 2020).

Глава 3. Природные и технологические причины пространственно-временных взаимосвязей в агрофитоценозе

На развитие компонентов АФЦ одновременно влияют природные и технологические факторы. К локальным природным факторам относятся метеоусловия, рельеф, наличие и воздействие близлежащих экотонов агроландшафта, почвенные условия *in situ*. К технологическим факторам относятся все агроприёмы, проводимые на поле.

Влияние рельефа. Рельеф является постоянно воздействующим природным фактором, от которого зависит комплексность почвенного покрова в агроландшафте и на поле. Выявляемые зоны различной продуктивности на полях во многом связаны с перераспределяющей ролью рельефа. В концепции ТЗ особое внимание следует уделять также влиянию *микрорельефа* на продуктивность посевов.

На опытном полигоне ЦТЗ на основе съёмки с БПЛА геодезического класса SenseFly eBee AG была построена высокодетальная карта рельфа и карта водотоков (рисунок 4).

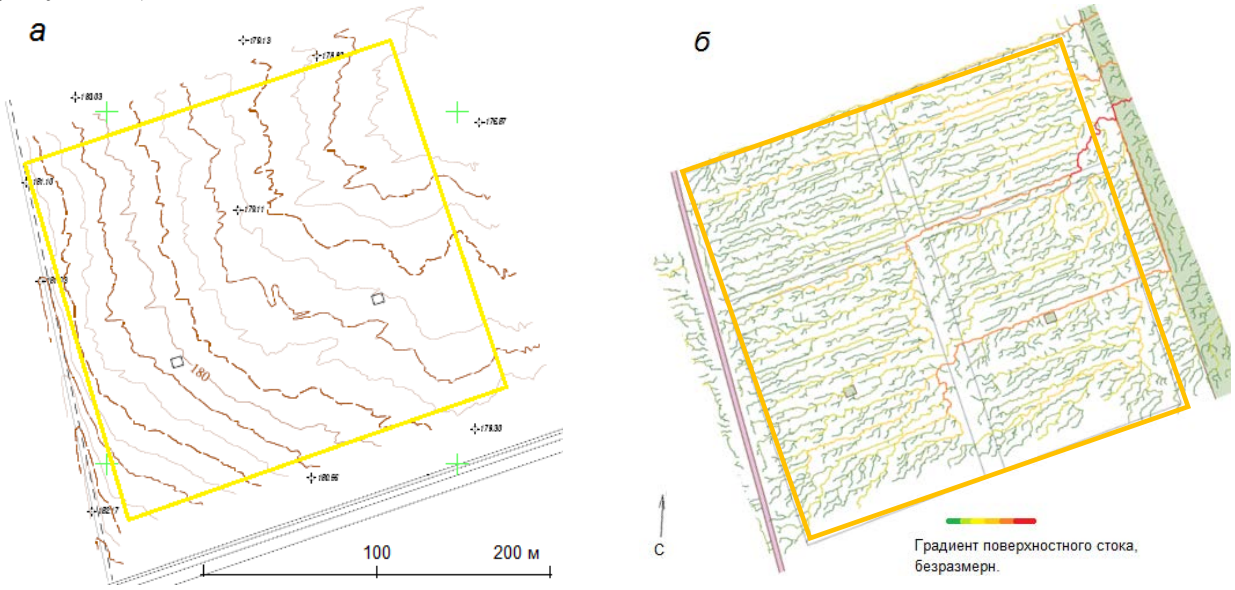
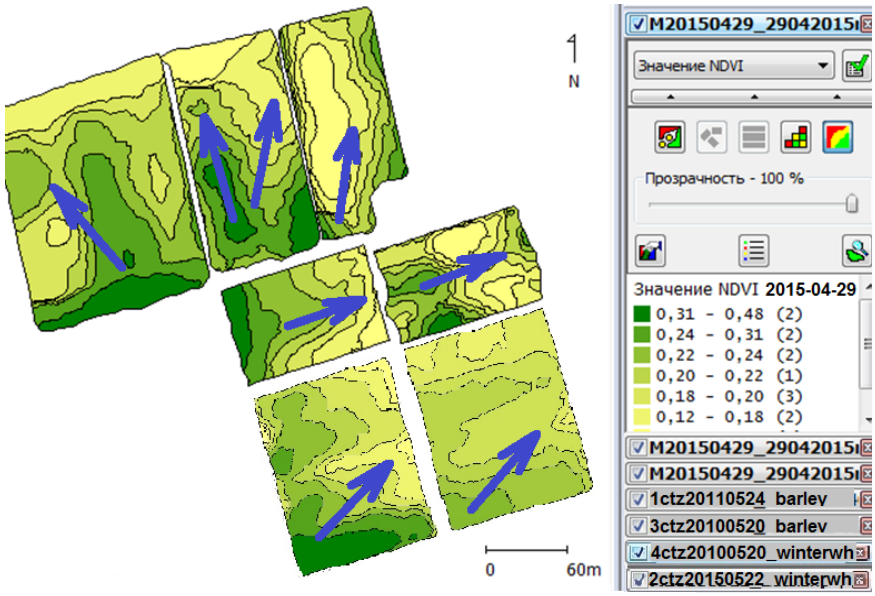


Рисунок 4 – Карта рельефа (***а***) и направление водотоков (***б***) на опытном поле ЦТЗ: Квадратным контуром показана внешняя граница полигона ЦТЗ. (Карты построены специалистами ООО НПК «Джи Пи Эс Ком» по заказу ЦТЗ в 2015 г.)

В условиях Нечерноземья при высокой влагообеспеченности склоны на полях выполняют роль отвода излишней влаги с поверхности почвы, что способствует формированию в верхних частях склона более благоприятных зон для развития растений. Это явление можно проследить в ежегодной динамике NDVI однолетних посевов от всходов до созревания, а также при оценке многолетних насаждений, растущих на склонах. По многолетним наблюдениям развития посевов зерновых культур в фазу кущения на полигоне Полевой опытной станции было показано влияние мезорельефа на неравномерность развития биомассы (NDVI) посевов (рисунок 5). Также для оценки влияния рельефа на потенциальное плодородие почвы в качестве модельной посадки многолетних насаждений была выбрана Лиственничная аллея Тимирязевской Академии, примыкающая к полигону ЦТЗ с южной стороны. Аллея растёт в естественных условиях плодородия почвы без воздействия удобрений, и поэтому является удобным модельным объектом для оценки влияния рельефа на продуктивность фитоценоза по суммарному радиальному приросту стволов деревьев в разных частях склона (Железова, 2012). По анализу ежегодного (2010–2019 гг.) пространственного распределения NDVI посевов зерновых и радиального многолетнего прироста стволов деревьев в модельном насаждении было показано, что первый уровень квазипериодичности почвенного плодородия на объекте ЦТЗ составляет 80–100 м. Этот размер пространственной структуры неоднородности почвенного покрова на данном объекте изучения обусловлен природными причинами, наличием древнего моренного холма, и является отпечатком геологических процессов четвертичного периода – залеганием послеледниковых отложений разного гранулометрического состава (Хитров, 2014). Для Нечернозёмной зоны в целом это практически повсеместное явление,

которое следует учитывать при переходе к концепции ТЗ (Якушева, 2013; Лекомцев, 2015) и при закладке полевых опытов (Иванов А.И., 2016).



*Шкала NDVI приведена для срока 29.04.2015 г., для фазы кущения озимой пшеницы (ВВСН–23)

Рисунок 5 – Карты пространственного распределения NDVI зерновых культур в фазу кущения на полях Опытной станции (на схеме сопоставлены карты NDVI за 2010, 2011 и 2015 гг.; карты построены в программе SMS Advanced по результатам съёмки прибором GreenSeeker RT 200.). Стрелками показаны направления склонов, от высоких мест к понижениям.

Микроклимат. К природным причинам пространственно-временных взаимосвязей развития АФЦ помимо рельефа относится также фрагментарность агроландшафта в целом и влияние экотонных зон (Казаков, 2004). От их наличия зависят микроклиматические условия, накопление влаги, свойства почвы, и, как итог, суммарная продуктивность растительных сообществ.

На примере опыта ЦТЗ в течение двух полных вегетационных сезонов (2009/2010 и 2010/2011 гг.) изучали влияние древесных насаждений и способа обработки почвы на режим температуры пахотного слоя. Программируемые термодатчики были установлены на глубинах 2, 10 и 20 см. Измерение температуры проводили три раза в сутки: в 6, 14 и 22 ч. В период 2009/2010 гг. 6 точек было заложено под посевами озимой пшеницы при двух способах обработки почвы, 1 точка в лесополосе, 1 точка в поле без посева в зимнее время (рисунок 6, маркеры ■). В 2010/2011 гг. все 8 точек были расположены под посевами озимой пшеницы на двух вариантах обработки почвы на разном расстоянии от Лиственничной аллеи (рисунок 6, маркеры x). Точки наблюдения были выбраны так, чтобы выявить влияние рельефа, растительности и разных способов обработки почвы на температуру. Одновременно проводили наблюдения за температурой воздуха (по данным метеостанции имени В.А. Михельсона). Сравнение динамики температуры в разных точках почвы и сопоставление её с температурой воздуха осуществляли по осреднённым подекадно показателям. В точках наблюдения оценивали суточный и сезонный ход температуры, продолжительность отрицательных температур слоя почвы 0–20 см.

В вегетационный сезон 2010/2011 гг. термодатчики были установлены в почве под посевами озимой пшеницы на разном удалении от Лиственничной аллеи с целью выявить её влияние на режим температуры пахотного слоя (рисунок 6, маркеры x слева на схеме). Было показано, что даже при одинаковом способе обработки почвы режим температуры пахотного слоя в соседних точках строго индивидуален, что проявляется, например, в разной длине периода промерзания почвы. Наименьшая продолжительность периода отрицательных температур в почве была отмечена в точке, наиболее близко расположенной к Лиственничной аллее (рисунок 7, *в*, т. 1).

Рисунок 6 – Схема размещения точек установки термодатчиков в поле на опыте ЦТЗ:
маркеры x слева на схеме – точки в сезон 2010/2011 гг.;
маркеры ■ справа на схеме – точки в сезон 2009/2010 гг.
Стрелками показаны полосы под разными обработками почвы.

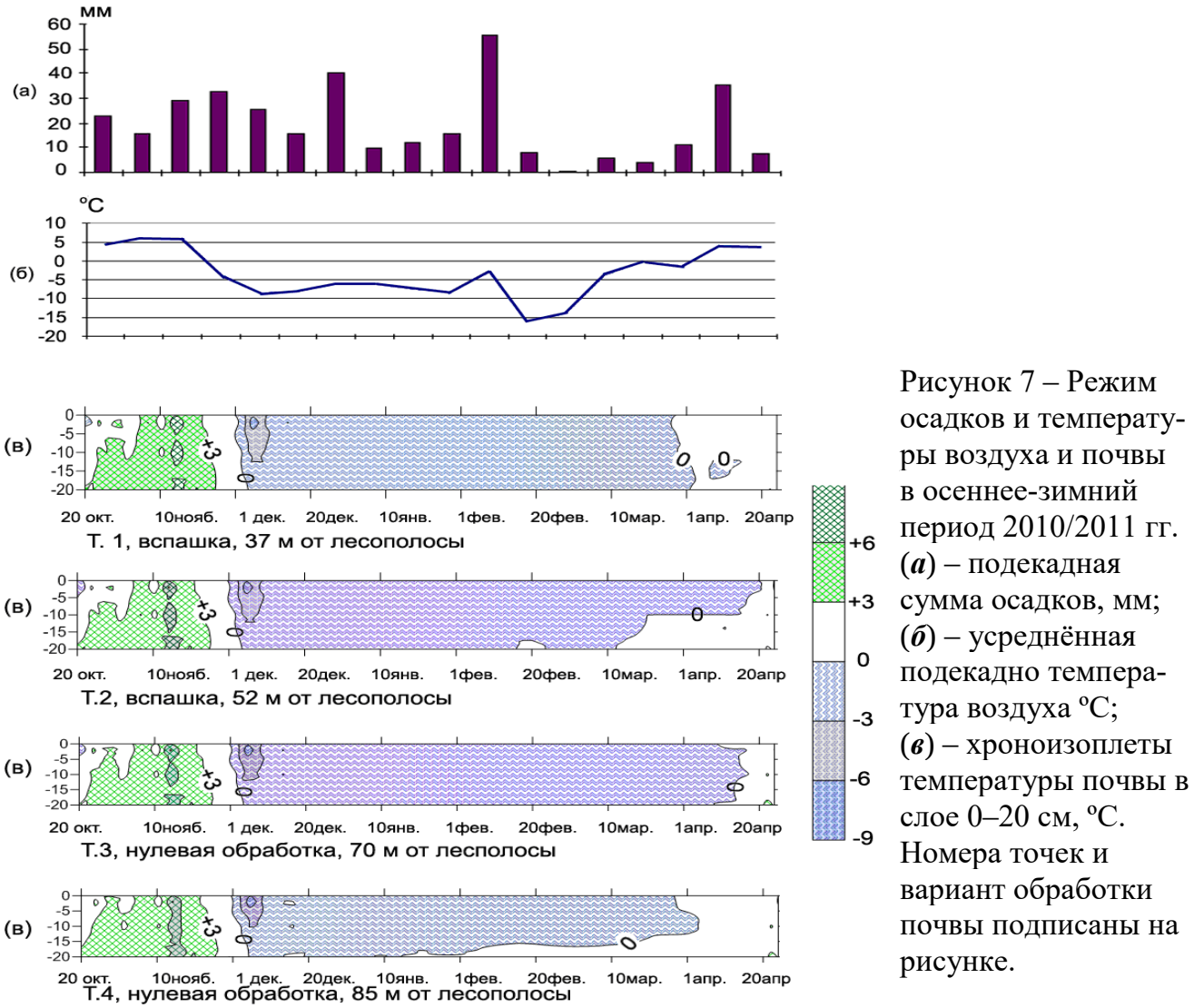


Рисунок 7 – Режим осадков и температуры воздуха и почвы в осеннее-зимний период 2010/2011 гг.
(***а***) – подекадная сумма осадков, мм;
(***б***) – усреднённая подекадно температура воздуха ºС;
(***в***) – хроноизоплеты температуры почвы в слое 0–20 см, ºС.
Номера точек и вариант обработки почвы подписаны на рисунке.

Колебания температуры у поверхности почвы являются весьма существенными с точки зрения формирования микроклиматических условий в разных частях поля. Особо важную роль при этом играет температура в самом верхнем слое почвы, как зимой, так и летом. Поэтому для выявления особенностей режимов температуры в разных точках на поле, помимо сравнения усреднённых показателей, более детально были обработаны данные о температуре почвы на глубине 2 см отдельно в осенне-зимний и весенне-летний периоды.

Способ обработки почвы не оказывал значимого влияния на режим температуры поверхности почвы. В то же время значимое влияние местоположения точек на режим температуры было выявлено на уровне экотона. Так, в точке 1, расположенной ближе всего к Лиственничной аллее, в позднеосенний период, до установления устойчивого снежного покрова, было выявлено отставание хода значений среднесуточной температуры поверхности почвы с запаздыванием на сутки, по сравнению с другими точками на поле и в сравнении со средней температурой по полю (рисунок 8, *а*). Для жаркого периода летнего сезона 2011 г., когда температура поверхности почвы в дневное время достигала +30ºС и более, также было выявлено влияние Лиственничной аллеи для точки 1. Здесь, на глубине 2 см, условия температуры были наименее контрастными по сравнению с другими точками на поле, наблюдались наименьшие отклонения температуры (в %) от медианных значений по полю для каждого срока измерения и наименьший абсолютный размах (рисунок 8, *б*). Самым неблагоприятным с точки зрения микроклиматических условий на поле местом оказалась точка 8, наиболее удалённая от Лиственничной аллеи. Здесь в весенне-летний период даже ранним утром (в 6 ч.) температура превышала медианное значение для этого времени суток в среднем на 12%.

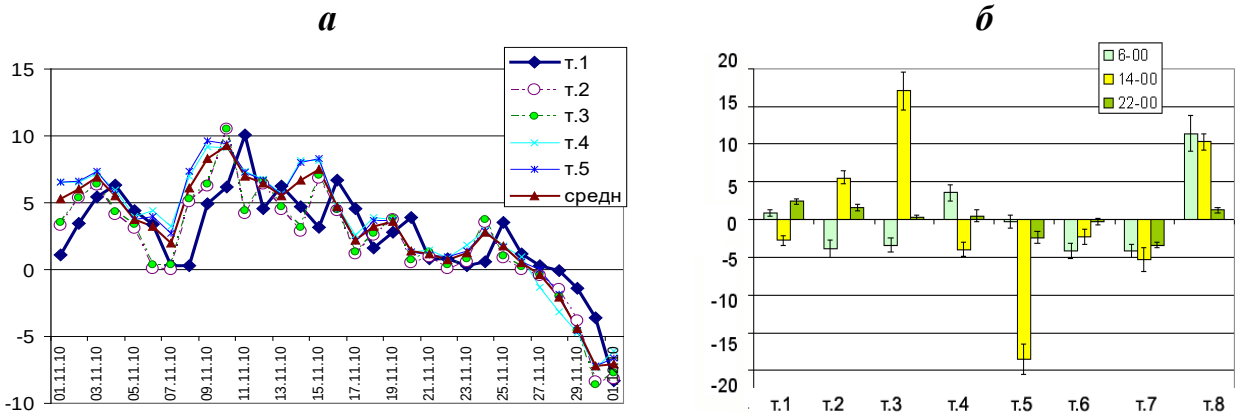


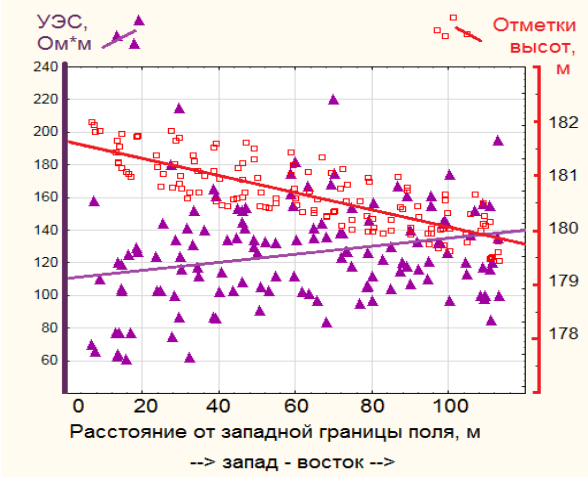
Рисунок 8 – Сравнение режима температуры почвы на глубине 2 см в поздне-осенний и весенне-летний период 2010/2011 г.: (***а***) – динамика среднесуточной температуры верхнего слоя почвы в пяти точках на поле за период с 1 ноября по 1 декабря 2010 г. и сравнение её со значениями, усреднёнными по всем точкам; (***б***) – отклонения (в %) частных значений температуры почвы от медианных значений по полю в каждый срок измерений в течение периода положительных температур, планками погрешностей показаны границы доверительных отклонений;

В целом, сезонный режим температуры пахотного слоя почвы в разных зонах на поле зависел от метео- и агроландшафтных условий, был связан с местоположением точки наблюдения и наличием растительности, а достоверной зависимости режима температуры от способа обработки почвы (вспашка или нулевая) не было выявлено.

Агрофизические свойства почвы. В концепции ТЗ для оценки пространственной неоднородности почвенного плодородия нередко применяют электрофизические методы обследования поля (Officer et al., 2004; Поздняков, 2009; Sudduth et al., 2005, 2017). В опыте ЦТЗ для каждого поля в 2–4 срока наблюдения были созданы карты УЭС почвы (для слоя 0–30 см). Обследование проведено по схеме сеточного опробования с частым шагом и с обязательной привязкой точек в локальной системе координат к плотам: по 2–3 точки на плот, количество точек на одно поле 200–550. Неоднократное обследование всех полей ЦТЗ с высокой частотой заложения точек на каждом поле позволило оценить устойчивость показателя УЭС в пространстве и во

времени, а также сопоставить картину устойчивости и вариабельности данного свойства с другими агрофизическими (сопротивление пенетрации, влажность), агрохимическими (pH, гумус, содержание подвижных элементов) свойствами почвы и с картиной развития растительности на этих же участках (вегетационные индексы, урожайность, численность сорных растений).

