

Пивченко Дмитрий Викторович

**ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА
ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ
В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ**

Специальность: 03.02.08— экология (биология)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва - 2019

Работа выполнена на кафедре экологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель:

Васенев Иван Иванович,

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева

Официальные оппоненты:

Филиппова Ася Вячеславовна,

доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой биологии, природопользования и экологической безопасности ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»

Хайдуков Константин Петрович,

кандидат биологических наук, руководитель направления агрохимических исследований ООО «Курск АгроАктив»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Почвенный институт имени В.В. Докучаева»

Защита состоится «13» декабря 2019 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.043.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел/факс: 8 (499) 976-21-84.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.б.н., доцент

Селицкая О.В.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Одна из задач агроэкологии – информационно-методическое обеспечение устойчивого производства качественной биологической продукции при максимальном использовании природного биоэнергетического потенциала агроэкосистем [Агроэкология, 2000; 2004]. Озимая пшеница – важнейшая сельскохозяйственная культура южно-таежной зоны, обеспечивающая продовольственную безопасность России.

Эффективность заявленной в качестве приоритетного направления развития в России цифровой экономики зависит от совершенствования информационных технологий. Задача внедрения цифрового земледелия в России актуализирует задачи использования агроэкологических моделей продукционного процесса, описывающих продукционный процесс на конкретном поле и в условиях конкретного вегетационного периода. Существующие рамочные модели продукционного процесса, как правило, имеют региональную привязку при использовании универсальных программ [Савин, Столбовой, ван Диепен, 2000; The DSSAT ... , 2003; Локальная информационно-справочная система ... , 2005; Васенёв, 2005; Модели продукционного процесса ... , 2006; Романенков, 2015]. Сохраняется актуальность разработки инструментария, позволяющего прогнозировать результаты применения разных агротехнологий при ускоренном изменении климата и качества почв.

Повышенный спрос на математические модели в сельском хозяйстве обуславливается необходимостью более точной оценки прогнозируемого урожая на ранних стадиях развития растений, анализом преимуществ и рисков той или иной системы земледелия до начала возделывания культуры [Шатилов, Чудновский, 1980]. Система DSSAT (The Decision Support System for Agrotechnology Transfer, далее – DSSAT) – наиболее распространенная в мире система поддержки и принятия агротехнологических решений [www.dssat.net]. Она применяется для моделирования развития биомассы и прогнозирования урожая 42 сельскохозяйственных культур с учетом местных особенностей почвенных условий и метеорологических особенностей конкретного года. Применение цифровых инструментов для облегчения адекватного выбора агротехнологий особенно актуально для дерново-подзолистых почв, характеризующихся пониженным уровнем природного плодородия и повышенной пестротой почвенного покрова [Фридланд, 1968; 1984; Савич, 1981; Сорокина, 1995; 2003; Аканова, 2001; Яшин и др., 2015; Кидин, Торшин, 2016].

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сельском хозяйстве может значительно упростить мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожая [Применение беспилотных ... , 2015]. На основании данных дистанционного зондирования можно оценить основные параметры культуры (биомассу, индекс листовой поверхности (LAI), высоту растений) и прогнозировать сроки биологического созревания зерновых культур, эффективность внесения удобрений и оптимальные сроки начала уборки [Estimation of biomass ... , 2016].

Вегетационные индексы, часто используемые для обработки данных дистанционного зондирования, отличаются по своей информативности при проведении агроэкологического мониторинга за различными биометрическими параметрами на различных стадиях развития посевов озимой пшеницы.

Цель работы состояла в проведение комплексных агроэкологических исследований с развитием информационно-методического обеспечения агроэкологических моделей продукционного процесса озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах в условиях южно-таежной зоны Центральной России.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести мониторинговые агроэкологические наблюдения за развитием посевов озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах в условиях Полевой станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

2. Провести локализацию рамочной агроэкологической модели CERES-Wheat (в структуре DSSAT v. 4.6) по материалам проводимых мониторинговых наблюдений для условий представительных полевых агроэкосистем с дерново-подзолистыми почвами.

3. Оценить влияния двух типов обработки (отвальной и нулевой) на развитие продукционного процесса озимой пшеницы в условиях исследуемого опыта.

4. По данным, получаемым с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), провести сравнительный анализ эффективности наиболее распространённых вегетационных индексов для оперативной массовой оценки биометрических показателей развития озимой пшеницы.

Научная новизна. По результатам проведенного детального мониторинга биометрических показателей продукционного процесса озимой пшеницы с использованием данных агроэкологических микрометеостанций, работающих по принципу вихревых ковариаций, для условий представительных полевых агроэкосистем южно-таежной зоны Центрального региона России на окультуренных дерново-подзолистых почвах установлено, что изменение во времени параметров биомассы озимой пшеницы (рост, проективное покрытие посевов) от фазы кущения до фазы цветения носит линейный характер с коэффициентами детерминации 0,95-0,98.

В результате локализации рамочной модели CERES-Wheat системы DSSAT с нахождением «генетических коэффициентов» для сорта Звезда линия 1 удалось получить высокий уровень совпадения (по урожаю – 5 %, по датам цветения и созревания – 2 - 3 дня) с экспериментальными данными, полученными в условиях представительной агроэкосистемы с дерново-подзолистыми почвами в агроклиматических условиях, близких к среднеголетним.

Сравнительный анализ информативности основных вегетационных индексов, рассчитанных по данным дистанционного зондирования с БПЛА в видимом и инфракрасном диапазоне, для характеристики временной изменчивости и пространственного разнообразия посевов озимой пшеницы в условиях представительной агроэкосистемы с дерново-подзолистыми почвами выявил оптимальный для мониторинга развития растений набор вегетационных индексов: для роста растений – TGI и VARI, для проективного покрытия – ENDVI; для моделирования густоты стеблестоя – DVI, GDVI, TGI, GLI на фазах выхода в трубку и начала созревания.

Практическая значимость. В результате локализации рамочной модели CERES-Wheat системы DSSAT получен набор «генетических коэффициентов»,

позволяющий адекватно отражать развитие продукционного процесса озимой пшеницы в условиях южно-таежной зоны в метеорологических условиях года, близкого к среднемноголетним, и предусматривающий ее последующую адаптацию для других погодных условий и других экосистем.

Продемонстрирован потенциал использования БПЛА для решения задач оперативного агроэкологического мониторинга состояния посевов, необходимого для прогнозирования урожая в системах управления агротехническими мероприятиями.

В результате исследований выявлен оптимальный набор вегетационных индексов для диагностики биометрических показателей развития озимой пшеницы в фазах выхода в трубку и начала созревания: роста растений – TGI и VARI, проективного покрытия – ENDVI; густоты стеблестоя – DVI, GDVI, TGI, GLI.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Рамочная агроэкологическая модель продукционного процесса озимой пшеницы CERES-Wheat адаптируема для условий зональных полевых агроэкосистем Центральной России с дерново-подзолистыми почвами.

2. Измеряемая в процессе агроэкологического мониторинга посева озимой пшеницы в фазу кущения густота стеблестоя позволяет предсказывать ее урожай на дерново-подзолистых почвах с коэффициентом детерминации до 0,7.

3. Густота стеблестоя в фазах выхода в трубку и начала созревания озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах может эффективно оцениваться по вегетационным индексам DVI, GDVI, TGI, GLI, рассчитываемым по данным дистанционного зондирования с БПЛА.

Методология и методы исследований. Методология исследований основана на информационном поиске источников отечественной и зарубежной литературы, обосновании актуальности, определении цели и задач. Программа исследований включала проведение полевых работ, лабораторных анализов, статистическую обработку полученных данных, анализ и обобщение полученных результатов. Выполнение работы проводилось с использованием общепринятых в агроэкологии методик.

Степень достоверности и апробации результатов. В ходе работы были использованы современные методы исследований и оборудование аккредитованной лаборатории агроэкологического мониторинга, моделирования и прогнозирования (Аттестат № РОСС RU.0001.21ЭА17). Достоверность выявленных закономерностей подтверждается статистической обработкой данных. Материалы диссертационного исследования прошли обсуждение на заседаниях кафедры экологии факультета Почвоведения, агрохимии и экологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (2015, 2016, 2017, 2018, 2019). Результаты были доложены на международных конференциях: V конференции ЛАМП, VII Московской Международной летней экологической школе (MOSES-2016), конференции молодых ученых РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (2016), «Почва и бобовые: симбиоз для жизни» (2016), «Докучаевские молодежные чтения» (2017, 2018), Ломоносов (2016, 2017), конференции, посвященной 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (2018), Генеральной Ассамблеи Европейского союза наук о Земле (EGU) в 2018 году.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 131 странице, иллюстрирована 39 рисунками, содержит 29 таблиц. Работа состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка, содержащего 132 источника, из них 56 на английском языке.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю профессору И.И. Васеневу, а также всем сотрудникам кафедры экологии, особенно – доц. Ю.Л. Мешалкиной, ст. преп. А.М. Ярославцеву и ст. преп. Д.В. Мореву за помощь в анализе данных. Автор благодарен проф. кафедры земледелия А.И. Беленкову и ст. науч. сотр. Полевой опытной станции С.В. Железовой, а также сотрудникам Метеорологической обсерватории МГУ и Метеорологической обсерватории имени В.А. Михельсона РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Глава 1 Обзор литературы: Почвенно-агроэкологическое моделирование продукционного процесса озимой пшеницы

Повышение эффективности сельского хозяйства требует внедрения современных цифровых технологий. Под цифровизацией в сельском хозяйстве понимается применение технологий точного земледелия и систем поддержки и принятия агротехнологических решений, которые зависят от мониторинга и обработки данных из множества источников с целью оптимизации производительности [Якушев, 2016; Навигационные системы ... , 2013].

Озимая пшеница благодаря высокой пластичности, наличию большого количества форм с различными требованиями к условиям жизни и высокой питательной ценностью зерна является важнейшей сельскохозяйственной культурой для условий дерново-подзолистых почв Центральной России [Кондратьева, Кондратьев, 1993]. Внедрение современных цифровых технологий при возделывании озимой пшеницы способно повысить эффективность сельского хозяйства.

Данные, получаемые в результате традиционных полевых экспериментов, уже не могут полностью удовлетворить современные потребности в информации. Полевые сельскохозяйственные исследования проводятся в конкретном месте и в конкретное время, соответственно возникает потребность в инструментарии, который позволил бы прогнозировать результаты управленческих решений на любой срок и в любом месте. Обеспечить решение данных задач призваны системы поддержки и принятия агротехнологических решений, представляющие собой компьютерные автоматизированные системы для объективного анализа предметной деятельности [Ларичев, Петровский, 1987]. Система поддержки и принятия агротехнологических решений для переноса агротехнологий (The Decision Support System for Agrotechnology Transfer, далее DSSAT) является одним из наиболее популярных во всем мире автоматизированных комплексов прогнозирования в области сельского хозяйства. DSSAT используется для разработки моделей развития сельскохозяйственных культур и прогнозирования урожая с учетом определенной местности и погодных условий конкретного года [The DSSAT ... , 2003].

Для выявления процессов, влияющих на параметры плодородия и для контроля за состоянием и уровнем загрязнения агроэкосистем в процессе интенсивной, сельскохозяйственной деятельности необходимо проведение агроэкологического

мониторинга [Агроэкологическая оценка ... , 2005]. Для повышения эффективности агроэкологического мониторинга, необходимо внедрение цифровых технологий оперативной обработки данных, получаемых с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [Low-altitude ... , 2015; Review of field-based phenotyping ... , 2016]. Цифровые камеры, установленные на БПЛА могут быть эффективно использованы для мониторинга параметров биомассы сельскохозяйственных культур путем получения спектральных характеристик исследуемых объектов [Пивченко и др., 2019]. Для оценки объема и состояния биомассы растений применяют вегетационные индексы [Pu, Gong, 2004; Retrieval of chlorophyll content ... , 2008; Meroni, Colombo, Panigada, 2004].