По результатам неоднократных обследований УЭС почвы на полях ЦТЗ был выявлен пространственный тренд изменения УЭС, связанный с воздействием рельефа: в целом, наблюдается общее увеличение значений УЭС почвы вниз по пологому склону в направлении с запада на восток (рисунок 9, на примере поля 2–ЦТЗ).



Эти наблюдения согласуются с картиной пространственного варьирования индекса NDVI посевов на ранних стадиях развития, как было показано выше (рисунок 5).

Рисунок 9 – Абсолютные отметки высот на поле 2–ЦТЗ в направлении с запада на восток (правая ось OX) и показатели УЭС почвы (левая ось OX)

Наличие тренда изменения УЭС почвы в направлении запад–восток не может быть объяснено только воздействием рельефа. Вероятно, это кумулятивное действие многих почвенных свойств, также изменяющихся вниз по склону. Вклад этих свойств почвы в значение УЭС описывается уравнением множественной линейной регрессии. Для данного случая множественная регрессия является значимым фактором (R=0,66; F-критерий=16,24 при $p<0,05$), она описывается следующим уравнением:

$$\textit{УЭС} = 278 - 0,55\times(\textit{T-20}) + 0,51\times(\textit{коорд-OX}) - 0,24\times(\textit{W-20}),$$

где T-20 – твёрдость почвы на глубине 20 см; коорд-OX – локальная координата точки на поле по оси OX локальной системы координат (в направлении Запад–Восток); W-20 – влажность почвы на глубине 20 см. Другие почвенные свойства (твёрдость на поверхности и на глубине 30 см, влажность на поверхности) в данном случае не оказывали существенного влияния на УЭС почвы. Также, на примере поля 2–ЦТЗ в целом были выявлены значимые отрицательные корреляционные связи между УЭС почвы и pH, ёмкостью катионного обмена, содержанием подвижного калия, биомассой и урожайностью ячменя (Железова, Самсонова, 2014).

Относительная картина пространственного распределения показателя УЭС почвы на полях ЦТЗ остается стабильной из года в год, при этом абсолютные показатели УЭС в разные сроки наблюдения могут существенно различаться (т.к. зависят от влажности в момент обследования), и это влияет на размах варьирования, но не влияет на общую пространственную картину (тренды, зоны устойчивости), которая обусловлена внешними условиями на поле (рельеф, обработка) и внутренними свойствами почвы (гранулометрический состав и др.). В целом, по всем срокам обследования межквартильный размах показателя УЭС агродерново-подзолистой почвы на полигоне ЦТЗ при влажности близкой к НВ лежит в диапазоне от 55 до 578 Ом*м, что согласуется с результатами других исследователей (Кондрашкин с соавт., 2011; Русаков с соавт., 2019). Экстремальные значения показателя УЭС почвы на

полигоне ЦТЗ за весь период наблюдений были связаны с локальными условиями увлажнения почвы: так, минимальное зафиксированное значение УЭС составило 2 Ом*м на поле 2–ЦТЗ 17.04.2014 г., при избыточном увлажнении пахотного слоя и ледовой прослойке в подпахотном, а максимальные – 2000–3300 Ом*м при пересыхании пахотного слоя в точках с песчано-гравийными прослойками в подпахотном.

Обработка почвы оказывает существенное влияние на УЭС пахотного слоя: на вариантах ресурсосберегающей технологии УЭС всегда ниже, чем на вспашке, и эта картина характерна для всех полей ЦТЗ и устойчива во времени (рисунки 10, 11).

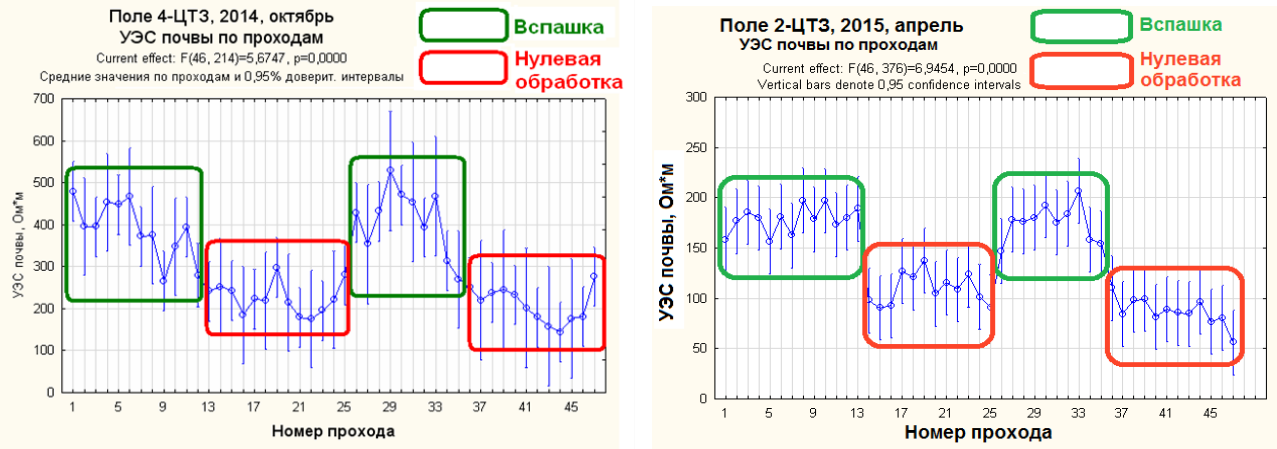
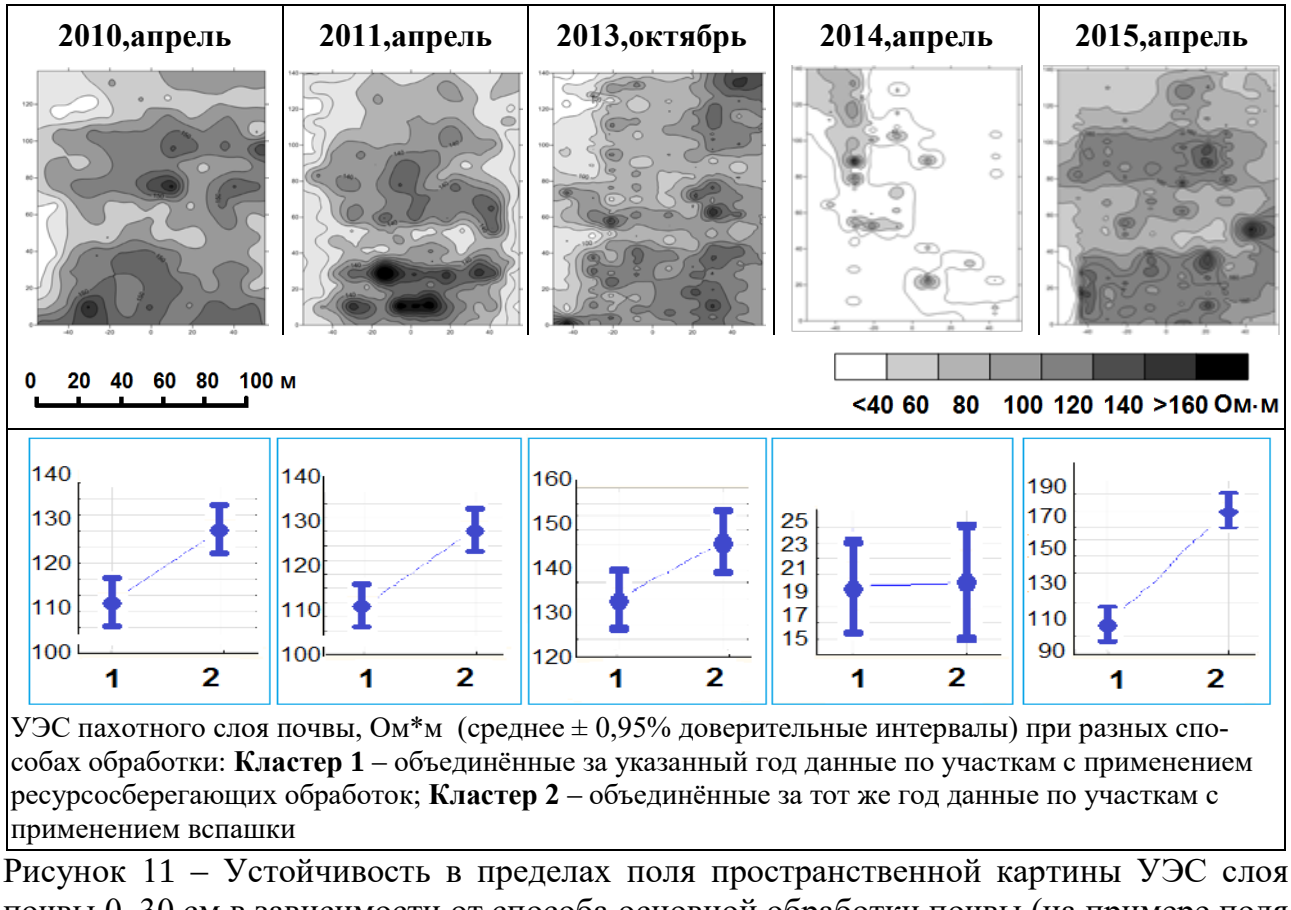


Рисунок 10 – Размах варьирования УЭС почвы под разными обработками по поперечным проходам-трансектам на примере двух полей ЦТЗ.



УЭС пахотного слоя почвы, Ом*м (среднее ± 0,95% доверительные интервалы) при разных способах обработки: **Кластер 1** – объединённые за указанный год данные по участкам с применением ресурсосберегающих обработок; **Кластер 2** – объединённые за тот же год данные по участкам с применением вспашки

Рисунок 11 – Устойчивость в пределах поля пространственной картины УЭС слоя почвы 0–30 см в зависимости от способа основной обработки почвы (на примере поля 2–ЦТЗ за период 2010–2015 гг.). Верхний ряд диаграмм: картограммы УЭС одного и того же поля в разные годы. Нижний ряд: соответствующие картам результаты объединения показателей УЭС в кластеры по способу обработки почвы (по оси OX – номера кластеров, по оси OY – показатели значений УЭС, Ом м).

Согласно результатам других исследователей (Поздняков, 2015), показатель УЭС снижается при повышении содержания органического вещества в почве. Но на полигоне ЦТЗ за первые 10 лет наблюдений не было выявлено существенного повышения количества органического вещества в почве по вариантам ресурсосберегающей технологии, следовательно, снижение УЭС на этих вариантах вызвано сочетанием других факторов, прежде всего, плотностью сложения почвы.

Устойчивость пространственной структуры УЭС почвы на поле выявляется также по корреляционной связи между показаниями УЭС в разные сроки обследования при условии, что влажность почвы не была лимитирующим фактором и попадала в диапазон НВ – ППВ, ближе к НВ. Так, при сравнении показателей УЭС почвы на поле 2–ЦТЗ за период 2010–2015 гг. была выявлена устойчивость контуров и прямая корреляционная связь между показателями УЭС в сравниваемые сроки (рисунок 11, таблица 1). Исключение составляет срок исследования ранней весной 2014 г., при высоком влагонасыщении верхнего слоя почвы и промерзании подпахотного, что значительно изменило пространственную картину УЭС (рисунок 11, 2014).

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции между показателями УЭС почвы на поле 2–ЦТЗ в разные сроки наблюдений при двух уровнях усреднения данных

Усреднение данных по плотам					
	2010,апрель	2011,апрель	2013,октябрь	2014,апрель	2015,апрель
2010, апрель	**1**	**0,49**	**0,57**	**- 0,37**	**0,45**
2011, апрель		**1**	**0,45**	**- 0,24**	**0,57**
2013, октябрь			**1**	**- 0,47**	**0,24**
2014, апрель				**1**	**- 0,09**
2015, апрель					**1**
Усреднение данных по делянкам технологий					
	2010,апрель	2011,апрель	2013,октябрь	2014,апрель	2015,апрель
2010, апрель	**1**	**0,80**	**0,66**	**- 0,58**	**0,82**
2011, апрель		**1**	**0,46**	**- 0,39**	**0,77**
2013, октябрь			**1**	**- 0,78**	**0,32**
2014, апрель				**1**	**- 0,32**
2015, апрель					**1**

*Все коэффициенты корреляции значимы для уровня p<0,05

На полигоне ЦТЗ УЭС пахотного слоя зависит от плотности сложения и твёрдости (сопротивление пенетрации) почвы при разных способах основной обработки (Железова с соавт., 2019 а). По сравнению со вспашкой, при минимальных и нулевых обработках, твёрдость почвы всегда выше за счёт более компактного расположения почвенных агрегатов, снижения объёма пор аэрации, что при прочих равных условиях способствует повышению влагонасыщенности и снижению УЭС почвы (рисунок 12).

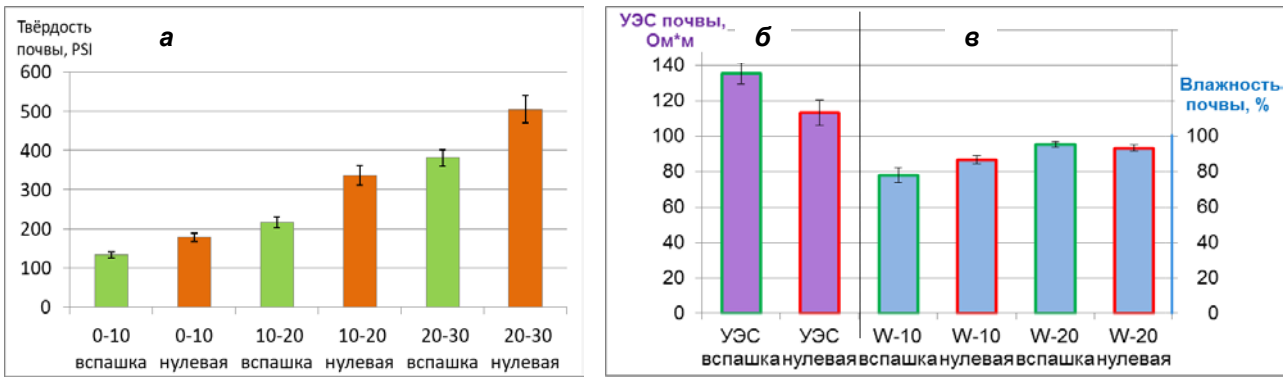
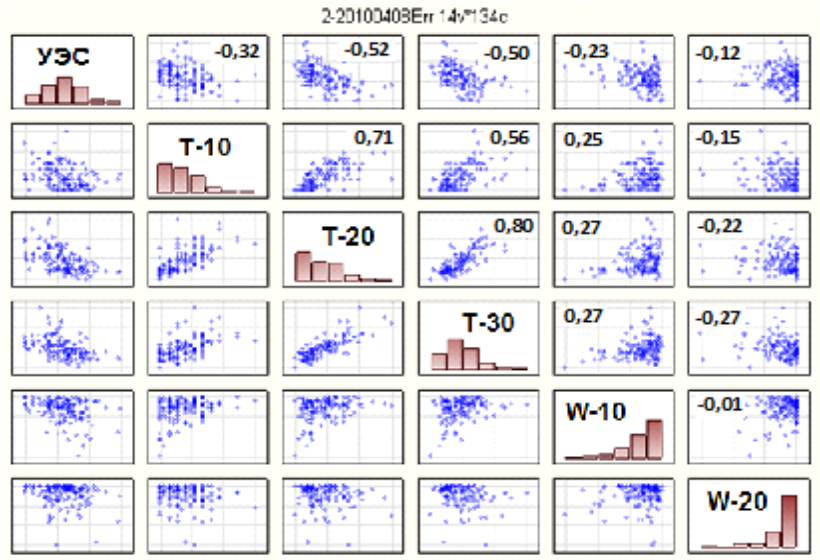


Рисунок 12 – Твёрдость (PSI), УЭС (Ом*м) и влажность (%) почвы при применении отвальной вспашки и нулевой обработки почвы (на примере поля 2–ЦТЗ; 8 апреля 2010): ***а*** – твёрдость почвы по слоям (0–10, 10–20, 20–30 см); ***б*** – УЭС слоя 0–30 см; (***в***) – влажность почвы по слоям (0–10 и 10–20 см). Планками погрешностей на диаграммах показаны 95%-ные доверительные интервалы средних значений.

Тесноту связи между УЭС, твёрдостью и влажностью почвы оценивали по коэффициенту корреляции Спирмена Rs (рисунок 13). На момент обследования в условиях высокой влагонасыщенности почвы наиболее тесная корреляционная связь была выявлена между показаниями твёрдости почвы на глубинах 20 и 30 см (Rs=0,80), а показатель УЭС был наиболее тесно связан с твёрдостью почвы на глубинах 20 и 30 см (Rs= –0,52 и –0,50 соответственно). Все вычисленные коэффициенты Rs значимы на уровне p<0,05.



Условные обозначения:
УЭС – удельное электрическое сопротивление;
T-10, T-20, T-30 – твёрдость почвы в слоях 0–10, 10–20 и 20–30 см;
W-10, W-20 – влажность почвы в слоях 0–10 и 10–20 см.
Числа в ячейках диаграмм – коэффициенты корреляции Спирмена

Рисунок 13 – Связь между удельным электрическим сопротивлением почвы (в слое 0–30 см), твёрдостью почвы на трёх глубинах (в слоях 0–10, 10–20, 20–30 см) и влажностью на двух глубинах (в слоях 0–10 и 10–20 см).

На примере двух лет пространственных исследований твёрдости и влажности почвы ранней весной (в момент наибольшего влагонасыщения) на поле 2–ЦТЗ (2010 и 2017) и при изучении сезонной динамики твёрдости и влажности в течение нескольких сезонов было показано, что влагозапас в слое 0–30 см был выше на 2–16 мм на вариантах ресурсосберегающей технологии по сравнению со вспашкой. В то же время и твёрдость почвы (сопротивление пенетрации) на вариантах с минимальными обработками повышается на 15–50%, на нулевых обработках на 30–80% по сравнению со вспашкой. В целом, в многолетнем опыте твёрдость (сопротивление пенетрации) агродерново-подзолистой окультуренной почвы изменялась от 70 PSI (483 кПа) при условии полного влагонасыщения, до 1200 PSI (8274 кПа) в момент засухи (при весовой влажности 3–5%). Максимальная твёрдость почвы за период 2010–2017 гг. была отмечена на вариантах опыта с применением ресурсосберегающих технологий в моменты засух и в периоды созревания зерновых культур.

Агрохимические свойства почвы. В концепции ТЗ отбор образцов для агрохимического обследования почвы проводят по регулярной сетке или по заранее выделенным контурам неоднородности (Методические указания мониторинга плодородия…, 2003; Точное сельское хозяйство, 2009). На опытном полигоне ЦТЗ пространственно-временные закономерности агрохимических свойств почвы изучают в динамике, с отбором проб по сетке. Схема отбора проб в разные годы не совпадала, но количество проб за один срок отбора было не менее 32, т.е. не менее 4 точек на каждую учётную делянку технологий. Для каждого срока были построены картограммы обеспеченности почвы элементами минерального питания растений, где каждое поле разделено на ячейки одинакового размера 27×35 м (рисунок 14, на примере

поля 2–ЦТЗ). На картограммах отображены средние значения pH, P_2O_5 и K_2O, рассчитанные по нескольким образцам, отобранным из каждой ячейки.