Глава 2 Объекты и методы исследований

Объектом исследования являлись полевые агроэкосистемы с озимой пшеницей 2015-2017 гг., расположенные на Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, на севере г. Москвы (рис. 1).



Рисунок 1 – Расположение Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в г. Москва, схема вариантов опыта с озимой пшеницей и точки пробоотбора

Опыт состоит из четырехпольного зерно-пропашного севооборота общей площадью 6 га с характерным для Нечерноземной зоны России набором культур: озимая пшеница + горчица пожнивно – картофель – ячмень – викоовсяная смесь. В ходе агроэкологического мониторинга проводились фенологические наблюдения, учет биомассы после цветения и структуры урожая перед уборкой озимой пшеницы. Была собрана информация по свойствам почвы, агротехнологическим мероприятиям, системе применения удобрений, и климатическим условиям за два сезона вегетации растений озимой пшеницы (2015-2016 гг. и 2016-2017 гг.) для настройки и тестирования модели продукционного процесса.

Вегетационный сезон 2015-2016 гг. можно рассматривать как представительный, близкий к среднемноголетним значениям по температуре и количеству осадков, в то время как сезон 2016-2017 гг. существенно отличается от среднемноголетних значений; он более холодный и влажный (рис. 2).

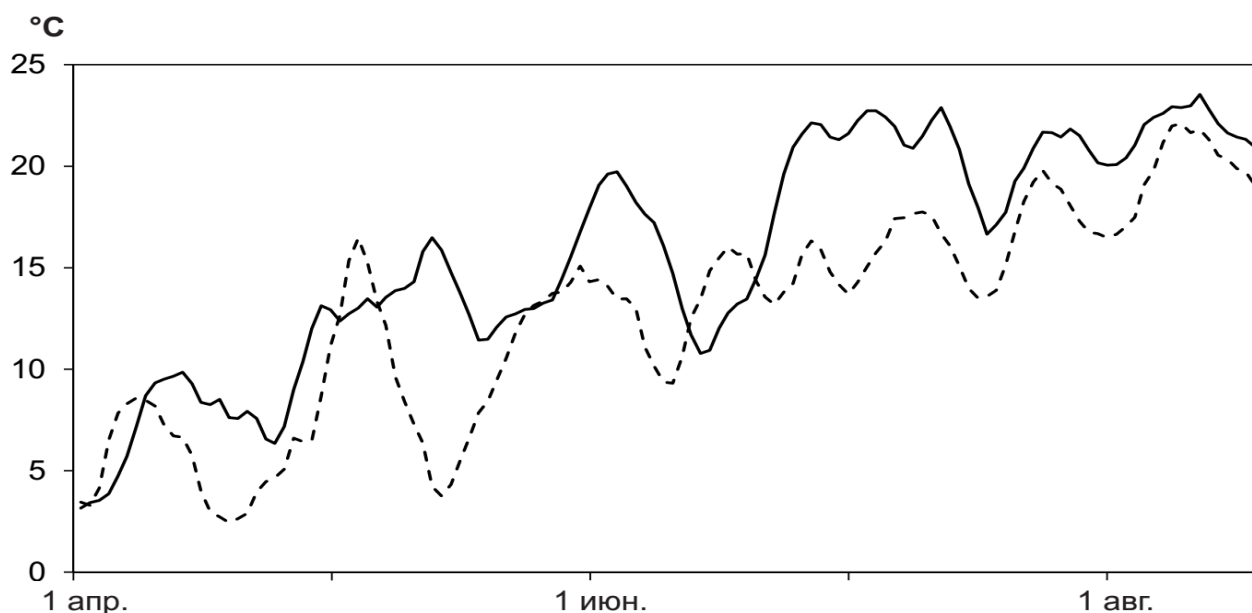


Рисунок 2 - Разница среднесуточных температур (скользящие средние с $n=5$) с 1 апреля по 15 августа в 2016 г. (сплошная линия) и в 2017 г. (пунктирная линия)

В сезоне вегетации озимой пшеницы 2015-2016 гг. на каждом варианте опыта располагалось по три точки пробоотбора, где проводились измерения наземной биомассы, без их стационарной фиксации с определением координат по GPS, т.е. с каждым новым измерением каждая точка несколько смещалась. Точки пробоотбора в сезоне 2016-2017 гг. фиксировались с помощью GNSS (Спутниковая система навигации - Global Navigation Satellite Systems) для привязки координат точек пробоотбора к карте (см. рис. 1). Всего в вегетационном сезоне 2015-2016 гг. полевые наблюдения проводились 7 раз, а в вегетационном сезоне 2016-2017 гг. - 6 раз.

Для нахождения оптимальных вегетационных индексов использовались данные, полученные с БПЛА DJI Phantom 2. Съёмка осуществлялась в видимом (RGB) и в инфракрасном (NirGB) спектрах (рис. 3) два раза: 23.07.2016 и 09.06.2017. В 2016 г. на квадрокоптер была установлена навесная камера Mapir; сшивка снимков производилась в программе DroneDeploy. В 2017 г. съёмка производилась на камеру Canon S100; сшивание снимков было произведено в программном комплексе Agisoft Metashape 1.5.

Значения яркости в каналах были получены со снимков с помощью программы QGIS 2.18. На полученных изображениях вокруг каждой точки пробоотбора была построена буферная зона радиусом 0,7 м (соответственно, площадью 1,5 м²) и считана соответствующая информация о яркости в каналах, которая использовалась для расчета и нахождения оптимальных вегетационных индексов. Для расчета вегетационных индексов по снимку NirGB в качестве канала видимого поглощения был использован синий канал.

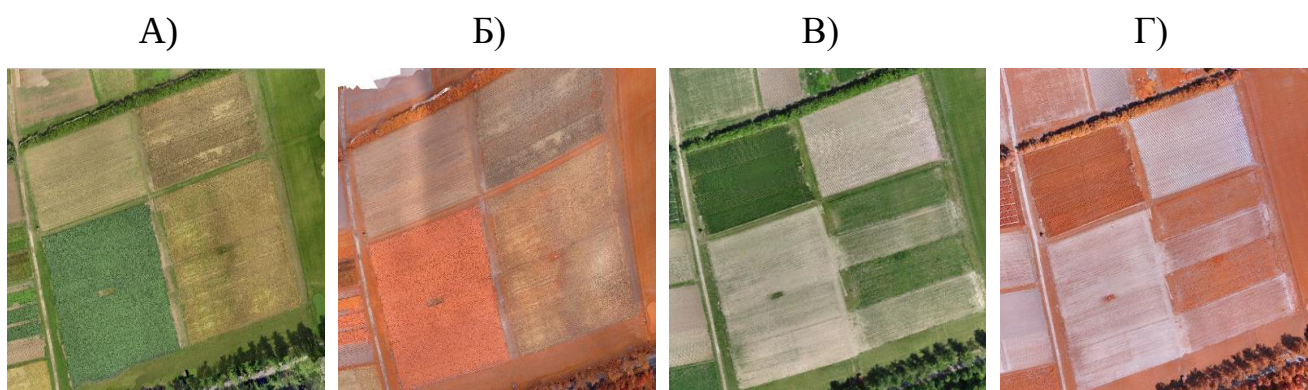


Рисунок 3 – Снимки в видимом спектре (RGB): А) 2016 г., В) 2017 г., - и в инфракрасном спектре (NirGB): Б) 2016 г., Г) 2017 г.

Систематизация вегетационных индексов, часто используемых для обработки данных при работе с БПЛА, приведена в таблице 1. Все эти индексы были исследованы в данной работе.

Таблица 1 Систематизация вегетационных индексов, часто используемых для обработки данных при работе с БПЛА

Вегетационный индекс (ВИ)	Уравнение
Нормализованный разностный ВИ [Estimation of Winter Wheat ... , 2017]	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$
Расширенный нормализованный разностный ВИ [Selection of vegetation indices ..., 2018]	$ENDVI = ((NIR + G) - 2B) / ((NIR + G) + 2B)$
Нормализованный разностный ВИ зелёности [Selection of vegetation indices ..., 2018]	$GNDVI = (NIR - G) / (NIR + G)$
Разностный ВИ [Estimation of Winter Wheat ... , 2017]	$DVI = NIR - R$
Разностный ВИ зелёности [Selection of vegetation indices ..., 2018]	$GDVI = NIR - G$
Оптимизированный почвенный ВИ [Estimation of Winter Wheat ... , 2017]	$OSAVI = (1.16)(NIR - R) / (NIR + R + 1.16)$
Перенормализованный разностный ВИ [Selection of vegetation indices ..., 2018]	$RDVI = (NIR - R) / \sqrt{(NIR + R)}$
Почвенный ВИ зелёности [Aerial color infrared photography ... , 2005]	$GSAVI = 1.5 * (NIR - GREEN) / (NIR + GREEN + 0.5)$
ВИ зелёности листьев [A visible band index ... , 2013]	$GLI = (2 * GREEN - RED - BLUE) / (2 * GREEN + RED + BLUE)$
Триангулярный ВИ зелёности листьев [Remote sensing ... , 2011]	$TGI = -0.5 [190(R - G) - 120(R - B)] / (R + G + B)$
Нормализованный ВИ разности зеленого и красного [Evaluation of Digital Photography ... , 2005]	$NGRDI = (GREEN - RED) / (GREEN + RED)$
ВИ устойчивый ко влиянию атмосферы [Selection of vegetation indices ..., 2018]	$VARI = (G - R) / (G + R - B)$

Для моделирования и прогнозирования продукционного процесса озимой пшеницы использована модель CERES-Wheat, входящая в структуру Системы поддержки и принятия решений для переноса агротехнологий (DSSAT) v. 4.6. Процесс моделирования состоял из двух этапов. На первом этапе была проведена настройка модели по входным данным вегетационного сезона 2015-2016 гг., близкого к среднестатистическим данным температуры и суммы осадков, которая состояла в нахождении параметров модели, обеспечивающих близость результатов моделирования к наблюдаемым характеристикам. После этого был проведен анализ чувствительности модели к разным дозам вносимых удобрений. Было проведено тестирование модели по данным вегетационного сезона 2016-2017 гг., который был холоднее и намного влажнее среднелетних данных.

Глава 3 Агроэкологический мониторинг продукционного процесса озимой пшеницы в 2015-2017 гг.

Средние значения высоты растений (рис. 4) в сезоне 2015-2016 гг. к концу вегетации составили 84,3 см, что почти на 14 см больше, чем в сезоне 2016-2017 гг. (среднее 70,5 см). Проективное покрытие посевов в обоих сезонах наблюдения имели близкие значения и в среднем составили для фаз: кущения – 43%, выхода в трубку – 59%, колошения – 71%, цветения – 77%, полной спелости – 78,5%.