Рисунок 14 – Картограммы поля 2–ЦТЗ по кислотности почвы, содержанию обменного фосфора и калия (цифры в ячейках картограмм – средние значения определяемого свойства по результатам агрохимического анализа). Точечные диаграммы – значения изучаемых агрохимических показателей на поле в направлении Запад–восток, вниз по склону (по оси OX диаграмм – расстояние вдоль поля от западного края, м).

В целом, почва полигона ЦТЗ характеризуется как кислая, обеспеченность почвы легкодоступным фосфором высокая, легкодоступным калием – средняя и высокая, что достигается путём ежегодного внесения минеральных удобрений в рекомендуемых дозах под все культуры севооборота, так как возделывание осуществляется по интенсивной технологии. Достоверной динамики изменения обеспеченности элементами минерального питания как в целом на полях, так и под сравниваемыми в опыте технологиями, не выявлено. Для показателя pH, напротив, выявлена достоверная динамика. С момента закладки опыта ЦТЗ по настоящее время на поле не проводили известкование, что закономерно привело к повышению кислотности почвы. За период с 2008 по 2014 гг. выявлено снижение показателя pH_{KCl} в среднем по полю на 0,6 единиц (Железова с соавт., 2017), а по отдельным делянкам опыта на 0,1–0,9 единиц (рисунок 14, ряд диаграмм pH). Такой уровень кислотности свидетельствует о необходимости проведения известкования почвы. В практике ТЗ возможно осуществлять известкование почвы в дифференцированных дозах. Принимая во внимание легкосуглинистый гранулометрический состав почвы опытного поля и содержание гумуса на уровне 1,9–2,9 % (Беленков с соавт., 2013), для восточной половины поля рекомендуемая норма внесения извести ($CaCO_3$) составляет 6,5 т/га, для западной – 5,5–6 т/га (согласно действующим рекомендациям ВНИИА для Московской области) (Железова, Ананьев, 2019).

Таким образом, для комплексной оценки потенциального плодородия почвы каждого поля с целью перехода к концепции дифференцированного подхода в ТЗ необходимо проанализировать следующую информацию: карты рельефа, зоны влияния экотонов агроландшафта, УЭС почвы, а также пространственные карты (снимки) растительных индексов во время вегетации. Маршрут отбора проб для агрохимического обследования следует составлять с учётом зон продуктивности, выявленных по совокупности вышеперечисленных признаков (Железова, Ананьев, 2020).

Глава 4. Верификация разных методов оценки вегетационного индекса NDVI полевых культур

Подробные исследования NDVI посевов зерновых культур были проведены на опыте ЦТЗ в течение 2009–2019 гг. с использованием наземных и дистанционных методов. Наземные исследования проводили с периодичностью 1 раз в 7–10 дней оптическими датчиками GreenSeeker (далее GS), N-tester (NT) и 1 раз в месяц датчиком N-sensor (NS). Эти датчики имеют активные источники излучения в красном и ближнем инфракрасном диапазоне. Наземные показатели сравнивали с результатами дистанционной съёмки NDVI по данным нескольких обследований пассивными камерами с разным пространственным разрешением (рисунок 15). В 2011–2013 гг. для оценки NDVI использовали снимки высокого разрешения (Spot-5, Spot-6), всего 21 снимок. В сезоне 2014–2015 гг. применяли аэрофотосъёмку посевов с БПЛА в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (7 сроков обследования) и использовали спутниковые снимки Landsat (5 сроков). С 2017 г. в работе применяют снимки системы Sentinel и Planet (Зейлигер с соавт., 2019).

В Базу данных ЦТЗ информация по NDVI зерновых культур по результатам съёмки прибором GreenSeeker (GS) поступает еженедельно с каждой делянки «плот». Сезонная динамика NDVI вычисляется на основе медианных значений NDVI. Медиану для оценки NDVI на учётной площадке использовать предпочтительнее, чем

среднее значение, потому что в целом по полю в разные сроки обследования распределение NDVI отличается от нормального (рисунок 16).

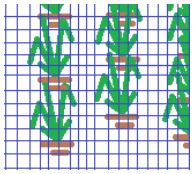
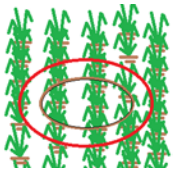
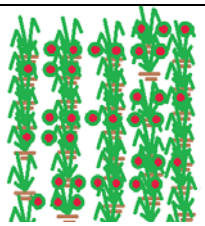
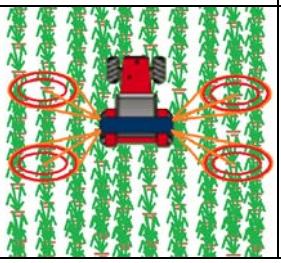
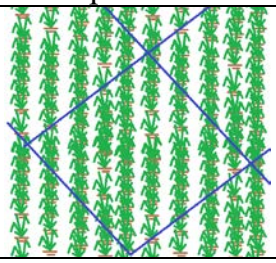
БПЛА	GreenSeeker	N-tester	N-sensor ALS	Спутник
NDVI	NDVI	N-index	BI (Biomass)	NDVI
Пиксель аэрофото-съёмки (1 клетка)	Пятно от луча (овал)	Серия единичных измерений (область точек)	Ширина обзора лучей (объединение овалов)	Пиксель снимка высокого разрешения (1 клетка)
От 5×5 см до 20×20 см	0,6–1 м^2	15–20 м^2	Около 15×2,5 м	От 6×6 м до 10×10 м
Пассивная съёмка отражений	Активный датчик	Активный датчик	Активный датчик	Пассивная съёмка отражений
				

Рисунок 15 – Сопоставление способов оценки вегетационных индексов посевов датчиками разных принципов действия: соотношение размеров учётных «точек» и схематическое размещение их в посевах (по Железовой, 2018 *а*).

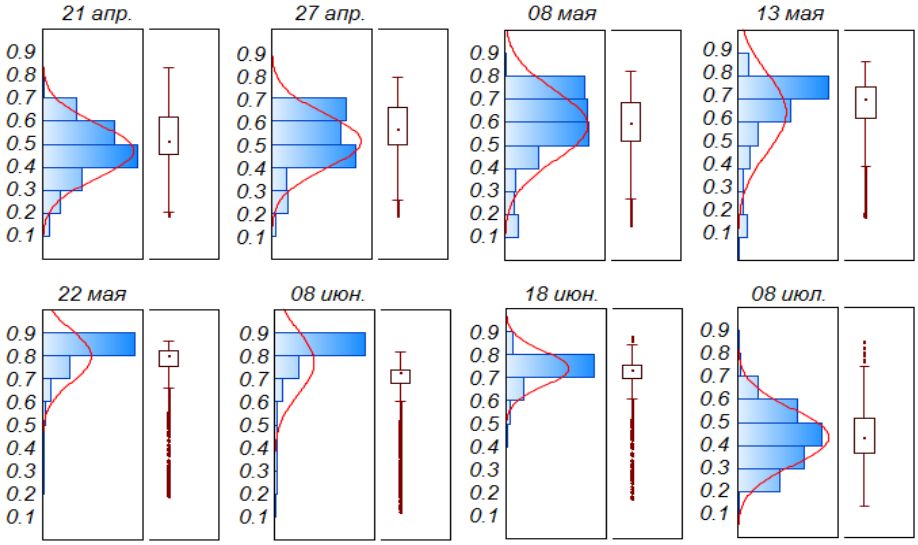


Рисунок 16 – Графическое представление варьирования показателя NDVI посева озимой пшеницы (на примере поля 2–ЦТЗ за вегетационный сезон 2015 г.)

По результатам исследований с применением приборов GS и NS в течение двух ротаций севооборота показана возможность равнозначного использования индексов NDVI и BI при оценке вариабельности посевов зерновых культур, т.к. выявлена тесная корреляционная связь между этими показателями. Однако для каждого срока обследования коэффициенты пересчёта из NDVI в BI будут разными, с учётом развития физической биомассы посева, его высоты и площади листовой поверхности. Встроенная база данных прибора N-sensor есть не что иное, как результат пересчёта NDVI в BI по эмпирическим формулам для разных полевых культур, рассчитанным на основании многолетних полевых наблюдений в разные фазы развития.

При сравнении результатов, полученных одновременно всеми тремя оптическими датчиками (GS, NS и NT) была выявлена вариабельность вегетационных индексов, которая складывается из нескольких составляющих: 1) технологическая (зависимость значений измеряемого показателя от технологии возделывания); 2)

почвенно-биологическая (зависимость от состояния растений в каждом конкретном месте на поле) и 3) приборно-аналитическая (зависимость от способа получения и усреднения информации). Аналитическая ошибка данных методов не превышает 1–2%, т.е. приборно-аналитическая составляющая вариабельности ничтожно мала по сравнению с вкладом природных и технологических факторов (Железова, 2018 *а*). На рисунке 20 приведены в графическом виде совмещённые показатели, полученные с трёх приборов для двух сроков обследования в нескольких местах на поле. Показатель относительной биомассы (BI, измерен прибором NS) сравнивается с NDVI (измерен прибором GS) и с показателями прибора NT (относительные единицы, на графике отображены в масштабе шкалы NDVI). Показатели приборов GS и NS, построенные по линии трансекты (с учётом усреднения по ширине захвата луча NS), выглядят идентично друг другу (рисунок 17), при этом оба показателя достаточно сильно варьируют на малых расстояниях в пределах длины плота (коэффициенты вариации NDVI по отдельным плотам для данного срока от 8 до 57%, в среднем 21–22%). Индекс содержания азота («азотный статус растений», относительная величина), измеряемый прибором NT – среднее значение, полученное при измерении по 30–32 растениям, в опыте ЦТЗ такие усреднённые значения получены с площади отдельных плотов. На диаграммах (рисунок 17) значения NDVI по GS показаны синей сплошной линией, а показания NT на этих же площадках – коричневой пунктирной линией. В большинстве случаев данные показатели близки друг к другу и находятся в прямой зависимости, но в некоторых местах на поле выявляется противоположная зависимость: при высоких значениях NDVI низкие показатели NT и наоборот (рисунок 17, примеры *б*).

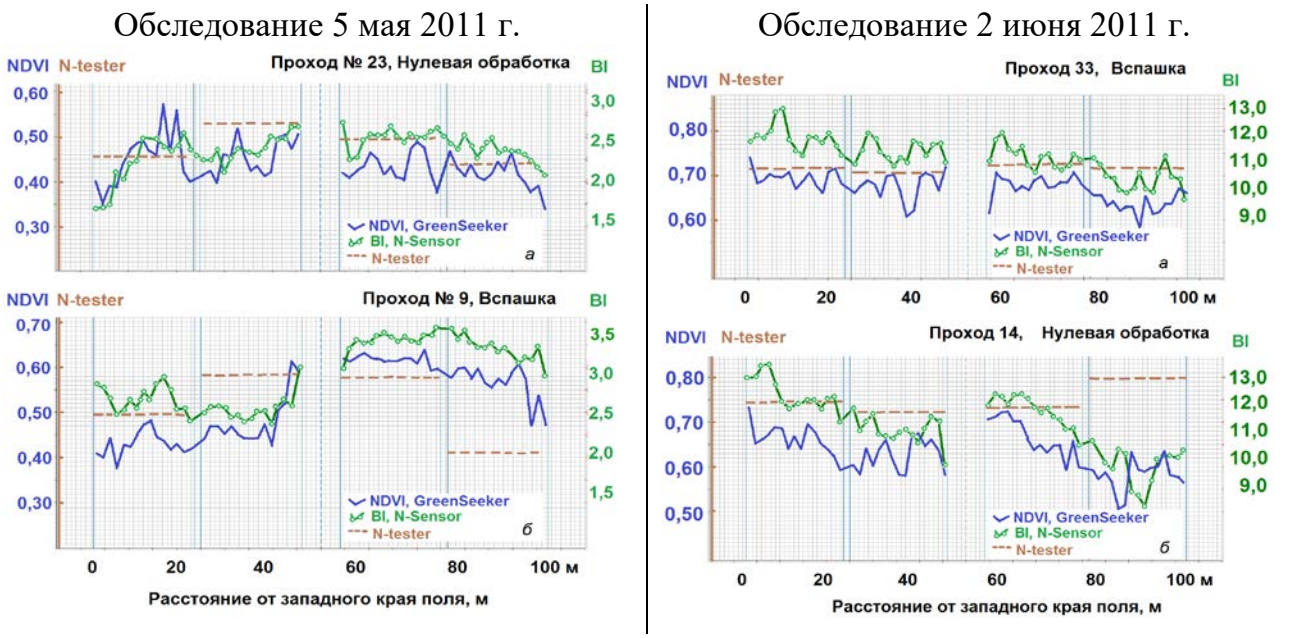


Рисунок 17 – Сопоставление пространственных данных, полученных тремя оптическими датчиками (трансекты вдоль рядков посева). Сроки обследования: 05 мая 2011 г. (фаза выход в трубку ВВСН–32–33) и 02 июня 2011 г. (фаза колошение ВВСН–51–53) (***а***) – сопряженное возрастание и снижение показателей трёх оптических датчиков при обследовании по трансекте на поле; (***б***) – показания трёх оптических датчиков сильно расходятся.

В начале вегетации при сопоставлении показателей NT с GS достоверной связи не выявлено (коэффициент корреляции R=0,05), то есть индекс NDVI посева в целом не совпадает с аналогичным показателем индивидуальных растений. Данные несоответствия результатов трёх способов приборных измерений объясняются высокой

вариабельностью состояния посевов на малых расстояниях, неравномерной обеспеченностью индивидуальных растений минеральными элементами, в особенности легкодоступным азотом. Эта вариабельность улавливаются всеми тремя оптическими датчиками, и при обработке таких «сырых» исходных данных предусмотрены процедуры усреднения и сглаживания. Данный пример обследования посевов зерновых культур оптическими датчиками демонстрирует влияние масштаба опробования на получаемый результат. Расхождение показателей зависит от срока обследования и условий *in situ*: состояния растений на фоне пестроты почвенных свойств, густоты всходов, метеоусловий, наличия сорняков и др. В целом, наиболее уязвимым является метод точечного получения информации, т.к. его результат зависит в том числе и от субъективных причин. Это весомый аргумент в пользу того, чтобы использовать подход обследования по площади поля в целом, например, с применением средств дистанционного зондирования. Но у данных методов также есть свои особенности и недостатки, которые необходимо учитывать в работе.

При аэрофотосъёмке с БПЛА разрешающая способность составляет 5–20 см/пиксель. В производственном посеве озимой пшеницы в колхозе имени Ленина съёмку проводили с высоты 900 м с разрешающей способностью 20 см/пиксель. На этом объекте основной вклад в пестроту посева вносили природные причины (рельеф, экотон) и случайные факторы, т.к. на всей площади поля технология обработки почвы и посева была одинаковой. Для оценки пространственного варьирования NDVI был выбран участок поля 25×25 м (рисунок 18, *а*), для которого была построена семивариограмма по всем пикселям съёмки, попавшим на данный участок (рисунок 18, *в*). Семивариограмма была описана сферической моделью с рангом 9–10 м. Исходя из этого значения (9 м) был выбран соответствующий размер скользящего окна, который использовали для процедуры сглаживания первичных данных. Среднее значение NDVI посевов пшеницы для этого срока обследования составило 0,28 (рисунок 18, *б*).

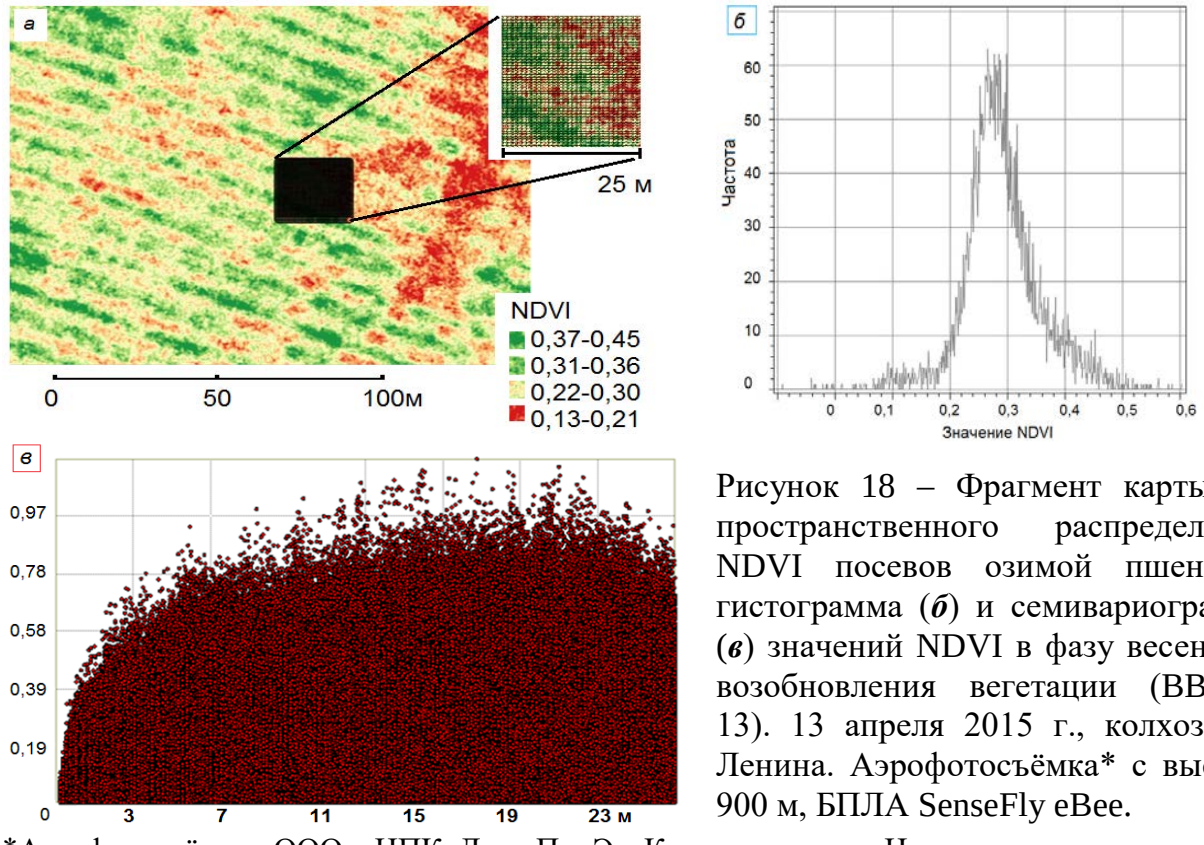


Рисунок 18 – Фрагмент карты (***а***) пространственного распределения NDVI посевов озимой пшеницы, гистограмма (***б***) и семивариограмма (***в***) значений NDVI в фазу весеннего возобновления вегетации (ВВСН–13). 13 апреля 2015 г., колхоз им. Ленина. Аэрофотосъёмка* с высоты 900 м, БПЛА SenseFly eBee.

*Аэрофотосъёмка: ООО «НПК Джи Пи Эс Ком» по заказу Центра точного земледелия, алгоритмы обработки данных разработаны совместно М.В. Вьюновым и С.В. Железовой.

Оценку посевов с БПЛА в опыте ЦТЗ проводили с пространственным разрешением съёмки 3–5 см/пиксель. Для сопоставления наземного и дистанционного способов оценки NDVI (рисунок 19) на полученных картах были заложены линии поперек посева (рисунок 19, *а*), с которых была получена первичная цифровая (количественная) информация об NDVI по результатам съёмки прибором GS и с БПЛА (рисунок 19, *б, в*). Для обработки полученных данных был выбран размер скользящего окна сопоставимый с шириной междурядьев посева под разными обработками.