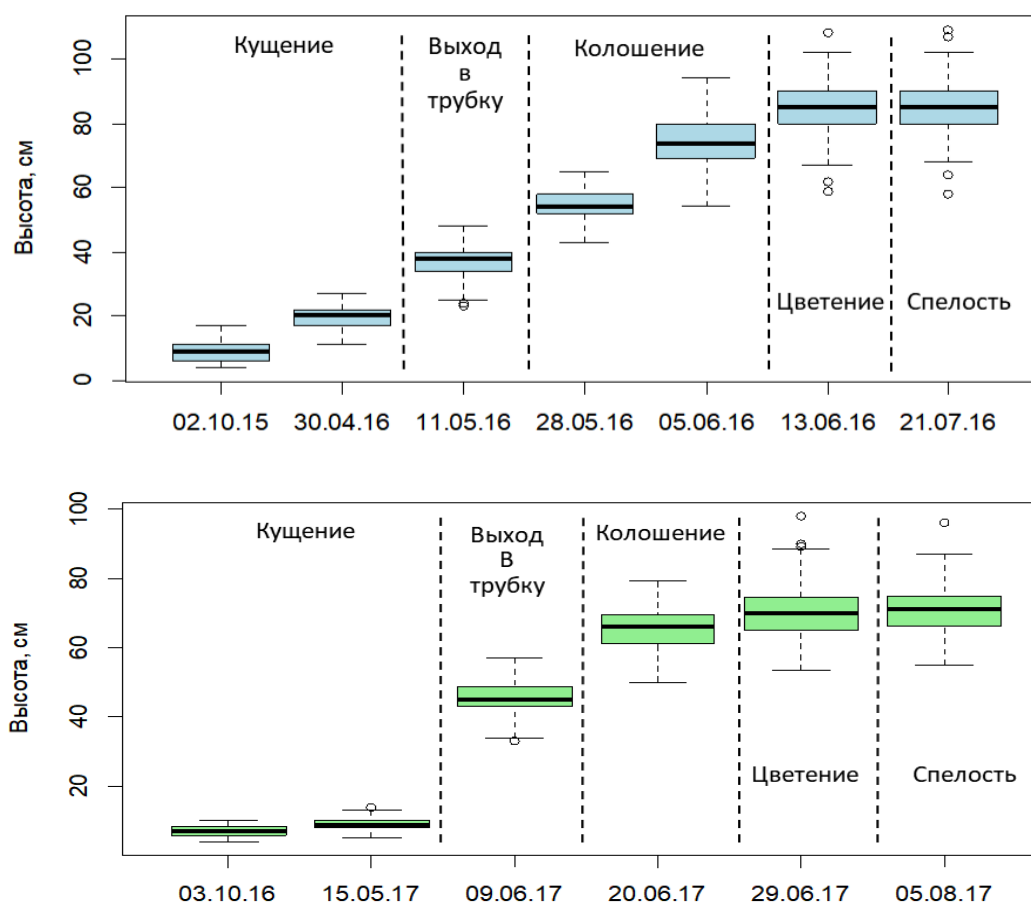


Рисунок 4 Распределение высоты растений озимой пшеницы в 2015-2017 гг. Чертой показаны медианы, коробочкой – нижний и верхний квартили, усиками – минимумы и максимумы, отдельными точками – выбросы

Густота стеблестоя, мониторинговые наблюдения за которой велись в 2017 г., увеличивается от фазы кущения до фазы колошения. Максимальная густота стеблестоя в фазу цветения составила 921 шт./м². После этого в связи с окончанием периода интенсивной вегетации до полной спелости происходило плавное уменьшение количества стеблей в связи с полеганием и другими факторами.

Средние показатели биомассы озимой пшеницы в период цветения растений в 2016 г были больше на 0,411; 0,762; 0,311; 1,485 кг/м² массы листьев, стеблей, колосьев и общей наземной биомассы, соответственно, чем в 2017 г. (рис. 5). Соотношение частей наземной массы листьев, стеблей и колосьев в 2016 году составило 1:3:1, соответственно. Соотношение частей наземной массы листьев, стеблей и колосьев в 2017 году составило 1:4,5:1,5, соответственно.

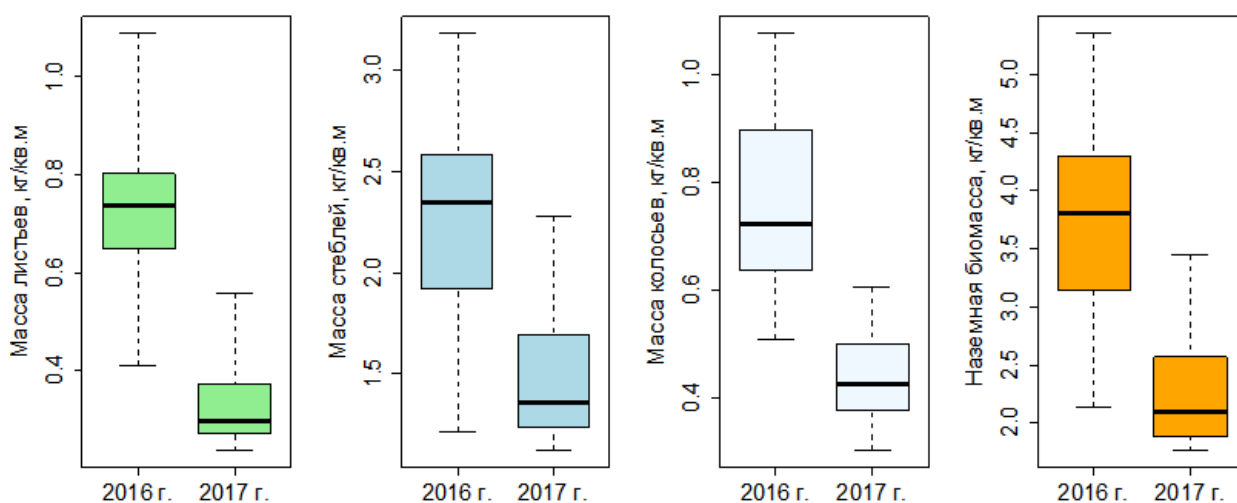


Рисунок 5 – Распределение показателей биомассы озимой пшеницы в обоих сезонах. Чертой показаны медианы, коробочкой – нижний и верхний квартили, усиками – минимумы и максимумы

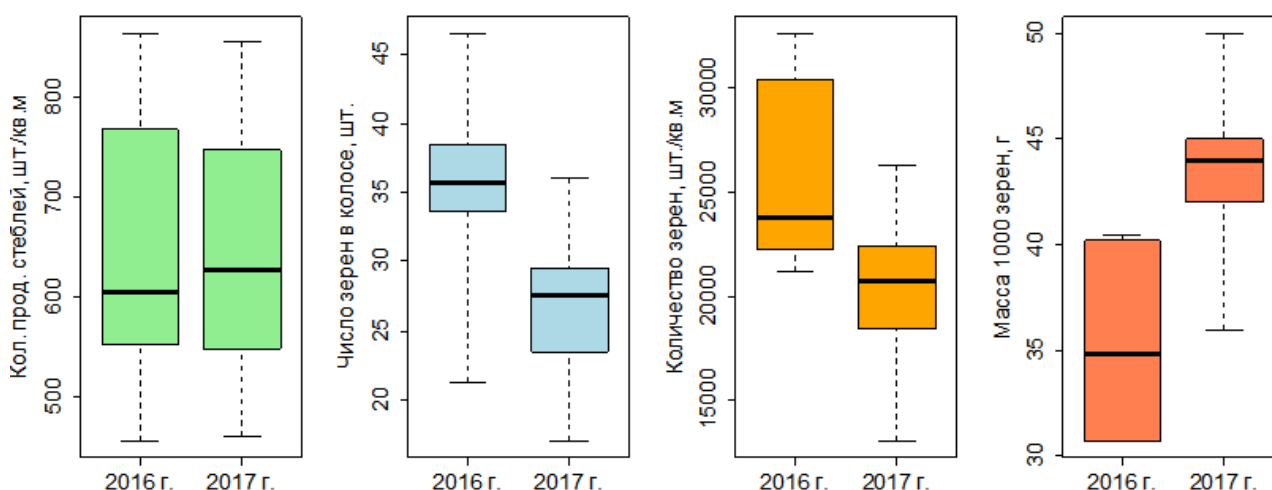


Рисунок 6 – Распределение количества продуктивных стеблей (шт./м²), числа зерен в колосе (шт.), количества зерен (шт./м²) и массы 1000 зерен (г) озимой пшеницы в 2016-2017 гг.

Анализ структуры урожая показал, что в обоих сезонах средние значения количества продуктивных стеблей на единице площади значимо не отличаются и составляли 627,4 шт./м² в 2016 г и 654,7 шт./м² в 2017 г. (рис.6). Однако в 2016 г было выше среднее число зерен в колосе - 36 шт. и среднее количество зерен - 25764 шт./м² в сравнении с 2017 г (26,7 шт. и 19978 шт./м² соответственно) (рис. 6). Более влажный сезон 2017 г. характеризовался большим показателем средней массы 1000 зерен – 43,5 г в сравнении с 2016 г. – 36 г (рис. 6). В обоих сезонах модели, построенные на основе усредненных наблюдений, для отвальной и нулевой обработок показали линейную зависимость для высоты растений и проективного покрытия посевов с коэффициентами детерминации 0,95-0,98.

Сопоставление параметров биомассы озимой пшеницы, полученных на ранних этапах вегетации в фазу кущения (15 мая 2017 г.) с характеристиками урожая, полученными в конце вегетации на фазе полной спелости, показало наличие значимых зависимостей. Наиболее высокий коэффициент корреляции ($R=0,83$) был найден между числом зерен на м² и густотой стеблестоя (шт./м²) (рис. 7 А). Таким образом, до 70% варьирования такого показателя урожая как количество зерен (шт./м²) может быть предсказано по густоте стеблестоя (шт./ м²) в фазу кущения.

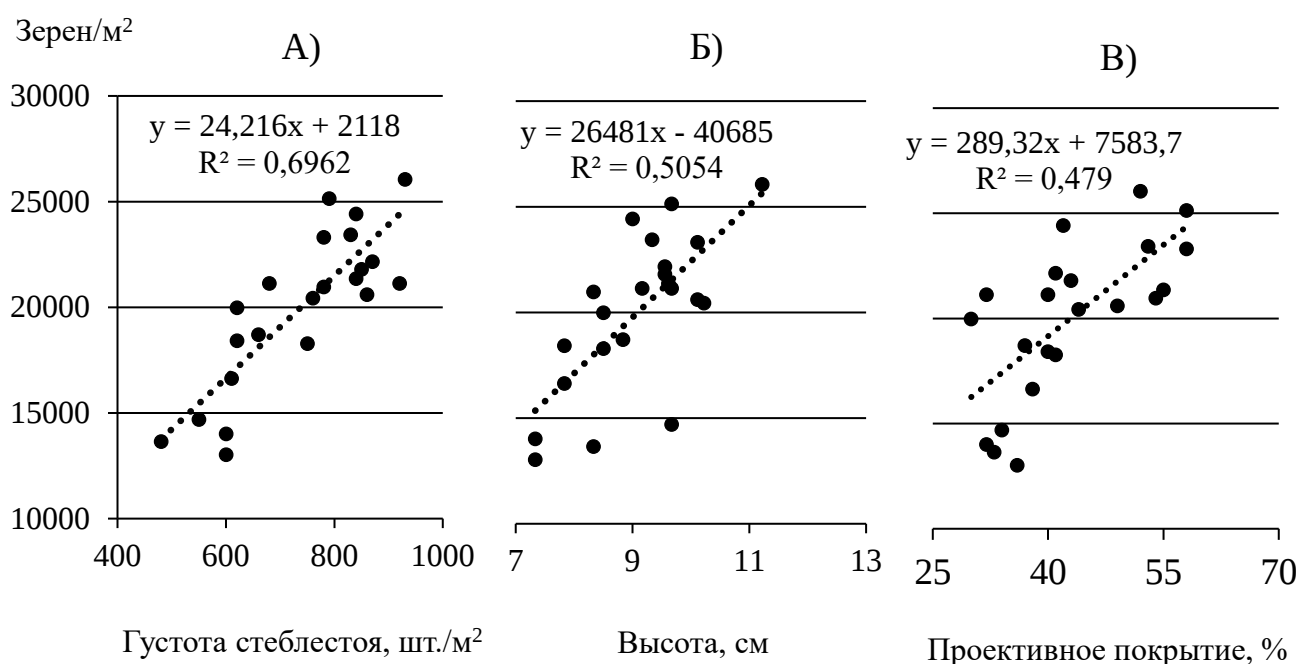


Рисунок 7 - Зависимость количества зерен /м² от А) густота стеблестоя, Б) высоты растений, В) проективного покрытия посевов в фазе кущения

Коэффициент корреляции между числом зерен на м² и высотой растений (см) составил $R=0,71$ (рис. 7 Б). До 50% варьирования такого показателя урожая как количество зерен (шт./м²) может быть предсказано по высоте растений пшеницы (см) в фазу кущения. Коэффициент корреляции между числом зерен на м² и проективным покрытием посевов (%), составил $R=0,69$ (рис. 7 В). Следовательно, до 48% варьирования такого показателя урожая как количество зерен (шт./м²) может быть предсказано по проективному покрытию (%) в фазу кущения.