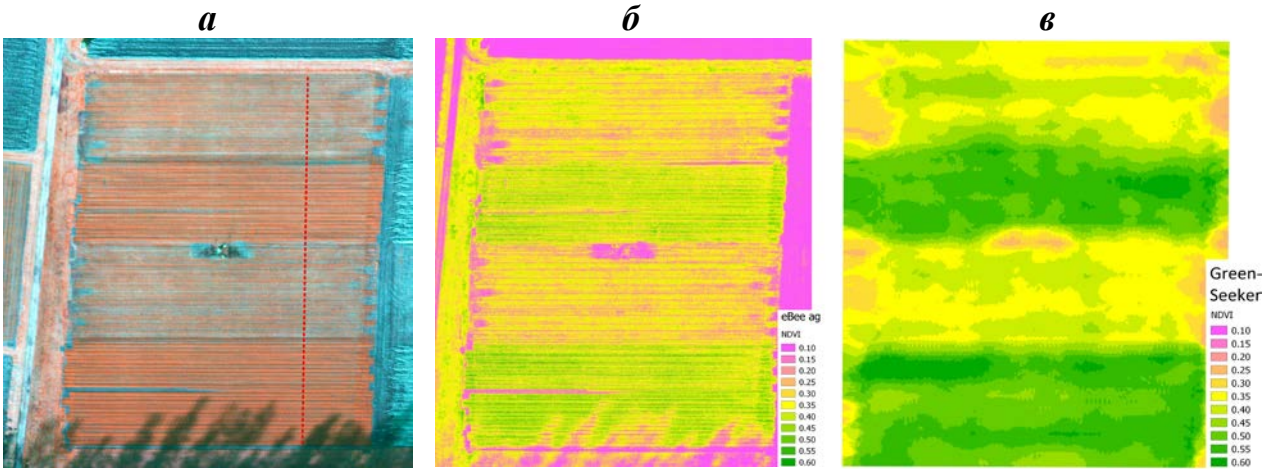


Рисунок 19 – Определение NDVI посевов озимой пшеницы на поле 2–ЦТЗ в фазу кущения 30 октября 2014 г.: (***а***) – карта отражений в ближнем ИК диапазоне, пунктиром показана линия трансекты; карты NDVI по результатам обработки съёмок пассивной камерой SenseFly (***б***) и активной камерой GreenSeeker (***в***).
*Аэрофотосъёмка: ООО «НПК Джи Пи Эс Ком» по заказу Центра точного земледелия

На поле 2–ЦТЗ была проведена верификация результатов беспилотной съёмки БПЛА SenseFly eBee AG с камерой Canon S110 NIR (пассивная съёмка) по наземному обследованию прибором GreenSeeker RT 200 с активным источником излучения в четыре срока обследования от фазы кущения до фазы выхода в трубку. Результаты определения NDVI пассивной камерой отличались от результатов прибора GS в каждый срок обследования. Для верификации значений NDVI по показателям пассивных датчиков необходимо использовать уравнения пересчёта на показатели NDVI активного датчика в этот же срок. По сути, это уравнения связи, где искомое значение Y – есть истинное значение NDVI (по активному датчику), а переменная X – показатель NDVI с пассивного датчика. В разные фазы развития посева эти уравнения пересчёта NDVI с пассивного датчика на активный не совпадают между собой. До фазы смыкания посева можно применять линейные уравнения пересчёта, причем параметры уравнений в разные сроки будут разными (Железова с соавт., 2016). После смыкания рядков посева степенные или экспоненциальные уравнения пересчёта применять предпочтительнее. При объединении данных по всем четырём срокам сравнения было показано, что в целом, по общему массиву данных следует применять экспоненциальное уравнение пересчёта показаний пассивного датчика в показания, соответствующие эталонному активному датчику (рисунок 20).

Для приведенного примерна эмпирическая формула пересчёта данных об NDVI с пассивного датчика в показатели NDVI активного датчика описана экспоненциальной зависимостью:

$$\boldsymbol{Y} = 0{,}16 \times \boldsymbol{e}^{2{,}28\boldsymbol{x}},$$

где $\boldsymbol{Y}$ =NDVI по GreenSeeker® RT200, $\boldsymbol{x}$ =NDVI по SenseFly eBee AG Canon S110 NIR, $\boldsymbol{e}$ – основание натурального логарифма. Приведённое уравнение достоверно подтверждает связь между показателями NDVI, измеренными двумя способами (R^2 = 0,89 при $p < 0,05$).

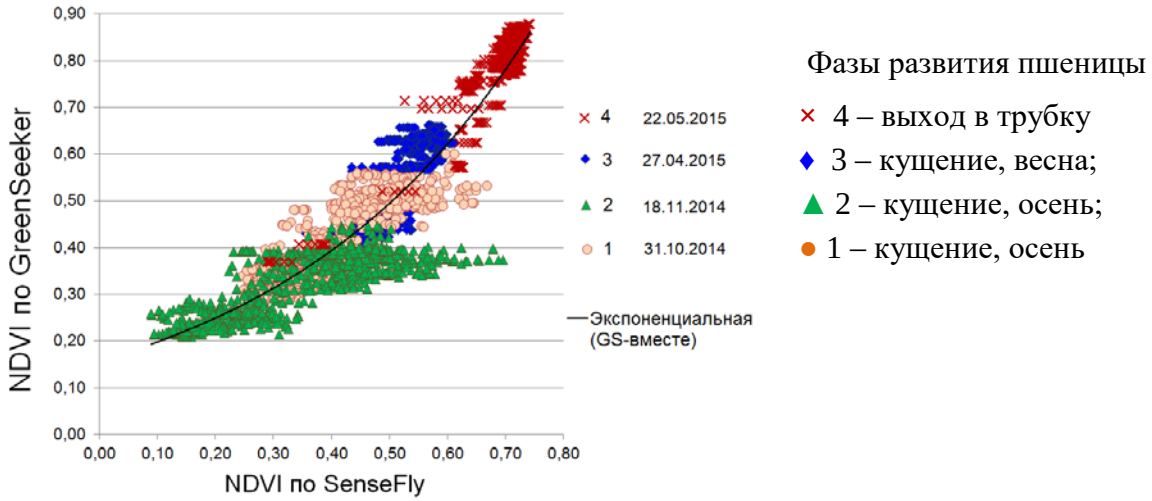


Рисунок 20 – Зависимость между показателями NDVI, измеренными при аэрофотосъёмке SenseFly eBee AG Canon S110 NIR (показатель по оси OX) и при наземном сканировании прибором GreenSeeker® RT200 (показатель по оси OУ) в разные сроки обследования

Для оценки NDVI посевов зерновых культур в производственных посевах колхоза имени Ленина помимо съёмки с БПЛА также были использованы спутниковые снимки Landsat, обработанные с применением функционала агроплатформы ExactFarming и результаты наземного обследования посевов (рисунок 21).

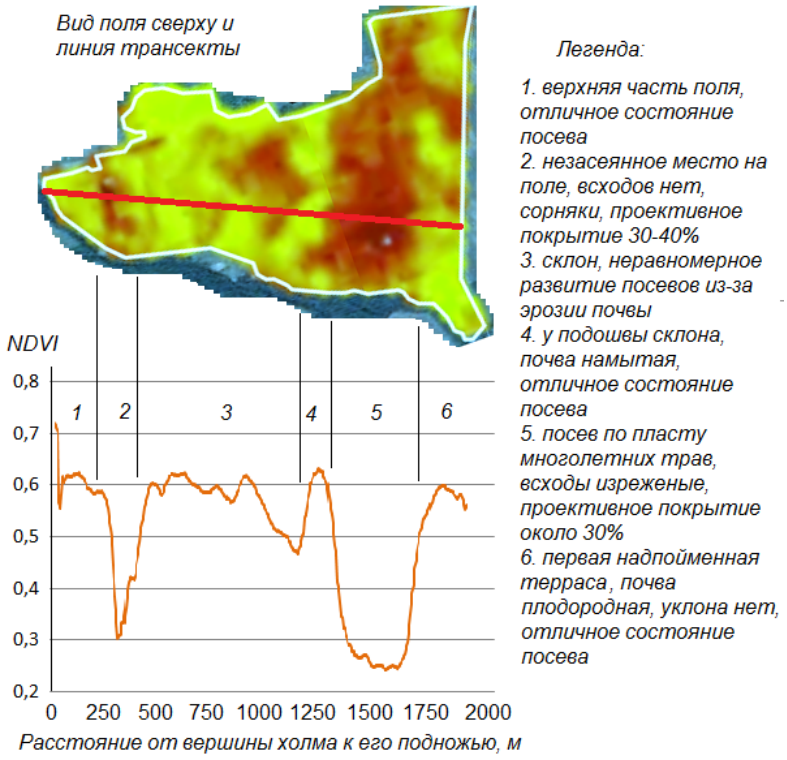


Рисунок 21 – Карта пространственного распределения индекса NDVI на поле озимой пшеницы в фазу выхода в трубку (по снимку Landsat от 26 мая 2015 г.) и график значений NDVI вдоль выбранной трансекты. Карта NDVI поля получена из сервиса ExactFarming; значения NDVI по линии трансекты рассчитаны в программе QGIS.

На основании дистанционной оценки поля и функционала агроплатформы ExactFarming возможно разработать рекомендации по внесению азотной подкормки в дифференцированных дозах. Кроме того, такая пестрота NDVI поля должна служить основанием для проведения дополнительного наземного обследования.

На полигоне ЦТЗ в 2011–2013 гг. для оценки NDVI были использованы спутниковые снимки высокого разрешения: Spot-5 (пространственное разрешение красного и ближнего ИК каналов 10 м), Spot-6 (разрешение 6 м). Для верификации данных NDVI с этих снимков использовали результаты наземных обследований прибором GS, полученные в даты, наиболее близкие к моменту спутниковой съёмки (разница между датами обследования составляла от 0 до 3 дней). Первичная подготовка спутниковых снимков включала процедуру атмосферной и пространственной коррекции. Помимо этого при калибровке снимков также была использована информация об отражающей способности и показателях NDVI прилегающих к полю ЦТЗ объектов различной природы: водных (пруды), техногенных (крыши зданий и асфальтовые покрытия) и растительных (лесополосы и спортивные газоны). Пример обработки информации со снимка Spot-5 от 21 июня 2012 г. показан на рисунке 22.

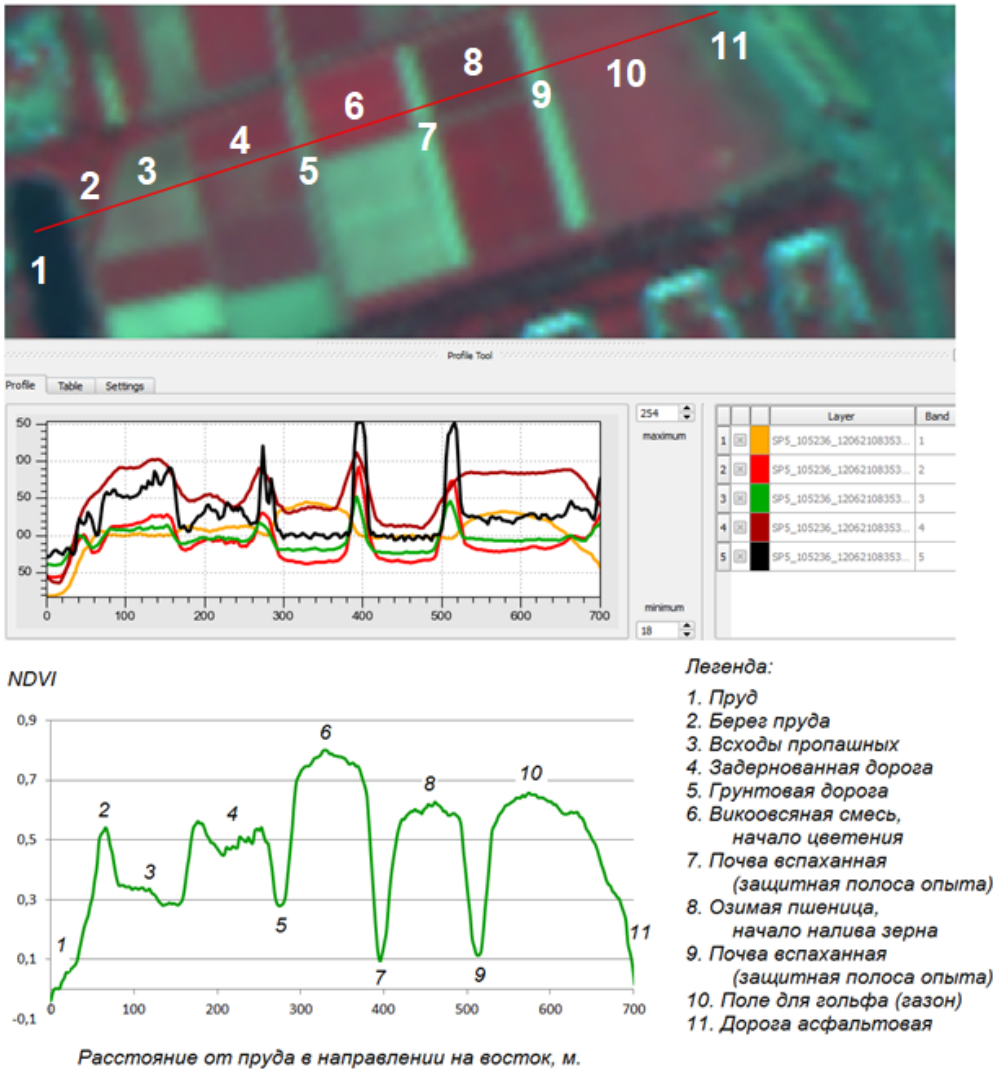


Рисунок 22 – Пример распознавания посевов полевых культур и нерастительных объектов по спутниковому снимку высокого разрешения и величине индекса NDVI на территории Полевой опытной станции РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. Использован снимок Spot-5 от 21 июня 2012 г. Обработка снимка в пакете программ QGIS (верхний снимок и под ним графики отражения в разных диапазонах) и Excel MS Office (нижний график) (по Железовой с соавт., 2018)

Для вычисления NDVI по снимку в пакете программ QGIS на каждом изображении было заложено по несколько пробных линий в разных направлениях по полю (на рисунке показана одна линия). В данном примере пробная линия для оценки NDVI пересекает пруд, поля под разными культурами, дороги, защитные полосы опыта ЦТЗ (пропашки), гольф-поле и асфальтовую дорогу. Для калибровки в качестве реперных (стандартных) значений NDVI были использованы условные константы NDVI, неоднократно поверенные в течение нескольких вегетационных сезонов в полевых наземных исследованиях с применением активного датчика GS (Железова с соавт., 2018): вспаханная почва, грунтовая дорога, асфальтовое покрытие и др. (таблица 2). Также по наземным измерениям с помощью прибора GS были определены пороговые значения NDVI всходов зерновых культур, которые могут быть использованы для верификации данных ДЗЗ. Показано, что для зерновых культур сплошного сева значения NDVI, определённые по результатам съёмки спутников Spot-5 и Spot-6, могут существенно отличаться от значений, полученных с применением активного датчика, на величину от 0,01 до 0,25 NDVI, а для пропашных культур это расхождение ещё выше. При сопоставлении показателей NDVI по спутниковой съёмке высокого разрешения и наземным исследованиям за три года наблюдений было выявлено, что для зерновых культур (и, вероятно, для всех культур сплошного сева) расхождения наземных и дистанционных показателей в начальные фазы развития (всходы, начало кущения) является наибольшим, а к моменту достижения пика NDVI в фазу колошения – наименьшим (отклонения могут достигать соответственно 25–33% и 1–9%)

Таблица 2 – Реперные (стандартные) значения индекса NDVI по показаниям прибора GreenSeeker ® RT 200 на примере объектов Полевой опытной станции в весенне-летний период (по Железовой с соавт., 2018)

Объект	NDVI
Вспаханная дерново-подзолистая окультуренная почва без растений, растительных остатков и сорняков	0,11–0,12
Почва с небольшим количеством измельченных пожнивных остатков (не более 1–2 % проективного покрытия)	0,14–0,17
Всходы зерновых в фазе «шильца» и первого листа (ВВСН–09–10) по почве без пожнивных остатков при междурядьях 12 см и стандартной норме высева (5–5,5 млн. шт. семян /га)	0,13–0,16
Всходы зерновых в фазе трёх листьев (Фаза ВВСН–13) (при норме высева 5–5,5 млн. шт. семян /га)	0,23–0,26
Грунтово-гравийная дорога со слабым задернением	0,25–0,30
Задернённые полевые дороги с низко скошенной травой	0,45–0,59
Гольф-поле или газон, постоянно скашиваемый на высоту 3–4 см, поддерживается на постоянных подкормках удобрениями и на поливе	0,65–0,75
Лесополоса из клёна гиннала вдоль северной границы опыта ЦТЗ, с середины июня по конец августа	0,78–0,80
Многолетние бобовые травы, посевы клевера во время активной вегетации с конца мая по конец августа (исключая период 2 недели с момента укоса)	0,82–0,88

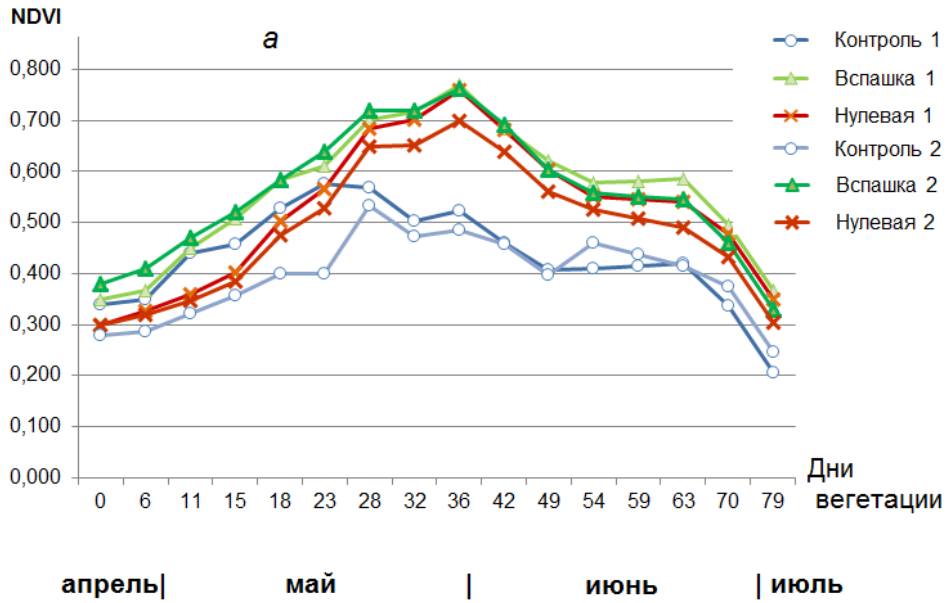
Приведенные в таблице 2 реперные значения NDVI (по GS) в некоторых случаях не совпадают со значениями NDVI со спутниковых снимков. Наиболее существенные расхождения выявлены в начале вегетации и на пропашных культурах из-за влияния непокрытой растительностью почвы, как правило, в таких случаях при съёмке пассивной камерой показатель NDVI занижен (Железова с соавт., 2018).

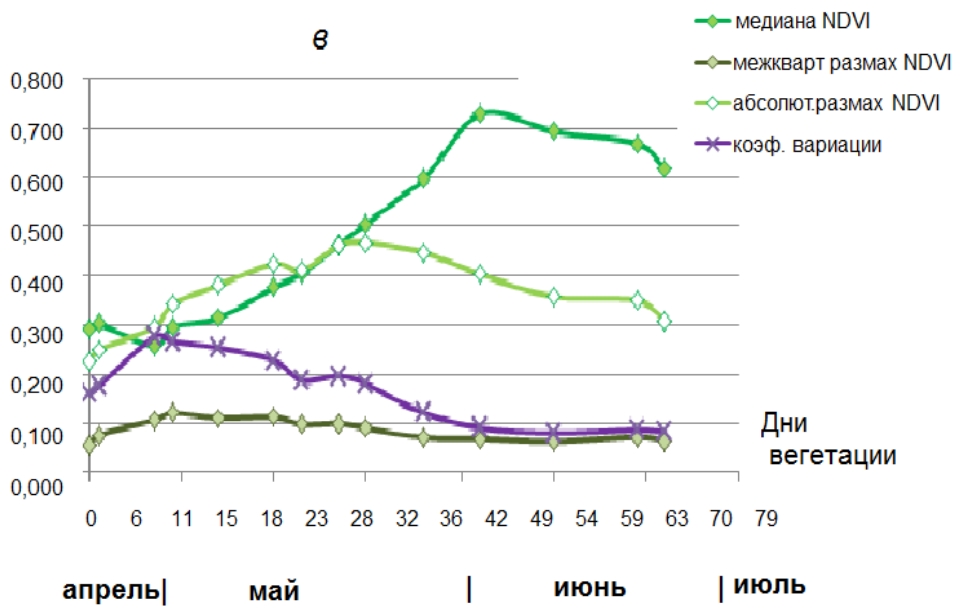
Глава 5. Практическое использование индекса NDVI для оценки состояния посевов и прогноза урожайности зерновых культур

Изучение пространственно-временных закономерностей развития NDVI позволяет выделять зоны неравномерного развития посевов, прогнозировать урожайность в целом по полю и в его разных частях. Основная цель данного раздела исследования – разработка и сравнение алгоритмов прогнозирования урожайности зерновых культур по индексу NDVI во время вегетации.

Сезонная динамика NDVI. На опытном полигоне ЦТЗ в течение двух ротаций севооборота была изучена пространственно-временная изменчивость индекса NDVI посевов зерновых культур при возделывании по традиционной и ресурсосберегающей технологии. С первых сроков обследования показатели NDVI зерновых на вспашке существенно выше, чем на нулевой обработке, что связано с шириной междурядий посева. При одинаковой норме высева (5,5 млн. шт. зёрен/га) применяются сеялки разных конструкций: на вспашке сеялка D9-30 с междурядьем 12 см, на прямом посеве сеялка DMC-Primera с междурядьем 18–19 см. Кроме того, из-за разной выживаемости проростков на двух сравниваемых вариантах опыта густота всходов на вспашке обычно на 3–10 % выше, чем на прямом посеве, что также отражается на показателе NDVI в начале вегетации. Перезимовка всходов в разных условиях обработки почвы также проходит по-разному. Ранней весной по результатам прямого подсчёта всходов озимой пшеницы на варианте вспашка в разные годы наблюдений насчитывалось 4,4–4,8 млн. шт. растений/га, на нулевой обработке 3,9–4,2 млн. шт./га, т.е. выживаемость всходов в зимний период существенно ниже при нулевой обработке почвы, что согласуется с результатами других исследователей (Акимов, 2016). Таким образом, в начальные фазы развития всходов зерновых, до смыкания полога посева, показатель NDVI зависит главным образом от густоты стояния растений, который, в свою очередь, зависит от способа возделывания. В течение сезона, после проведения двух азотных подкормок согласно схеме опыта (в дозах по д.в. N70 кг/га по традиционной технологии и N50–80 кг/га по технологии ТЗ) показатель NDVI выравнивается, разница значений между вариантами опыта по фактору В (обработка почвы) становится несущественной, т.к. на фоне применения азотных подкормок посевы в междурядьях смыкаются, и при благоприятных метеоусловиях увеличивается продуктивная кустистость. После смыкания рядков посева наиболее существенный вклад в показатель NDVI вносят азотные подкормки и метеоусловия вегетационного сезона. Таким образом, разница значений NDVI зерновых культур на опытном поле ЦТЗ обусловлена природными и технологическими причинами.

Сезонная динамика значений вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы и варьирование индекса в течение вегетации показаны на рисунке 23 (на примере вегетации в 2011 г.). До конца мая вегетационный индекс возрастал, затем начинал снижаться (рисунок 23, *а, б*). В случае отсутствия азотных подкормок (на контрольных полосах опыта) NDVI начинает снижаться уже в середине мая (рисунок 23, *а, б*). Межквартильный размах значений NDVI по всему полю оставался весь сезон на уровне около 0,1, а абсолютный размах – сначала возрастал с 0,25 до 0,48, а затем вновь снижался до 0,31 (рисунок 23, *в*). Также и коэффициент вариации в первые дни весеннего возобновления вегетации возрастал до 30%, затем, после проведения азотной подкормки снижался за счёт роста NDVI, а во второй половине сезона стабильно оставался на уровне 10%, независимо от абсолютных значений NDVI (рисунок 23, *в*). Данный пример демонстрирует, что NDVI посевов по варианту





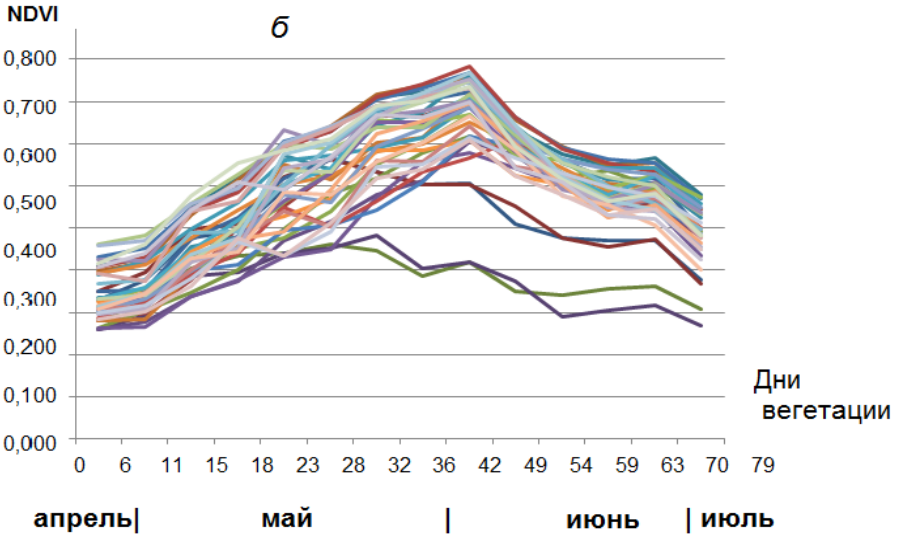


Рисунок 23 – Сезонная динамика медианных значений NDVI посевов озимой пшеницы на поле 2–ЦТЗ (2011 г.):
(а) – сравнение динамики NDVI при разных способах возделывания (медиана NDVI в пределах делянок технологий, 1 и 2 – повторности): контроль – без азотных подкормок; вспашка и нулевая обработки – с двумя азотными подкормками.
(б) – динамика NDVI по плотам (медианы), каждая линия – один плот (на графике приведены данные по 40 плотам из 184).
(в) – показатели варьирования значений индекса NDVI посевов озимой пшеницы; ось ОУ графиков ***(в)*** совмещенная, отражает значения NDVI, размаха NDVI и коэффициента вариации показателя NDVI (в долях единицы).

«нулевая обработка» в начале вегетации был существенно (на 0,1 ед.) ниже, чем по варианту вспашка. После проведения азотной подкормки разница между вариантами сглаживается и в дальнейшем не превышает 0,05 ед. Эти характерные особенности хода индекса NDVI посевов озимой пшеницы на сравниваемых вариантах технологии возделывания повторяются из года в год на всех полях опыта ЦТЗ.

Пространственная вариабельность NDVI и урожайности. Пространственная картина NDVI на каждом поле ЦТЗ в сезонном и многолетнем ряду наблюдений была сопоставлена с картами урожайности, что позволило выявить зоны потенциально высокого и низкого плодородия почвы (рисунок 24).

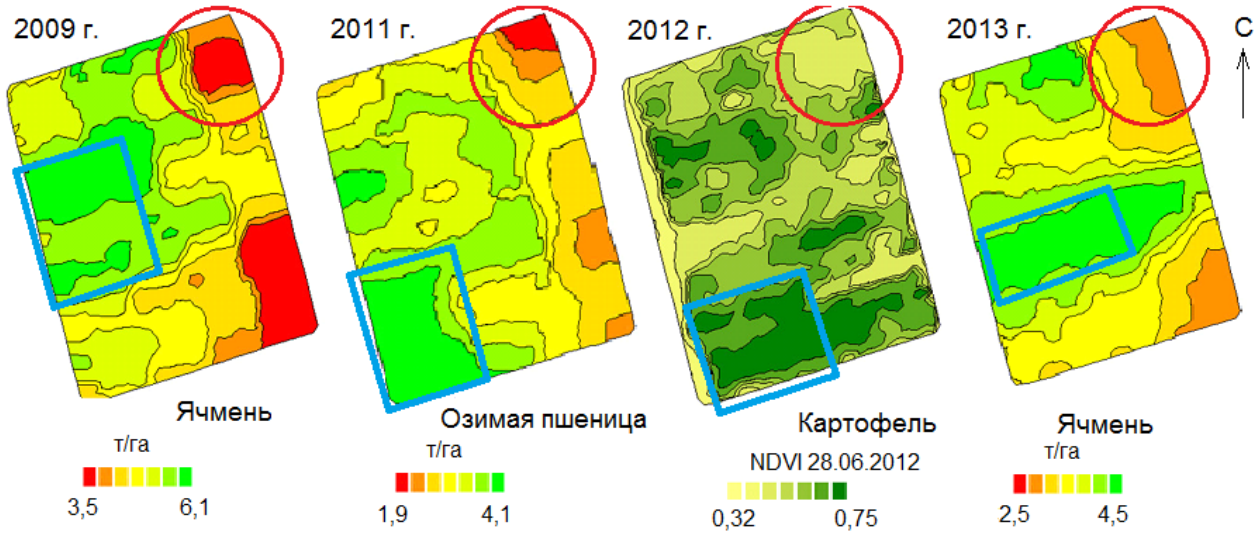


Рисунок 24 – Пространственные карты, иллюстрирующие наличие зон неодинакового потенциального плодородия по отклику посевов на примере поля 2–ЦТЗ: урожайность зерновых и биомасса картофеля во время вегетации (по NDVI). Окружностью показана проблемная зона на поле, где NDVI, биомасса и урожайность всегда ниже, чем в среднем по полю. Прямоугольниками показаны зоны высокой урожайности, не совпадающие от года к году. Карты построены в программе SMS Advanced.

По карте, построенной по наблюдениям за 1 сезон (рисунки 24, 25 *а-г*), не всегда удаётся достоверно определить зоны разного потенциального плодородия, т.к.

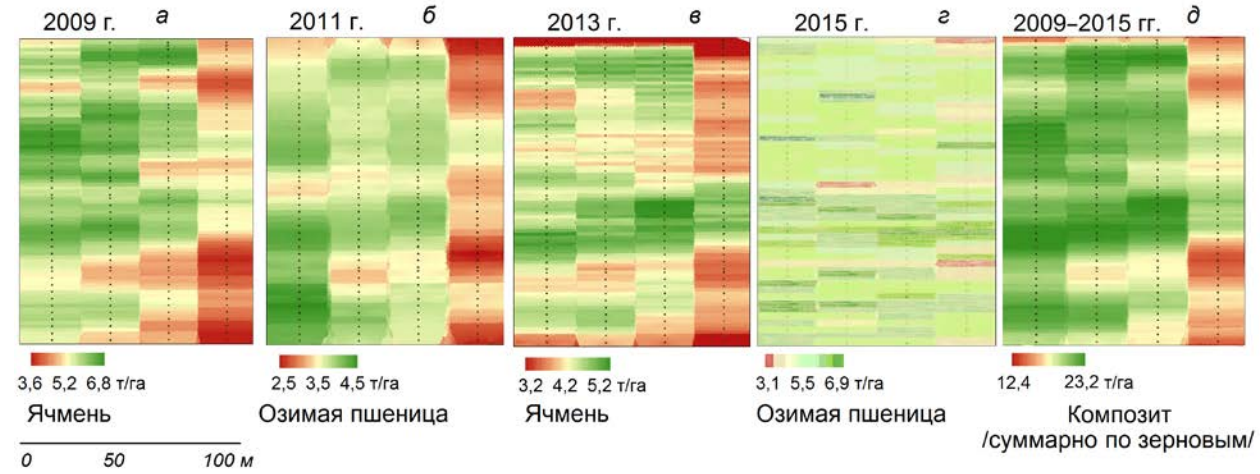


Рисунок 25 – Картограммы урожайности ячменя и озимой пшеницы в севообороте опыта Центра точного земледелия на поле 2–ЦТЗ в разные годы наблюдений (***а – г***) и «композитная» карта продуктивности поля (***д***), составленная по суммарным значениям урожайности зерновых на данном поле за две ротации севооборота. Карты построены в пакете программ QGIS.

такая карта несет в себе отпечаток воздействия не только неодинаковых агроэкологических условий, но и технологии. С достоверностью выделять зоны различной продуктивности поля возможно только в многолетнем ряду наблюдений сезонной динамики NDVI или по композитному изображению урожайности (рисунок 25, *д*).

Достоверное снижение плодородия на западной части поля 2–ЦТЗ, выявленное на картах NDVI и урожайности, связано с агроландшафтными (рельеф, водотоки, влияние Лиственничной аллеи) и почвенными (УЭС, pH) свойствами данного полигона (рисунок 26).

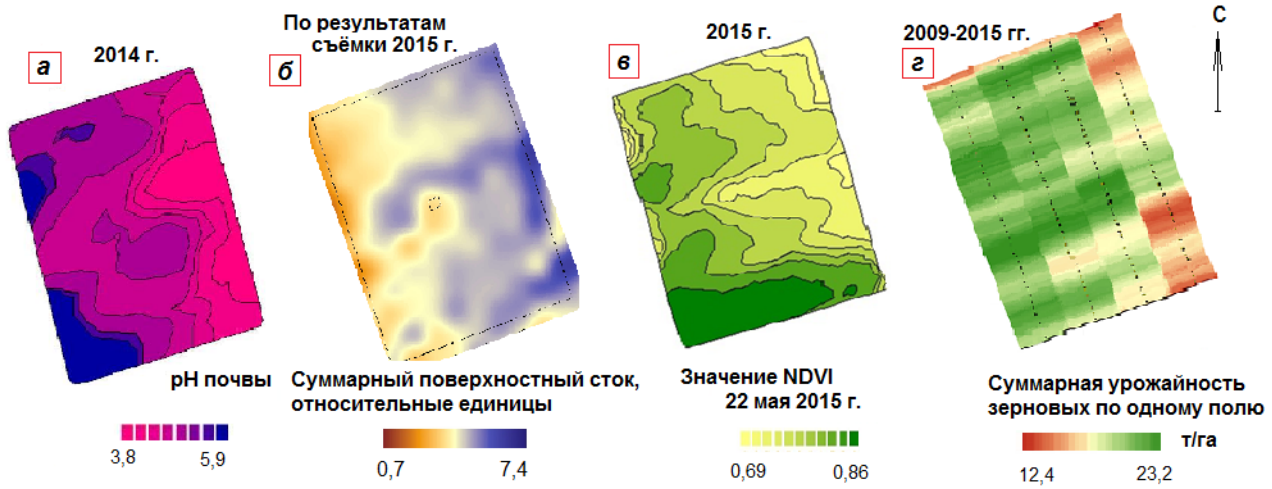


Рисунок 26 – Пространственные карты, иллюстрирующие сопряженное изменение некоторых агроландшафтных свойств и продуктивности посевов на поле 2–ЦТЗ: ***а*** – pH почвы; ***б*** – суммарный поверхностный сток; ***в*** – NDVI озимой пшеницы в фазу начала колошения в 2015 г.; ***г*** – суммарная урожайность зерновых за 2 ротации. Карты построены в программах SMS Advanced (***а***, ***в***) и QGIS (***б***, ***г***).

Влияние технологии возделывания зерновых на урожайность. По результатам двух ротаций севооборота на опыте ЦТЗ не выявлено существенных различий в урожайности зерновых культур при возделывании по точной или традиционной схеме (таблицы 3 и 4) (Мельников, Железова, 2019). В то же время способ основной обработки почвы (изучаемый фактор В), чаще оказывал существенное влияние на урожайность (Железова с соавт., 2019, *б*). В отдельные годы может быть выявлено существенное преимущество одной из технологий над другой, но, тем не менее, это влияние нельзя признать прямым (однонаправленным) и постоянным, т.к. часто оно проявляется не через прямую прибавку урожайности, а косвенно через потери потенциальной урожайности в определенных метеоусловиях каждого конкретного года. Например, в сезоне 2013/2014 сложились уникальные метеоусловия: в сентябре 2013 г. выпало 300% месячной нормы осадков, что привело к существенной гибели всходов озимой пшеницы из-за вымокания (локально на поле от 20 до 70%), преимущественно по варианту «вспашка». Лето 2014 было экстремально засушливым, и в целом урожайность была низкой (таблица 3), а по варианту «вспашка» экстремально низкой не только из-за засухи, но и за счёт осенней локальной гибели всходов.

По многолетним данным урожайности зерновых в опыте ЦТЗ было рассчитано уравнение множественной регрессии, где в качестве факторов, влияющих на урожайность, рассматривали глубину обработки почвы и гидротермический коэффициент (ГТК) вегетационного сезона. В данном случае множественная регрессия является

Таблица 3 – Урожайность озимой пшеницы в опыте Центра точного земледелия за две ротации севооборота, т/га

Год/ номер поля ЦТЗ	ГТК*	Средняя урожайность за сезон по всем вариантам опыта	Нулевая обработка, прямой посев			Вспашка		
			Норма и способ внесения азотных подкормок			Норма и способ внесения азотных подкормок		
			0 кг/га, контр.	2×70 кг/га, фон (традиц.)	2×50~80 кг/га, дифф. норма (точн.)	0 кг/га, контр.	2×70 кг/га, фон (традиц.)	2×50~80 кг/га, дифф. норма (точн.)
2009/1	1,32	5,39	---	6,00 ± 0,13	5,93 ± 0,13	---	4,78 ± 0,19	4,73 ± 0,13
2010/4	0,81	4,22	3,74 ± 0,10	4,05 ± 0,15	3,87 ± 0,13	4,13 ± 0,53	4,50 ± 0,14	4,69 ± 0,18
2011/2	1,23	3,64	2,70 ± 0,22	3,62 ± 0,12	3,51 ± 0,11	2,94 ± 0,40	3,87 ± 0,11	3,70 ± 0,10
2012/3	1,31	6,19	5,24 ± 0,40	6,40 ± 0,22	6,02 ± 0,25	5,79 ± 0,38	6,47 ± 0,30	6,43 ± 0,28
2013/1	2,11	6,04	4,84 ± 0,44	5,86 ± 0,25	5,71 ± 0,25	5,54 ± 0,33	6,35 ± 0,21	6,30 ± 0,22
2014/4	0,95	2,77	2,52 ± 0,22	3,36 ± 0,09	3,16 ± 0,14	2,05 ± 0,19	2,29 ± 0,19	2,56 ± 0,20
2015/2	1,70	6,58	4,73 ± 0,48	6,87 ± 0,24	6,82 ± 0,28	5,11 ± 0,34	6,69 ± 0,21	6,88 ± 0,18
2016/3	1,68	5,64	---	6,08 ± 0,25	---	---	5,12 ± 0,23	---
среднее	1,39	5,06	3,96	5,28	5,00	4,26	5,01	5,04

$НСР_{05}$ А(точное/традиционное)=1,12; $НСР_{05}$ В (вспашка/нулевая)=0,56; $НСР_{05}$ С (с подкормкой/без подкормки)= 0,68; $НСР_{05}$ частных различий = 0,63; --- прочерк в ячейке означает, что в указанный сезон такого варианта азотной подкормки в полевом опыте не было.