Таким образом, оказалось, что варьирование параметров урожая может быть предсказано по данным варьирования высоты и проективного покрытия на фазе кущения.

Глава 4 Моделирование DSSAT

Для нахождения зависимостей, обеспечивающих близость результатов моделирования к наблюдаемым характеристикам роста и развития озимой пшеницы сорта Звезда линия 1, были оценены генетические (сортовые) коэффициенты, характеризующие развитие растений в почвенно-климатических условиях опыта точного земледелия при применении интенсивной агротехнологии (табл. 2). Коэффициенты оказались близки к значениям, оцененным для сортов, выращиваемых в Восточной Европе.

Таблица 2 Генетические коэффициенты DSSAT

КОД	Определение	*	**	***
P1V	Число дней с оптимальной температурой, необходимой для завершения яровизации	0-60	41	60
P1D	% уменьшения развития при фотопериоде на 10 ч короче, чем оптимальный при уменьшении фотопериода на 10 ч по отношению к оптимальному	0-200	120	70
P5	Длительность фазы налива зерна, °C сутки	100-999	525	550
G1	Отношение числа зерен к сухому весу стебля и колоса при цветении, шт/г	10-50	27	27,5
G2	Вес зерна при оптимальных условиях, мг	10-80	50	50
G3	Сухая масса стебля и колоса при созревании в фазе полной зрелости зерна, г	0,5-8,0	0,5	1,5-2,0
PHINT	Сумма активных температур, °C сутки, требуемая для последовательного появления листьев вдоль оси побега	30-150	95	95

* Диапазон изменения в системе DSSAT [The DSSAT ... , 2003]

** Значения, полученные по данным 2015–2016 гг.

*** Значения по Гудвин и др. [A user's guide ... , 1989]

Полученное значение коэффициента P1V, меньше чем для сортов, выращиваемых в Восточной Европе. Однако оно превышает значение P1V = 30, характерное для сортов, выращиваемых в условиях умеренного климата Великобритании. Значение коэффициента P1D принимают равным 50% для сортов, выращиваемых на равнинных территориях Северной Америки, 60% для Западной Европы и 70% для Восточной Европы. Сорт Звезда, линия 1 оказался наиболее чувствительным к сокращению данного показателя. Значения коэффициента P5 принимают равным 490 °C сутки для сортов озимой пшеницы, выращиваемых на равнинных территориях Северной Америки, 530 °C сутки для Западной Европы, 550 °C сутки – для

Восточной Европы и от 548 до 553°С сутки в условиях умеренного климата Великобритании [Bannayan., Crout., Hoogenboom., 2003]. Полученное значение для сорта Звезда, линия 1 оказалось очень близким к упомянутым значениям. Коэффициент G1, оказался практически равным значению, рекомендованному для сортов, выращиваемых в Европе – 27,5 шт./г. Коэффициент G2 совпал со значениями характерными для Восточной Европы. Коэффициент G3, значительно меньше оптимальных для пшеницы (1,5–2,9 г). Однако следует принимать во внимание, что сорт Звезда был получен в результате гибридизации пшеницы и пырея, поэтому для него вполне вероятны значения коэффициентов, не характерные для большинства сортов пшеницы. Коэффициент PHINT совпал со значением, которое было определено для озимой пшеницы в Европе [A user's guide ... , 1989]. В целом полученные коэффициенты показали, что условия выращивания сорта в Московской области менее благоприятны по сравнению с условиями в Восточной Европе и Великобритании.

В таблице 3 отражены результаты настройки модели CERES-Wheat для озимой пшеницы по данным 2015–2016 гг. Разница между смоделированным и наблюдаемым урожаем составила 5%.

Для настройки модели по вегетационному сезону 2015-2016 гг. проводился анализ чувствительности, который показал, что модель не чувствительна на использование функции, связанной с типом обработки почвы в эксперименте. Однако модель чувствительна к дозам и времени внесения удобрений, что имеет очень важное практическое значение. Включение азотных удобрений с осени и увеличение азотных подкормок показало наибольший эффект на моделируемую урожайность, что позволяет говорить о возможности использования модели для выбора агротехнологий связанных с системой применения удобрений.

Таблица 3 Результаты настройки (по данным 2015-2016 гг.) и тестирования (по данным 2016-2017 гг.) модели CERES-Wheat для озимой пшеницы

	Число дней от посева до цветения		Число дней от посева до созревания		Урожай зерна, т/га	
	М	Н	М	Н	М	Н
Настройка (2015–2016 гг.)	272	269	304	302	5,462	5,200
Расхождение	3 дня		2 дня		5%	
Тестирование (2016–2017 гг.)	270	283	310	327	3,640	5,255
Расхождение	–7 дней		–17 дней		–31%	

М - смоделированные значения, Н - результаты наблюдений

Результаты тестирования модели CERES-Wheat для озимой пшеницы по данным полевого сезона 2016–2017 гг. показаны в таблице 3. Вегетационные сезоны, в течение которых были собраны данные, различались метеорологическими

условиями. Вегетационный сезон 2017 г. был значительно холоднее по сравнению с 2016 г. (рис. 2), что вызвало отставание в развитии озимой пшеницы.

Разница в урожае 2017 г. и модели составила 31%, что свидетельствует о том, что модель пока не учитывает адаптационных возможностей сорта Звезда к более холодным температурам в течение вегетационного сезона (табл. 3). Проведенное исследование показало потенциальную возможность адаптации модели CERES-Wheat системы DSSAT для моделирования озимой пшеницы в условиях Московской области.

Глава 5 Исследование агроэкологических зависимостей для параметров биомассы озимой пшеницы

Исследование агроэкологических зависимостей для параметров биомассы озимой пшеницы проводилось в условиях Полевой опытной станции РГАУ-МСХА, где изучаемыми факторами являются способы основной обработки почвы (нулевая и отвальная) и технологии возделывания полевых культур (точная и традиционная).