Таблица 4 – Урожайность ячменя в опыте Центра точного земледелия за две ротации севооборота, т/га

Год/ номер поля	ГТК*	Средняя урожайность за сезон по всем вариантам опыта	Минимальная обработка		Вспашка	
			Традиц. земледелие	Точное земледелие	Традиц. земледелие	Точное земледелие
2009/2	1,58	5,41	5,49±0,17	5,38±0,16	5,38±0,12	5,39±0,24
2010/3	0,80	3,15	3,04±0,12	2,97±0,14	3,37±0,12	3,25±0,16
2011/1	0,59	2,83	**3,08±0,12**	**2,74±0,12**	2,83±0,15	2,64±0,11
2012/4	1,24	4,27	4,32±0,14	4,07±0,15	4,32±0,22	4,35±0,22
2013/2	1,87	4,09	4,22±0,14	4,33±0,11	3,91±0,09	3,87±0,11
2014/3	0,36	3,80	3,81±0,09	3,78±0,11	**3,94±0,10**	**3,69±0,12**
2015/1	1,84	5,38	5,33±0,17	5,17±0,15	5,47±0,14	5,54±0,17
2016/4	1,81	3,63	3,58±0,13	3,41±0,12	3,70±0,11	3,80±0,13
среднее	1,26	4,07	4,11	3,98	4,11	4,07

$НСР_{05}$ А(точное/традиционное; последействие)=0,23; $НСР_{05}$ В (вспашка/минимальная)=0,19; $НСР_{05}$ частных различий = 0,42

Жирным шрифтом показаны варианты, различия между которыми статистически значимы на уровне $p<0,05$

Для таблиц 3 и 4: показаны средние по варианту значения урожайности ± 95% доверительный интервал среднего.

* Гидротермические коэффициенты по Селянинову рассчитаны для вегетационных сезонов в зависимости от их продолжительности: для озимой пшеницы с сентября года посева по июль года уборки урожая; для ячменя с апреля (посев) по август (уборка).

значимым фактором (R^2 = 0,52; F (2,41) =7,80 при p<0,05), но из двух изучаемых факторов значимым является только ГТК (таблица 5).

Таблица 5 – Параметры уравнения множественной регрессии зависимости урожайности зерновых от глубины обработки почвы и ГТК (по всем данным опыта ЦТЗ с 2009 по 2019 гг.)

Оцениваемый фактор	b*	Стандарт. ошибка	b	Стандарт. ошибка	Критерий Стьюдента t(41)	p-value
Свободный член уравнения			**2,72**	0,56	4,82	**0,00002**
Способ (глубина) обработки почвы	-0,08	0,13	-0,12	0,20	-0,61	0,55
ГТК	0,52	0,13	**1,32**	0,34	3,88	**0,0004**

b* параметры уравнения множественной регрессии; жирным шрифтом выделены параметры, определённые достоверно.

Таким образом, при многолетней оценке урожайности зерновых в севообороте выявлено, что достоверно влияют на урожайность применение азотных удобрений и ГТК вегетационного сезона, в то время, как способ обработки почвы (вспашка/минимальная/нулевая) и способ внесения подкормок (фоном или дифференцированно) не оказывают достоверного влияния на урожайность в многолетнем ряду наблюдений. В то же время, вариабельность плодородия и урожайности на данном полигоне достаточно высокая, а иерархический подход при учёте урожайности позволяет оценить вклад технологии и условий *in situ* в общее развитие посевов и урожайность.

Прогноз урожайности зерновых по индексу NDVI во время вегетации

В многолетнем опыте ЦТЗ наличие временны́х рядов мониторинга индекса NDVI и Базы данных на основе дробной карты урожайности по плотам позволяет сопоставить индекс вегетации, полученный в любой срок наблюдения, с конечной урожайностью. При этом иерархический подход, реализованный в БД, даёт возможность проводить сопоставление на уровне поля, делянки, плота. При таком подходе достоверно выявляется влияние технологий возделывания и почвенных условий *in situ* на пространственное варьирование индекса NDVI и урожайности в условиях разных вариантов возделывания и в разных частях на поле. Следовательно, опытное поле ЦТЗ является подходящим тестовым полигоном для разработки алгоритмов прогнозирования урожайности зерновых по индексу NDVI.

В исследованиях на опыте ЦТЗ для прогнозирования урожайности по индексу NDVI были выбраны три модели, получившие рабочие названия «точечная», «кумулятивная» и «интегральная». Точечная модель подразумевает использование среднего (по вариантам опыта) значения NDVI в отдельные фазы развития зерновых (одно значение NDVI в одну отсечку времени) и сопоставление этих данных, полученных в разные сроки наблюдений, с конечной урожайностью. Интегральная модель основана на использовании динамики изменения индекса NDVI во время вегетации и сопоставлении кривых динамики средних по разным вариантам опыта с урожайностью. Кумулятивная модель отличается от интегральной тем, что в ней учитывается суммарное накопление значений NDVI посевом за сезон, но не принимается во внимание скорость изменения NDVI, связанная с прохождением фенофаз развития.

Для «точечной» модели по данным за несколько лет наблюдений было показано, что наибольшая сила связи между NDVI и урожайностью отмечается для

показателя NDVI в фазу пика вегетации – от начала колошения до середины цветения. Для двух лет наблюдений на одном и том же поле (2011 и 2015) прогноз урожайности по пику NDVI описывался линейной моделью (при R^2=0,81; p<0,05). При введении в расчёты данных за другие годы и с других полей достоверность такого предсказания снижалась (R^2=0,58; p<0,05). Для дальнейшего анализа данные были сгруппированы в два массива по признаку влагообеспеченности вегетационного сезона: по годам достаточного увлажнения и засушливым. Вычисленные уравнения для двух массивов данных демонстрируют существенное различие параметров уравнений прогнозных моделей в годы разной влагообеспеченности (рисунок 27).

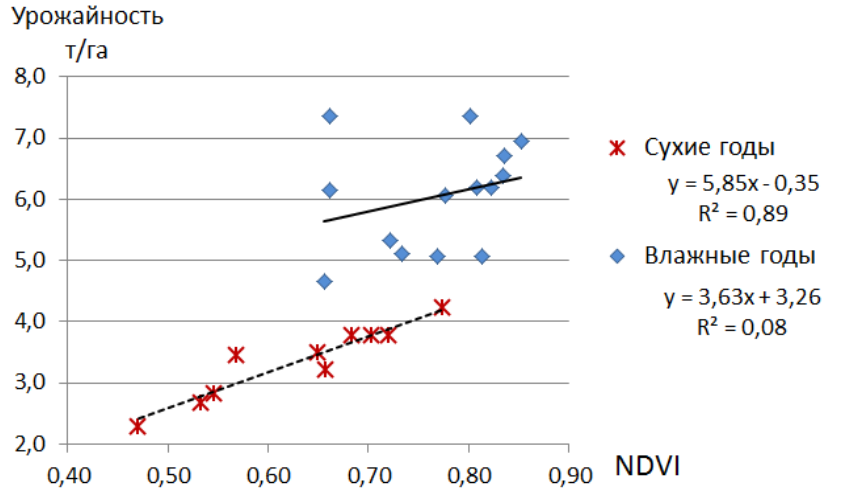


Рисунок 27 – Два примера линейной регрессии для прогнозирования урожайности по пику NDVI в годы разной влагообеспеченности при оценке посевов озимой пшеницы в опыте ЦТЗ за две ротации севооборота 2009–2016 гг.

Предложенная модель обеспечивает более высокую точность прогнозов в сезоны умеренного увлажнения и засушливые, чем в сезоны с достаточной или избыточной влагообеспеченностью. Причиной этого может быть, в частности, существенное полегание посевов во влажные годы и вызванные этим потери потенциально высокого урожая (что наблюдалось на опыте ЦТЗ в 2012, 2015 и 2017 гг.)

Прогнозы на основе точечных оценок NDVI в начале вегетации имеют невысокую точность, даже если для расчётов брать пиковые сезонные значения NDVI. В целом, причиной невысокой достоверности прогнозов по «точечным» показателям является то, что в данной модели не учитываются динамика изменения NDVI в течение сезона и длина вегетационного сезона в целом. Прогноз урожайности по интегральному показателю NDVI позволяет учитывать эти особенности.

Интеграл NDVI рассчитывали по динамике индекса NDVI посевов с шагом во времени 1 раз в неделю путём вычисления площади под кривой NDVI методом трапеций (рисунок 28). Площадь каждой трапеции представляют собой сумму площадей прямоугольника и треугольника, что соответствует «удержанию предыдущего уровня» и «новому приросту» значения NDVI по сравнению с предыдущей датой наблюдения (рисунок 28, складываются площади прямоугольника 1 и треугольника 1*a*). В случае сильной засухи в середине сезона индекс NDVI снижается, его «прирост» становится отрицательным по сравнению с предыдущей датой наблюдения, и площадь трапеции становится меньше, чем площадь прямоугольника «удержания предыдущего уровня» (рисунок 28, из площади прямоугольника 2 вычитается площадь треугольника 2*a*). Во второй половине вегетации такой отрицательный баланс NDVI посева от срока к сроку сохраняется по естественным причинам, но в зависимости от предыдущих уровней «удержания»

значения NDVI и скорости его падения общая интегральная площадь под кривой NDVI будет разной.

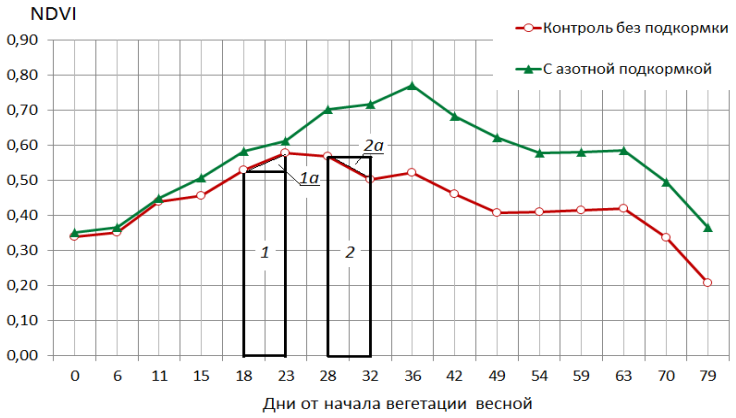


Рисунок 28 – Схематическое представление расчёта интегрального значения индекса NDVI методом трапеций.

Методом трапеций были вычислены интегральные показатели NDVI озимой пшеницы при разных технологиях возделывания по данным за 1 сезон и сопоставлены с данными урожайности. Связь между этими показателями прямая, линейная, тесная. Следующим шагом данный алгоритм был использован для нескольких лет наблюдений, зависимость подтвердилась. Затем в общий массив данных для расчёта были добавлены результаты по NDVI и урожайности ячменя, по вариантам опыта с применением азотных подкормок, и без них (рисунок 29). На вариантах без подкормок NDVI посева зависит только от плодородия почвы *in situ* (рисунок 29, *а*).

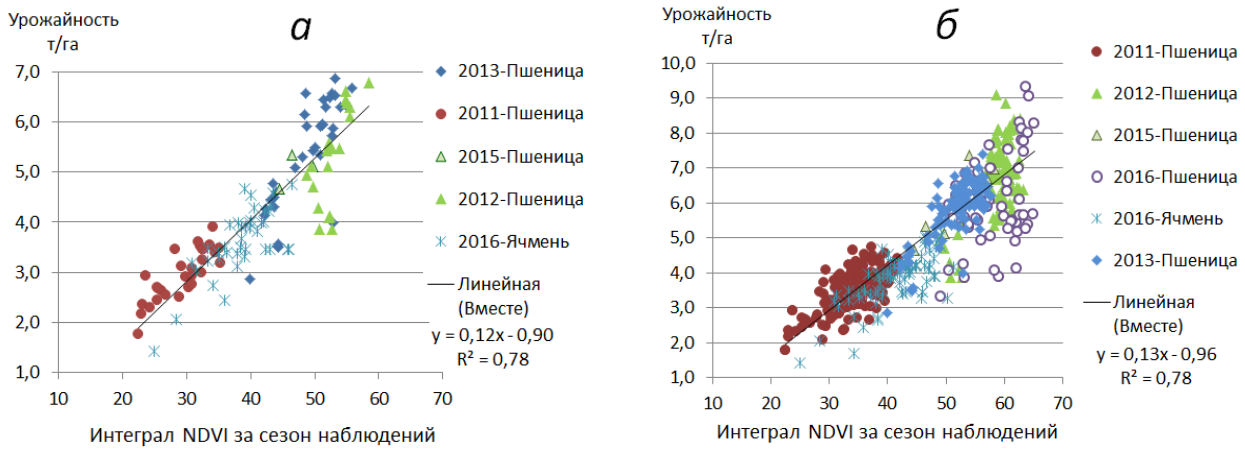


Рисунок 29 – Зависимость урожайности зерновых от интегрального показателя NDVI в разные вегетационные сезоны при применении разных технологий возделывания: ***(а)*** – по посевам озимой пшеницы и ячменя без применения азотных подкормок; ***(б)*** – по всем посевам зерновых, возделываемых по всем технологиям на опыте ЦТЗ.

В общем виде уравнение зависимости урожайности от интегрального показателя NDVI выглядит так:

$$Y = a \times \int(NDVI) + b,$$

где ***Y*** – урожайность зерна, т/га; ***a*** – множитель при интегральном показателе NDVI, определяющий крутизну наклона прямой линейной функции; ***∫(NDVI)*** – интегральный показатель NDVI за вегетационный сезон зерновых до полного созревания; ***b*** – свободный член уравнения, пересечение с осью OY.

Данные за несколько лет наблюдения, объединённые в общий массив, были представлены в виде гистограмм распределения значений в пакете программ

STATISTICA. Выявлено, что общий массив данных как по интегральному показателю NDVI, так и по показателю урожайности описывается бимодальными распределениями частот (рисунок 30). В первый пик (моду) попадают значения с относительно низкой урожайностью и низким интегральным показателем NDVI – это варианты опыта без применения подкормок, годы с засушливыми условиями и посевы яровых культур – то есть те случаи, когда интегральный показатель NDVI ограничен лимитирующими условиями погоды, почвенного плодородия, или продолжительностью вегетации (у яровых). Во второй пик (моду) бимодального распределения попадают все случаи долгой и продуктивной вегетации, при оптимальном сезонном количестве осадков и достаточном уровне обеспеченности элементами минерального питания.

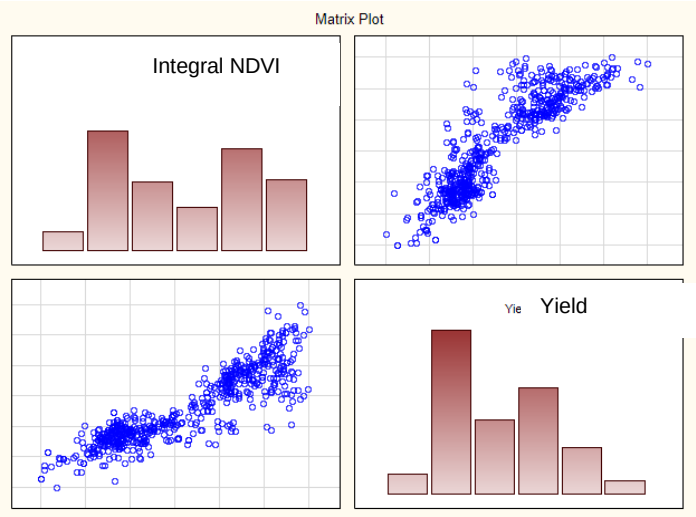


Рисунок 30 – Бимодальное распределение интегральных показателей NDVI (Integral) и урожайности зерновых (Yield) и теснота связи для этих показателей в многолетних наблюдениях.

Результаты предсказания урожайности по кумулятивному показателю NDVI были удовлетворительными только в пределах одного поля и одного года исследований. При добавлении результатов с других полей в общую зависимость, достоверность предсказания урожайности резко снижалась. Следовательно, такой метод не является универсальным и не может быть рекомендован для расчётов.

Таким образом, из трёх методов прогнозирования урожайности по NDVI наиболее достоверным способом является прогноз урожая по интегральному показателю NDVI.

Глава 6. Пространственно-временные аспекты развития сорно-полевых сообществ зерновых культур

Сообщество сорных растений – важный с производственной точки зрения и наиболее трудный для изучения компонент АФЦ. В настоящее время наряду с традиционными методами оценки засорённости посевов развиваются новые методы детектирования сорного компонента, в том числе инструментальные и дистанционные.

Изучение сорной растительности в посевах зерновых проводили как традиционными, так и новыми инструментальными методами. За основу была принята методика сеточного картографирования по регулярной частой сетке, для опыта ЦТЗ с размещением точек опробования на каждый плот. Учёт засорённости зерновых культур проводили дважды за сезон: в фазу кущения весной и в начале лета (для яровых – через 2–3 недели после обработки гербицидами). В многолетней динамике в посевах зерновых были изучены следующие показатели засорённости: 1) общая численность сорных растений; 2) видовой состав, частота встречаемости и ранговое обилие каждого вида; 3) пространственные закономерности сегетального сообщества; 4) влияние способа обработки почвы на засорённость посевов; 5) влияние присутствия сорных

видов на NDVI посева в начале и в конце вегетации; 6) влияние метеоусловий и агрофизических свойств почвы на обилие сорного компонента.

На полигоне ЦТЗ на посевах зерновых культур за две ротации было выявлено 75 сорных видов и 17 видов-засорителей. За одно обследование в учёт попадает от 10 до 38 видов, в зависимости от метеоусловий года, технологии возделывания и вида культуры, что согласуется с результатами наших ранее проведенных исследований (Железова с соавт., 2000). По результатам постоянного мониторинга в течение двух ротаций севооборота было оценено ранговое обилие каждого вида сорных растений и составлен список «Топ-10»: фиалка полевая, пастушья сумка, марь белая, ромашка непахучая, мятлик однолетний, горец птичий, ярутка полевая, вероника полевая, клён ясенелистный, дымянка аптечная. Встречаемость растений из списка «Топ-10» в сумме за две ротации севооборота составила около 50%.

За все годы наблюдения засорённость посевов в целом по опыту ЦТЗ была выше на вариантах ресурсосберегающих технологий, и основной вклад в это вносит применение нулевой обработки почвы под пшеницу и викоовсяную смесь. На варианте опыта с нулевой обработкой, несмотря на двукратную обработку гербицидами, засорённость посевов в среднем в три раза выше, чем на варианте «вспашка». С 2010/2011 г. в опыте ЦТЗ изменилась схема защиты озимой пшеницы от сорняков: гербицид в посевах озимой пшеницы стали применять осенью. На варианте «вспашка» осенняя обработка гербицидом всегда даёт более выраженный эффект, чем на варианте «нулевая обработка»: посевы по варианту «вспашка» весь сезон остаются чистыми, количество сорняков в них минимально (не превышает 1 шт/м^2). На вариантах ресурсосберегающих технологий не только выше общая численность сорняков, но также из года в год увеличивается количество многолетних видов: бодяк полевой, одуванчик лекарственный, кульбаба осенняя, пижма, подорожник и др.

Распространённость сорных видов на опытном полигоне ЦТЗ зависит от влияния природных и технологических факторов: относительного плодородия почвы, метеоусловий вегетационного сезона, выживаемости и густоты всходов культурных растений, применения гербицидов. В целом, технологические факторы оказывают более сильное влияние на численность сорных растений, чем природные (рисунок 31).

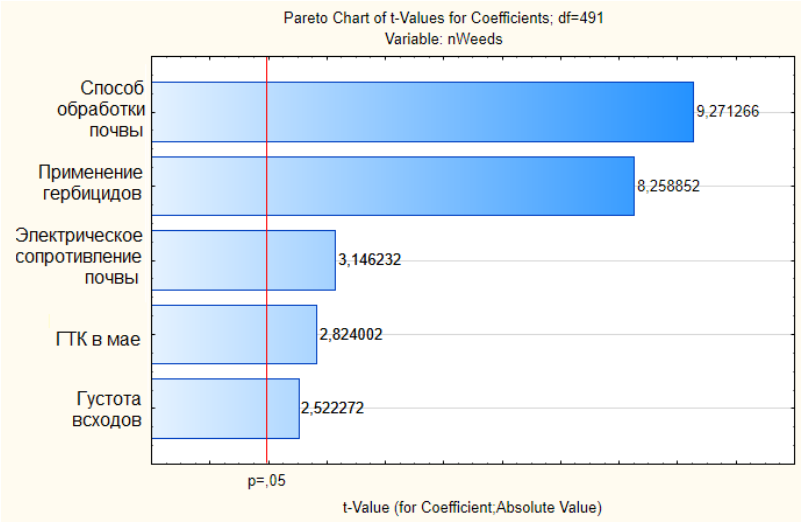


Рисунок 31 – Диаграмма парето для оценки влияния различных природных и агротехнологических факторов на численность сорных растений в посевах зерновых (по объединённым результатам учётов засорённости за период 2011–2019 гг. в опыте ЦТЗ).

Так, воздействие фактора «плодородие почвы», оцениваемого по показателю УЭС, на число сорняков было в 2,5 раза ниже, чем воздействие фактора применения гербицидов и в 3 раза ниже, чем воздействие способа обработки почвы. Гидротер-

мический коэффициент в начале вегетации (в мае) и густота всходов зерновых в это время также оказывают значимое, но ещё меньшее влияние на численность сорняков.

Отдельным блоком исследования была оценка вклада сорных растений в показатель NDVI. Для этого использовали наземные инструментальные методы с применением GreenSeeker (рисунок 32) и дистанционные методы на основе съёмки с БПЛА (рисунок 33, *а*) и спутниковых снимков (рисунок 33, *б*).

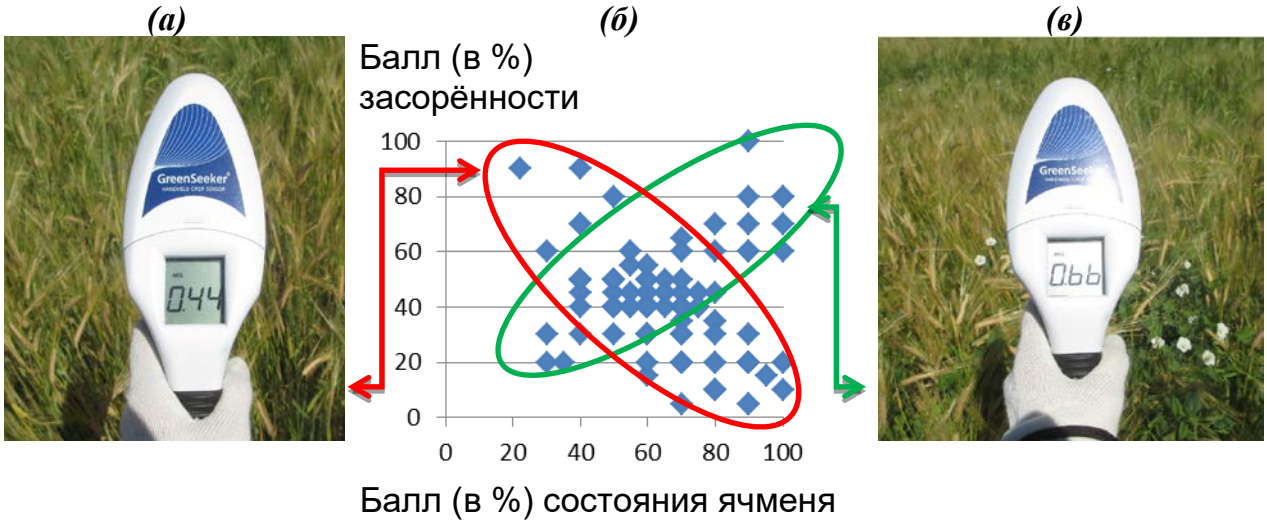


Рисунок 32 – Индекс NDVI посева ячменя в фазу ранней восковой спелости при низкой (***а***) и высокой (***в***) засорённости вьюнком полевым, и соотношение балльных оценок биомассы ячменя и сорняков (***б***) на поле 2–ЦТЗ 14 августа 2017 г.

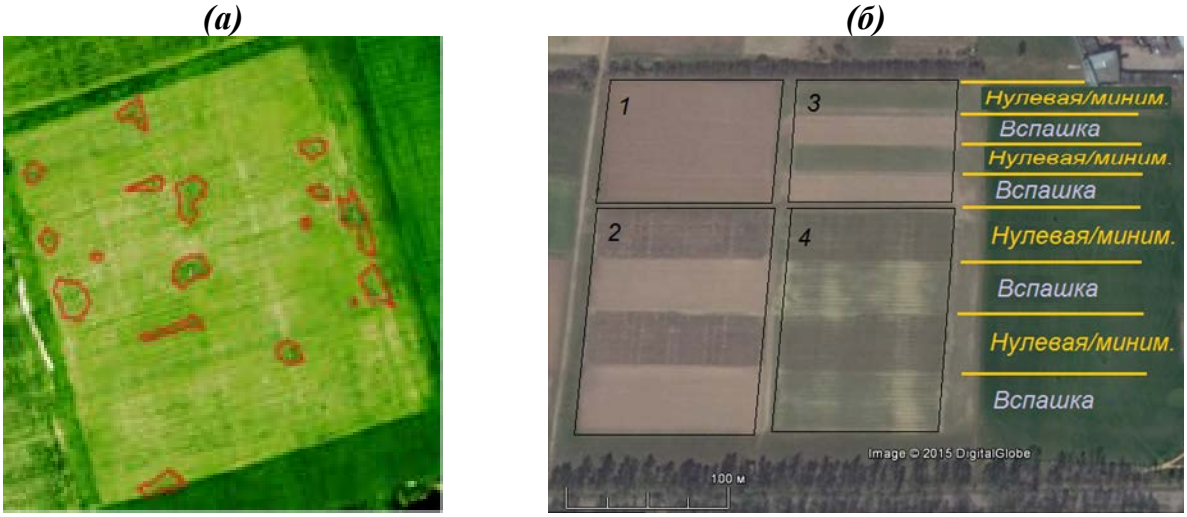


Рисунок 33 – Использование дистанционной съёмки для создания файлов предписания по внесению гербицидов в дифференцированных дозах на основании оценки биомассы сорняков: ***(а)*** – снимок с БПЛА, поле 4–ЦТЗ (08 сентября 2016 г.), контурами выделены пятна распространения многолетних сорняков; ***(б)***, *поле 3* – спутниковый снимок GoogleEarth от 20.04.2014 г.: полосы распространения перезимовавших сорняков, приуроченные к минимальной обработке почвы.

Поскольку пятна распространения многолетних сорняков сохраняют относительно стабильное положение в пространстве, то по превышению среднего порогового значения NDVI посева во второй половине вегетации или после уборки основной культуры на поле можно выделить места распространения таких сорняков, как хвощ полевой, вьюнок полевой, бодяк. Эта информация может быть использована при составлении файла-задания для выборочной («точечной») обработки против этих сорняков и внесения гербицидов в дифференцированных дозах. В качестве примера

приведён фрагмент снимка опыта ЦТЗ с БПЛА (рисунок 33, *а*). На снимке контурами выделены пятна с превышением порогов вредоносности многолетних сорняков на поле 4–ЦТЗ после уборки ячменя (2016 г.). Общая площадь таких мест, где отмечены многолетние сорняки, составляет на данном снимке около 6 %, и для данного поля можно рекомендовать выборочную обработку гербицидом, что позволит сэкономить более 90% препарата. Другой пример (рисунок 33, *б, поле 3*) – на основе спутникового снимка возможно создание файла-предписания для выборочной обработки поля от перезимовавших сорных видов, и в данном случае экономия препарата составит 50%.

Глава 7. Применение Базы данных многолетнего опыта ЦТЗ для оценки эффективности изучаемых технологий

Все результаты многолетнего опыта структурированы согласно иерархии для импорта в Базу данных (БД) ЦТЗ. Главной структурной ячейкой БД ЦТЗ является площадка плот (31 м^2). Объединение данных с отдельных плотов можно проводить как по делянкам технологий, так и по местоположению на поле. БД постоянно пополняется, и по состоянию на 2019 г. в БД накоплено около 10 ГБ информации в виде табличных файлов, шейп-файлов и около 120 ГБ информации в формате GeoTIFF (снимки с БПЛА и спутниковые снимки).

Использование БД ЦТЗ позволяет оценить: 1) ежегодные показатели и многолетнюю динамику урожайности всех культур севооборота при возделывании по традиционной и ресурсосберегающей технологии; 2) влияние и устойчивость зон неодинакового плодородия на развитие и урожайность посевов; 3) пространственно-временные закономерности развития сорного компонента АФЦ в условиях интенсивного возделывания зерновых; 4) биологическую, хозяйственную и экономическую эффективность применения гербицидов; 5) изменение свойств почвы при применении ресурсосберегающей технологии в сравнении с традиционной; 6) структуру затрат на производство зерна по статьям расхода (рисунок 34), и многое другое.

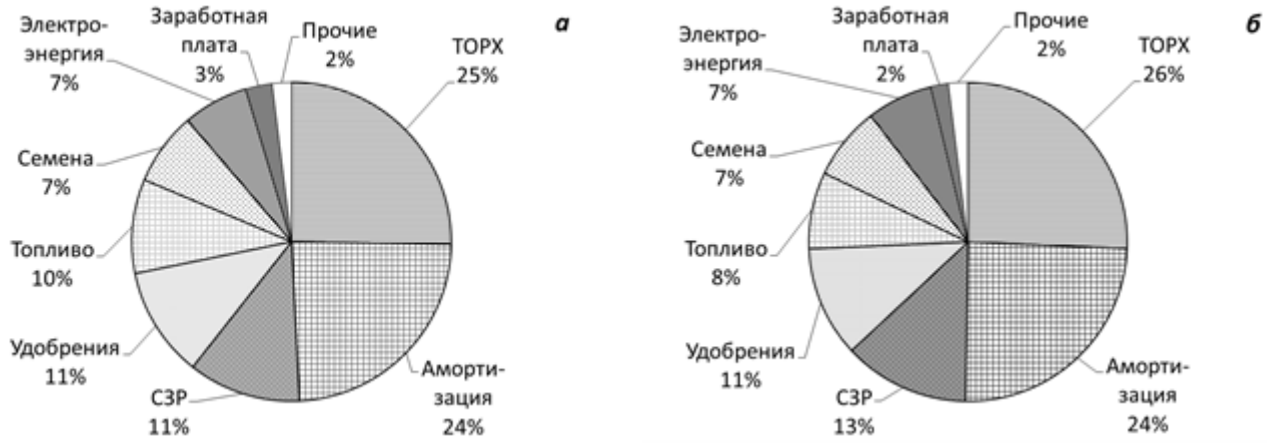


Рисунок 34 – Структура затрат (в %) на производство зерна озимой пшеницы в опыте ЦТЗ по результатам двух ротаций севооборота: ***(а)*** – по варианту классической традиционной технологии (вспашка), ***(б)*** – по варианту ресурсосберегающей технологии (нулевая обработка, прямой посев) (по Мельникову, Железовой, 2019).

Высокая балансовая стоимость техники для ТЗ и прямого посева увеличивает статьи расхода на расчётные амортизационные отчисления и затраты на техническое обслуживание, ремонт и хранение (ТОРХ), поэтому при переходе к новым технологиям затраты на производство зерна существенно возрастают. Однако при полноцен-

ной рабочей нагрузке такой техники эти вложения оправданны (Мельников, Железова, 2019).

За две ротации севооборота (2009–2012 и 2013–2016 гг.) ежегодно и по ротациям были рассчитаны показатели урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя в условиях выращивания этих культур по технологиям традиционной и ресурсосберегающей обработки почвы при применении удобрений. Было показано, что в условиях зернопропашного севооборота на агродерново-подзолистой окультуренной почве ресурсосберегающие технологии обработки почвы повышают рентабельность производства зерна на 4–17 % по сравнению с традиционной технологией обработки почвы на основе вспашки с оборотом пласта (Мельников, Железова, 2019), а рентабельность применения азотных подкормок существенно повышается при внесении их в дифференцированных дозах на основе оценки вегетационного индекса NDVI.

Использование БД ЦТЗ, помимо осуществления утилитарных задач учёта, позволяет сравнивать результаты, полученные по разным уровням иерархии. Было показано, что масштаб получения информации имеет значение для интерпретации результатов. Для адекватной оценки результатов полевого опыта по точному земледелию в условиях Нечерноземья размер «пикселя» ячейки информации должен быть в пределах 30–300 м^2 (в данном случае под «пикселем» понимается размер единицы учётной площади и единицы площади технологического воздействия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы

1. По результатам многолетних полевых исследований агрофитоценозов озимой пшеницы и ярового ячменя с применением наземных и дистанционных методов изучения свойств почвы и растительности было показано, что применяемый способ и масштаб получения информации оказывают значимое влияние на оценку пространственно-временной структуры агрофитоценоза. На основе сопоставления различных методов исследования разработан многоуровневый алгоритм оценки сельскохозяйственного поля, как объекта воздействия в точном земледелии.
2. Мезорельеф, агрофизические свойства почвы и непосредственно прилегающие к полю территории (в т.ч. лесополосы) определяют потенциальное плодородие почвы в разных зонах на поле, т.е. продуктивность агрофитоценоза в этих зонах есть функция координаты в пространстве, что является основой для разработки сценариев дифференцированного подхода. Для целей точного земледелия необходимыми этапами обследования поля являются создание подробной карты рельефа и оценка неоднородности почвенного плодородия по карте удельного электрического сопротивления (электропроводности) почвы.
3. В многолетних полевых наблюдениях на агродерново-подзолистой почве было показано, что удельное электрическое сопротивление поверхностного (0–30 см) слоя в среднем находится в пределах от 50 до 300–400 Ом·м, и пространственное распределение этого показателя отражает одновременное влияние природных (влажность и твёрдость почвы, гранулометрический состав) и агротехнологических факторов (способы обработки почвы). Пространственная структура удельного электрического сопротивления поверхностного слоя почвы в пределах поля проявляет устойчивость во времени, и связана с пространственно-временными закономерностями развития посевов, т.е. отражает зоны неодинакового плодородия.

4. Свойства почвы и отклик посева в зонах разного уровня плодородия взаимосвязаны, однако, за счёт сильного пространственного варьирования, влияния метеоусловий вегетационного сезона и применяемой технологии, сила и направление этих связей могут существенно различаться в разные годы. Совместное использование для каждого поля карт рельефа, удельного электрического сопротивления (электропроводности) почвы, мультивременных композитных карт биомассы посева (NDVI) и урожайности позволяет более успешно управлять продукционным процессом и повышать рентабельность производства зерна. При благоприятных метеоусловиях рентабельность применения азотных подкормок в дифференцированных дозах при возделывании озимой пшеницы по технологии точного земледелия достигала 174–184%, в то время как при внесении подкормок равномерным фоном (традиционная технология) рентабельность составляла 138–147%.
5. Сопоставление результатов обследования посевов зерновых культур по вегетационному индексу NDVI несколькими различными методами, как с применением пассивной съёмки отражений (спутниковая съёмка и беспилотная аэрофотосъёмка), так и с применением датчиков с активным источником излучения (Yara N-Tester™, GreenSeeker® RT200, N-sensor ®Yara ALS) позволило выявить преимущества, недостатки, диапазоны применимости этих методов в производственных условиях, и разработать алгоритмы верификации дистанционных методов по прямым наземным измерениям.
6. В типичных условиях Нечернозёмной зоны при высокой вариабельности почвенного плодородия и неравномерном развитии культурного и сорного компонента посевов использование дистанционных методов беспилотной спектрозональной аэрофотосъёмки высокого разрешения является надёжным инструментом информационно-методического обеспечения технологий точного земледелия, и используется для построения цифровой модели рельефа, карты поверхностных водотоков, оперативной оценки вегетационных индексов, и выявления зон нетипичного развития посевов.
7. В многолетнем опыте Центра точного земледелия проведено сравнение трёх способов прогнозирования урожайности зерновых на основе оценки индекса NDVI посевов: по одномоментным показателям в разные фазы развития, по кумулятивному показателю за сезон, по интегральному показателю в течение сезона. По результатам наблюдений в течение шести вегетационных сезонов с разной агрометеорологической обеспеченностью показано преимущество использования интегрального показателя NDVI, который позволяет прогнозировать урожайность с точностью до 80–90%.
8. При применении ресурсосберегающих технологий обработки почвы (минимальная при возделывании ячменя и нулевая при возделывании пшеницы) отмечено общее повышение твёрдости (сопротивления пенетрации) пахотного слоя почвы соответственно на 15–50% и 30–80%, снижение количества всходов ячменя на 11–12%, пшеницы на 15–20% из-за их неполной выживаемости, в начале вегетации пониженные показатели NDVI посева на нулевой обработке и повышение численности сорных растений на 38–66% по сравнению с традиционной обработкой на основе классической вспашки. Несмотря на эти негативные явления, среднемноголетняя урожайность зерновых по ресурсосберегающим технологиям не уступала урожайности по вспашке (в среднем за две ротации урожайность озимой пшеницы составила 5,06 т/га, ячменя – 4,07 т/га), а рентабельность производства зерна при применении ресурсосберегающих технологий была выше на 4–17% по сравнению со вспашкой.
9. Сорные растения распространены на поле неравномерно, агрегированы зонами и пятнами *in situ*, а пространственные структуры распространения отдельных видов и

их группировок проявляют устойчивость во времени, что обусловлено совместным влиянием технологических и природных факторов, в том числе регенерационной способностью самих сорных видов. Разработан алгоритм оценки засорённости посевов в автоматическом режиме с применением оптических датчиков, который можно адаптировать для внесения гербицидов в дифференцированных дозах.

10. В посевах зерновых культур численность сорных растений и их видовое разнообразие связаны с технологией возделывания, метео- и агроландшафтными условиями, при этом влияние изученных факторов (% от суммарного воздействия всех значимых факторов) на численность сорных растений уменьшается в ряду:

    Обработка почвы (35%) > Применение гербицидов (32%) > Плодородие почвы по показателю удельного электрического сопротивления (12%) > ГТК в первый месяц вегетации (11%) > Густота всходов зерновых (10%)

11. По результатам многолетних наземных и дистанционных обследований почвы и посевов в разных масштабных шкалах разработана иерархическая База данных Центра точного земледелия, на основе которой проведен анализ многолетней динамики показателей изучаемых свойств агрофитоценоза с учётом влияния масштаба опробования, разработаны прогнозные алгоритмы расчёта урожайности на основе мониторинга индекса NDVI, рассчитаны экономические показатели производства зерна озимой пшеницы и ячменя в условиях применения технологий точного и ресурсосберегающего земледелия в зернопропашном севообороте на дерново-подзолистой почве.

Рекомендации производству

При возделывании зерновых культур на дерново-подзолистой почве в условиях Нечернозёмной зоны РФ выявление зон разного уровня плодородия в пределах каждого поля рекомендуется проводить с применением следующих элементов технологии точного земледелия:

- создание и анализ карт цифровой модели рельефа поля;
- выявление элементарных агрофизических контуров на основе пространственных закономерностей распределения агрофизических свойств почвы: твёрдости сопротивления пенетрации, удельного электрического сопротивления (электропроводности);
- выделение зон потенциального плодородия разного уровня по мультивременным композитным снимкам вегетационного индекса NDVI и картам урожайности;
- инструментальное определение зон повышенной засорённости посевов по превышению пороговых значений NDVI во время вегетации.

На основании выделенных зон рекомендуется разработка и применение практических сценариев использования элементов технологии точного земледелия, которые позволят повысить рентабельность производства зерна:

- отбор агрохимических образцов почвы по выявленным зонам с последующим расчётом дифференцированных доз и внесением извести и удобрений согласно потребностям посевов;
- переход на дифференцированное внесение азотных подкормок и средств защиты растений по технологиям *онлайн* и *офлайн* на основании пространственных карт индекса NDVI, что позволяет повысить рентабельность применения азотных подкормок на 25–37 % и в ряде случаев существенно снизить расход СЗР;

В условиях Нечернозёмной зоны РФ переход к минимальной обработке почвы при возделывании ячменя и к прямому посеву при возделывании озимой пшеницы по интенсивной технологии позволяет поднять рентабельность производства зерна на 4–17% по сравнению с возделыванием зерновых по интенсивной технологии с применением традиционного метода обработки почвы на основе вспашки.

Благодарность. Автор выражает глубокую признательность своим коллегам, сотрудникам ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева и ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова за консультационную поддержку, аспирантам и студентам за помощь при выполнении полевых работ, ООО «Прозрачный мир» за предоставленные материалы спутниковых снимков на территорию Полевой опытной станции; ООО НПК «Джи Пи Эс Ком» за осуществление беспилотной аэрофотосъёмки полей и обработку данных, ООО «Точное землепользование» за плодотворное сотрудничество при разработке агроплатформы ExactFarming. Особую благодарность автор выражает коллегам В.Л. Иванову и М.В. Вьюнову за неоценимую помощь при создании Базы данных Центра точного земледелия.

Список основных опубликованных работ по теме диссертации

I. Статьи в рецензируемых журналах из рекомендованного ВАК «Перечня рецензируемых научных изданий», баз данных Web of Science, Scopus:

1. Жарова, Е.В., Пространственное варьирование свойств агросерой почвы в пределах сельскохозяйственного угодья Владимирского ополья / Е.В. Жарова, **С.В. Железова**, В.П. Самсонова // Почвоведение. – 2002. – N 8. – С. 936–944.
2. Самсонова, В.П. Картограммы почвенных свойств для целей точного земледелия / В.П. Самсонова, **С.В. Железова**, Е.В. Березовский // Проблемы агрохимии и экологии. – № 4. – 2010. – С. 18–22.
3. Бекецкая, Т.В. Влияние древесной растительности на свойства почв (на примере модельной почвы почвенного стационара МГУ) / Т.В. Бекецкая, А.Б. Умарова, **С.В. Железова** // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2010. – № 3. – С. 206–211.
4. Belenkov A.I., **Zhelezova S.V.**, Berezovsky E.V., Mazirov M.A. Precision agriculture methods in a field experiment of Russian Timiryazev state Agricultural University / Izvestia of Timiryazev – Academy: Scientific-theoretical Journal of the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. – 2012. – № 7. Special issue – P. 94–101. http://elib.timacad.ru/dl/full/12-2012-eng.pdf.
5. **Железова, С.В.** Использование прибора GreenSeeker®RT200 для мониторинга посевов озимой пшеницы при разных технологиях возделывания / С.В. Железова, Е.В. Березовский, Д.П. Аброськин // Проблемы агрохимии и экологии. – 2013. – № 1. – С. 56–60.
6. **Железова, С.В.** Пространственная неоднородность электрического сопротивления почвы и её связь с урожайностью ячменя в полевом опыте Центра точного земледелия / С.В. Железова, В.П. Самсонова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – № 6 (116). – 2014. – С. 79–83.
7. **Железова, С.В.** Урожайность и качество зерна озимой пшеницы в зависимости от технологии возделывания в полевом опыте Центра точного земледелия / С.В. Железова, И.Ф. Шамбинго, А.В. Мельников, Е.В. Березовский // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – № 10 (120). – 2014. – С. 10–14.
8. **Железова, С.В.** Мониторинг посевов озимой пшеницы с применением беспилотной аэрофотосъёмки и оптического датчика GreenSeeker® RT200 / С.В.

Железова, А.А. Ананьев, М.В. Вьюнов, Е.В. Березовский // Вестник Оренбургского Государственного Университета. – 2016. – № 6 (194). – С. 56–61.

9. **Железова, С.В.** Влияние разных технологий возделывания озимой пшеницы на урожайность и фитосанитарное состояние посевов (на примере полевого опыта Центра точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева) / Железова С.В., Акимов Т.А., Белошапкина О.О., Березовский Е.В. // Агрохимия. – 2017. – № 4. – С. 72–82.
10. **Железова, С.В.** Применение оптических датчиков для оценки состояния посевов озимой пшеницы / С.В. Железова // Агрофизика. – 2018. – №3. – С. 42–48. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.03.08
11. Беленков, А.И. Совершенствование технологии возделывания картофеля в системе точного земледелия / А.И. Беленков, Е.В. Березовский, **С.В. Железова** // Картофель и овощи. – 2019. – № 6. – С. 30–34. DOI: 10.25630/PAV.2019.39.30.007
12. Мельников, А.В. Традиционная вспашка или нулевая технология – что выгоднее для производства озимой пшеницы в нечерноземной зоне России? / А.В. Мельников, **С.В. Железова** // Теоретические и прикладные проблемы АПК. – 2019. – №1. – С. 35–40. DOI: 10.32935/2221-7312-2019-39-1-35-40
13. **Zhelezova S V** Temperature regime of the arable layer of sod-podzolic soil under different tillage systems and crops / Key concepts of soil physics: development, future prospects and current applications 27–31 May 2019, Moscow, Russian Federation – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2019 Volume 368 – 6 p. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/368/1/012056/pdf
14. **Zhelezova S V**, Melnikov A V and Ananiev A A Pros and cons of no-till technology in a long-term field experiment on sod-podzolic soil / Key concepts of soil physics: development, future prospects and current applications. 27–31 May 2019, Moscow, Russian Federation – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2019 Volume 368 – 7 p. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/368/1/012055/pdf
15. Железова, А.Д. Влияние способа сельскохозяйственной обработки на микробиологичес-кие характеристики дерново-подзолистой почвы / А.Д. Железова, Д.И. Пассова, Д.А. Никитин, М.А. Яшин, **С.В. Железова** // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2019. – Т. 99. – С. 117–144. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-99-117-144
16. **Железова, С.В.** Урожайность озимой пшеницы и ярового ячменя на дерново-подзолистой почве при длительном применении традиционной и ресурсосберегающей обработки / С.В. Железова, А.В. Мельников, А.И. Беленков // Кормопроизводство. – 2019. – № 10 – С. 14–20. DOI: 10.25685/KRM.2019.2019.41825

II. Учебно-методическая литература по курсу «Точное земледелие» для высшего образования по направлению «Агрономия»:

17. Балабанов, В.И. Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие: Учебное пособие / В.И. Балабанов, **С.В. Железова,** и др.. – М.: РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2013. – 143 с.
18. **Железова С.В.,** Березовский Е.В.. Точное земледелие. Учебное пособие / М.: РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015. – 52 с.
19. **Железова С.**В. Точное земледелие. Рабочая программа учебного курса / М.: РГАУ –МСХА им. К.А.Тимирязева, 2014 (первая версия), 2017, 2020 (обновления). – 28 с.
20. Балабанов, В.И. Технологии, техника и оборудование для координатного (точного) земледелия. Учебник / В.И. Балабанов, В.Ф. Федоренко, В.Я. Гольтяпин, **С.В. Железова**, и др. – М.: Издательство ФГБНУ «Росинформагротех». – 2016. – 220 с.

III. Статьи в журналах, продолжающихся изданиях и сборниках:

21. **Железова С.В.** Особенности фитосанитарного мониторинга в условиях многолетнего опыта / Молодые ученые – возрождению сельского хозяйства России в XXI в. Брянск. 2001. – С. 165–168.
22. Самсонова, В.П. Использование методов геостатистики для картирования засорённости сельскохозяйственных посевов / В.П. Самсонова, Е.В. Жарова, **С.В. Железова** // Стратегический прорыв в биологии XXI в. – Доклады ТСХА. – 2001. – Вып. 273, ч.1. – С. 60–66.
23. Умарова, А.Б. Пространственно-временные аспекты движения влаги и растворенных веществ в почвах / А.Б. Умарова, П.И. Кирдяшкин, **С.В. Железова**, М.В. Банников // Почвоведение и агрохимия в XXI веке. – С.-Пб.: 2006. – С. 203–204.
24. **Железова, С.В.** Трансформация некоторых свойств модельной почвы под воздействием древесной растительности лесополосы / С.В. Железова, А.Б. Умарова, Т.В. Бекецкая // Ноосферные изменения в почвенном покрове. – Владивосток: 2007. – С. 331.
25. Бекецкая, Т.В. Агроэкологическая оценка структуры почвенного покрова территории «Заокские питомники» / Т.В. Бекецкая, **С.В. Железова** // Материалы V Всероссийского съезда почвоведов им. В.В. Докучаева. – Ростов-на-Дону: 2008. – С. 364.
26. Beketskaya, T.V. Landscape and soil research for nursery garden / T.V. Beketskaya, **S.V. Zhelezova** // Леса Евразии – Польские леса. – Познань, Польша: 2009. – С. 111–113.
27. Березовский, Е.В. Опыт составления карт для точного земледелия / Е.В. Березовский, **С.В. Железова**, В.П. Самсонова // Аграрное обозрение. – 2010. – № 2 (18) – С. 43–46.
28. Беленков, А.И. Результаты опыта ЦТЗ в различные годы / А.И. Беленков, **С.В. Железова** //М-лы н.-практ. конф. «Сельское хозяйство, проблемы, перспективы». – М.: МНОЦ РГАЗУ. 2012. – С.43.
29. Березовский, Е.В. Точность выгодна / Е.В. Березовский, **С.В. Железова**, А.И. Беленков, Н.И. Королёва // Аграрное обозрение. – 2012. – № 4. – С. 14–17.
30. Беленков, А.И. Информационное обеспечение точных агротехнологий в полевом опыте РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева / А.И. Беленков, Е.В. Березовский, **С.В. Железова** // Информационные и телекоммуникационные технологии. – 2012. – № 16. – С. 12.
31. **Железова, С.В.** Лиственничная аллея – визитная карточка Тимирязевской Академии / С.В. Железова // Леса Евразии-2012. – М.: Изд-во МГУЛ. – 2012. – С. 100–101.
32. **Zhelezova, S.V.** Experience at Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy on introduction and integration of precision agriculture technology / S.V. Zhelezova, E.V. Berezovsky // Acta Agraria Debreceniensis. Journal of Agricultural Sciences. – 2012. – v. 49. – P. 73–76.
33. Березовский, Е.В. Использование оптических сенсоров для управления продукционным процессом озимой пшеницы / Е.В. Березовский, **С.В. Железова**, Д.В. Гусев // Геоинформационные технологии в сельском хозяйстве. – Оренбург: Издательский центр ОГАУ. – 2013. – С. 171–176.
34. Беленков, А.И. Взаимосвязь урожайности зерновых культур с плодородием почвы в полевом опыте ЦТЗ / А.И. Беленков, **С.В. Железова,** и др. // Нивы Зауралья. – 2013. – № 5 (105). – С. 58–61.
35. **Железова, С.В.** Учебная дисциплина «Точное земледелие» в РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева / С.В. Железова // Материалы IX Межд. науч.-практ. конференции Аграрная наука – сельскому хозяйству. – Барнаул: РИО АГАУ, 2014. – Сборник статей. Книга 1. – С. 59–60.
36. **Железова, С.В.** Современные технологии возделывания полевых культур в Центре точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева / С.В. Железова, Е.В. Березовский // М-лы IX Межд. науч.-практ. конф. «Аграрная наука – сельскому хозяйству». – Барнаул: РИО АГАУ, 2014. – Сборник статей. Книга 2. – С. 90–91.
37. Васин, К.В. Перспективы использования беспилотной аэрофотосъёмки в точном земледелии / К.В. Васин, **С.В. Железова** // М-лы X Межд. науч.-практ. конф. «Аграрная наука – сельскому хозяйству». – Барнаул: РИО АГАУ, 2015. – Сборник статей. Книга 2. – С. 41–43.
38. **Железова, С.В.** Применение беспилотной аэрофотосъемки для оперативной оценки состояния посевов в полевом опыте Центра точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А.Тимирязева / С.В. Железова, Е.В. Березовский, М.В. Вьюнов // М-лы X Межд. науч.-практ. конф. «Аграрная наука – сельскому хозяйству». – Барнаул: РИО АГАУ, 2015. – Сборник статей. Книга 2. – С. 84–86.
39. Беленков, А.И. Влияние подкормок на урожайность озимой пшеницы и плодородие дерново-подзолистой почвы в полевом опыте ЦТЗ РГАУ – МСХА имени К.А.Тимирязева / А.И. Беленков, Е.В. Березовский, **С.В. Железова**, М.А. Мазиров // Сборник статей: Агрохимические и агроэкологические проблемы повышения плодородия почвы и использования удобрений. – Львов, Украина, 2015. – С. 30–38.
40. Meshalkina, J.L. Carbon balance assessment by eddy covariance method for agroecosystems with different crops on sod-podzolic soils / J.L. Meshalkina, A.M. Yaroslavtsev, I.I. Vasenev, **S.V. Zhelezova**, E.V. Berezovsky // 7th Congress of the European Society for Soil Conservation “Agroecological assessment and functional-environmental optimization of soils and terrestrial ecosystems”. – Moscow, Russian Federation: 2015. – P. 198–200.
41. Беленков, А.И. Урожайность озимой пшеницы / А.И. Беленков, Е.В. Березовский, **С.В. Железова** // Фермер. Поволжье. – 2015. – № 8 (39). – С. 28–31.
42. Беленков, А.И. Влияние подкормок на урожайность озимой пшеницы в полевом опыте ЦТЗ РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева / А.И. Беленков, Е.В. Березовский, **С.В. Железова** // Нивы Зауралья. – 2015. – № 6 (128). – С. 56–58.
43. Балабанов, В.И. Системы параллельного и автоматического вождения / В.И. Балабанов, **С.В. Железова**, и др. // Нивы Зауралья. – 2015. – № 7 (129). – С. 58–59.
44. **Железова, С.В.** Применение беспилотной аэрофотосъёмки для оценки состояния почвы и посевов на Полевой опытной станции РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева / **С.В. Железова**, М.В. Вьюнов, и

др. // М-лы науч. конф. «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». – С-Пб.: ФГБНУ АФИ, 2015. – С. 76–80.
45. Балабанов, В.И. Системы параллельного и автоматического вождения: использование в полевом опыте ЦТЗ / В.И. Балабанов, Е.В. Березовский, А.И. Беленков, **С.В. Железова** // Нивы Зауралья. – 2015. – № 10 (132). – С. 52–55.
46. Балабанов, В.И. Использование системы параллельного и автоматического вождения в точном земледелии / В.И. Балабанов, Е.В. Березовский, А.И. Беленков, **С.В. Железова** // Фермер. Поволжье. – 2015. – № 10 (41). – С. 42–44.
47. Балабанов, В.И. Системы параллельного и автоматического вождения в полевом опыте ЦТЗ / В.И. Балабанов, и др., **С.В. Железова** // Фермер. Поволжье. – 2015. – № 11 (42). – С. 38–41.
48. Балабанов, В.И. Дифференцированное внесение удобрений в точном земледелии / В.И. Балабанов, **С.В. Железова** и др. // Фермер. Поволжье. – 2016. – № 2 (44). – С. 61–63.
49. Балабанов, В.И. Приёмы дифференцированного внесения минеральных удобрений в точном земледелии / В.И. Балабанов, Е.В. Березовский, А.И. Беленков, **С.В. Железова** // Нивы России. – 2016. – № 2 (135). – С. 54–56.
50. **Железова, С.В.** Многолетний мониторинг засоренности посевов зерновых культур в севообороте Центра точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А.Тимирязева / С.В.Железова // Защита зерновых культур от болезней, вредителей, сорняков: достижения и проблемы. – Большие Вязёмы: 2016. – С. 111–118.
51. Беленков, А.И. Опыт центра точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева / А.И. Беленков, В.Д. Полин, **С.В. Железова** // Фермер. Черноземье. – 2018. – № 6 (15). – С. 22–28.
52. **Железова, С.В.** Использование спутниковых снимков высокого разрешения для оценки состояния посевов на Полевой опытной станции РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева / С.В. Железова, Т.А. Гурова, Д.В. Гусев // «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». – С-Пб.: ФГБНУ АФИ, 2018. – С. 125–131.
53. **Железова, С.** Новая эра / С. Железова // Новое сельское хозяйство. – 2018. – № 2. – С. 38–41.
54. **Железова, С.** Цифровым курсом / С. Железова // Новое сельское хозяйство. – 2018. – № 3. – С. 17.
55. **Железова, С.** «Цифра» в поле / С. Железова // Новое сельское хозяйство. – 2018. – № 6. – С. 38–39.
56. **Железова, С.В.** Урожайность ячменя на дерново-подзолистой почве и обоснование приемов точного земледелия по дифференцированному внесению извести / С.В. Железова, А.А. Ананьев // Доклады ТСХА. Выпуск 291 (часть III). – М.: Изд-во РГАУ–МСХА. – 2019. – С. 541–544.
57. **Железова, С.В.** Пахать или не пахать? Плюсы и минусы нулевой обработки почвы / С.В. Железова, А.В. Мельников, А.А. Ананьев // М-лы Межд. науч. конф. «Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы» – М.: МГУ, 2019. – С.786–790.
58. **Железова, С.В**. Твёрдость пахотного слоя почвы при традиционной, минимальной и нулевой обработке. / С.В. Железова, А.А. Ананьев, А.И. Беленков, Т.А. Гурова // Материалы II Международной научной конференции «Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего». – С-Пб.: ФГБНУ АФИ, 2019. – С. 67–74.
59. **Железова, С.В.** Прямой посев и вспашка: десятилетний комплексный мониторинг агрофитоценозов в Центре точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева / С.В. Железова // Сборник научных трудов ГНБС. – Том 148. – Ялта: ФГБУН «НБС – ННЦ». – 2019. – С. 60–67.
60. **Железова, С.В.** Нулевая обработка почвы – новое или хорошо забытое старое? Исторический обзор распространения технологии в мире и в России / С.В. Железова // I Никитинские чтения «Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах». – ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова». – Пермь: 2020. – С. 445–450.
61. Зейлигер, А.М. Верификация результатов мониторинга NDVI спутниковой группировки Planet по наземным опорным данным в полевом опыте Центра точного земледелия РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева / А.М. Зейлигер, **С.В. Железова**, О.С. Ермолаева, и др. // М-лы 17-й Всеросс. откр. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН, 2019. – С. 425. – http://conf.rse.geosmis.ru/files/books/2019/7641.htm
62. **Zhelezova, S.** Long-term field experiments of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy / S. Zhelezova, O. Savoskina // 2nd Conference on Long-Term Field Experiments LOTEX-2019. Proceedling book. – Nyiregyhaza: 2019. – P. 79–84.
63. Ананьев, А.А. Твёрдость, влажность и электрическое сопротивление темно-каштановой почвы Ростовской области под разными культурами севооборота / А.А. Ананьев, **С.В. Железова** // «Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки». – С-Пб.: ФГБНУ АФИ, 2020. – 7 С.
64. Веллер, А.С. Инструментальные методы обнаружения сорной растительности в посевах зерновых культур / В.Е. Веллер, А.С. Салмин, И.М. Черкасов, **С.В. Железова** //«Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки». – С-Пб.: ФГБНУ АФИ, 2020. – 7 С.
65. **Железова, С.В.** Анализ многолетнего ряда продуктивности полей по данным дистанционного зондирования Земли и обоснование места отбора почвенных проб для целей точного земледелия / С.В. Железова, А.А. Ананьев, А.С. Салмин // Доклады ТСХА: Сборник статей. Выпуск 292. Часть IV. – М.: Издательство РГАУ – МСХА. – 2020. – С. 47–51.
66. **Железова, С.В.** Применение мультиспектральной съёмки с беспилотного летательного аппарата для оценки производственных посевов / С.В. Железова, В.Е. Веллер // Доклады ТСХА: Сборник статей. Выпуск 292. Часть IV. – М.: Издательство РГАУ – МСХА. – 2020. – С. 52–55.