В ходе вегетационного сезона 2016 г., который по своим параметрам близок к среднемноголетним данным, были получены достоверные отличия высоты растений озимой пшеницы при отвальной и нулевой обработках на всех наблюдаемых фазах развития растений, при этом, во всех случаях растения при отвальной обработке были выше: в фазу кущения (20,2 см и 18,6 см, соответственно), в фазу выхода в трубку (38,8 см и 35,7 см), в фазу колошения (56,8-76,9 см и 53,6-69,0 см), в фазу цветения (89 см и 79,4 см). Наземная биомасса растений озимой пшеницы в фазу цветения была больше при отвальной обработке по сравнению с нулевой обработкой: по массе листьев (0,821 кг/м² и 0,625 кг/м², соответственно), по массе стеблей (2,51 кг/м² и 1,9 кг/м²), по массе колосьев (0,894 кг/м² и 0,676 кг/м²), общей наземной биомассе (4,16 кг/м² и 3,2 кг/м²).

Параметры структуры урожая озимой пшеницы в фазу полной спелости при отвальной и нулевой обработках достоверно не отличались: ни по количеству продуктивных стеблей (664 шт./м² и 600 шт./м², соответственно), ни по числу зерен в колосе, ни по количеству зерен на м², ни по массе 1000 зерен (32,8 г и 40,3 г).

Были получены достоверные отличия по высоте растений озимой пшеницы при точной и традиционной технологиях земледелия на разных фазах развития растений. Так, были получены достоверные отличия в фазу кущения (19,2 см и 20 см, соответственно), в фазу выхода в трубку (36,4 см и 38,1 см, соответственно), в фазу колошения (56-75,4 см и 53,3-71,6 см, соответственно).

Для параметров урожая в 2016 г. достоверных отличий ни по типу обработки, ни по примененной технологии получено не было. По данным вегетационного сезона 2017 г. были получены достоверные отличия параметров биомассы растений озимой пшеницы при отвальной и нулевой обработках на разных фазах развития: на фазе кущения растения отличались по высоте (9,8 см и 8,4 см, соответственно), по проективному покрытию (49% и 39%), по густоте (841 шт./м² и 635 шт./м²); в фазу выхода в трубку по высоте (46,5 см и 44,2 см), по густоте (867 шт./м² и 624

шт./м²); в колошение по густоте (1077 шт./м² и 766 шт./м²); в фазу цветения по высоте (70,7 см и 66,4 см), а также по наземной биомассе (2,5 кг/м² и 2,0 кг/м²), в том числе для массы листьев (0,37 кг/м² и 0,28 кг/м²) и стеблей (1,68 кг/м² и 1,29 кг/м²). При этом, как и в течение сезона 2016 г. значения параметров были выше для отвальной обработки.

Параметры структуры урожая озимой пшеницы в фазу полной спелости на отвальной и нулевой обработках в 2017 г. отличались по количеству зерен (22 678 шт./м² и 17 278 шт./м², соответственно) и по массе 1000 зерен (41,1 г и 45,6 г).

Были также получены достоверные отличия в 2017 г. для густоты стеблестоя растений озимой пшеницы при точной и традиционной технологиях земледелия: в фазу колошения (995 шт./м² и 848 шт./м², соответственно) и в фазу цветения (680 шт./м² и 874 шт./м²). Оказалось, что в фазу цветения значения наземной биомассы на точной технологии достоверно выше по сравнению с традиционной технологией (2,4 кг/м² и 2,1 кг/м², соответственно), в том числе для массы колосьев (1,6 кг/м² и 1,4 кг/м²) и стеблей (1,6 кг/м² и 1,4 кг/м²).

В 2017 г. получены достоверные отличия такого параметра структуры урожая озимой пшеницы как масса 1000 зерен на точной и традиционной технологиях земледелия (44,8 г и 42,3 г, соответственно).

Таким образом, по результатам двух сезонов мониторинговых наблюдений выявлено, что практически на всех фазах развития растений характеристики развития биомассы достоверно выше на отвальной обработке по сравнению с нулевой обработкой.

На основе усредненных результатов наблюдений за высотой озимой пшеницы в течение вегетационных сезонов 2016 г. и 2017 г. и проективным покрытием в 2017 г. были построены регрессионные модели (табл. 4), которые описывают развитие растений озимой пшеницы начиная от возобновления вегетации весной до фазы цветения для вариантов опыта с применением отвальной и нулевой обработок почвы.

Таблица 4 Характеристика моделей, описывающих зависимость высоты растений и проективного покрытия от начала года (в днях) для периода от возобновления вегетации весной до фазы цветения

Сезон	Y	Тип обработки	Уравнение	R	R ²
2016	Высота растений, см	отвальная	$y = 1,54 * x - 165,06$	0,992	0,984
		нулевая	$y = 1,35 * x - 143,54$	0,996	0,991
2017	Высота растений, см	отвальная	$y = 1,43 * x - 181,69$	0,989	0,979
		нулевая	$y = 1,40 * x - 179,39$	0,975	0,950
2017	Проективное покрытие, %	отвальная	$y = 0,61 * x - 33,64$	0,996	0,993
		нулевая	$y = 0,89 * x - 80,57$	0,997	0,993

Согласно этим моделям развитие растений в высоту при отвальной обработке происходит несколько быстрее по сравнению с нулевой обработкой. Для проективного покрытия эта тенденция проявляется на ранних этапах развития растений, а после фазы выхода в трубку тенденция меняется. В обоих сезонах модели, построенные на основе усредненных результатов наблюдений показали линейную зависимость и высокие коэффициенты корреляции.

Таким образом, по результатам двух сезонов проведения мониторинговых агроэкологических исследований показано, что изменения во времени параметров биомассы озимой пшеницы (рост, проективное покрытие посевов) от фазы кущения до фазы цветения носят линейный характер с коэффициентами детерминации 0,95-0,98.

Глава 6 Исследование зависимостей между данными дистанционного зондирования с БПЛА и параметрами биомассы озимой пшеницы

Закономерности пространственного изменения урожая в среднем по делянкам в условиях повышенной неоднородности дерново-подзолистых почв показали возможность эффективного использования данных дистанционного зондирования, получаемые с БПЛА. Проведенные исследования по сравнительному анализу вегетационных индексов с точки зрения их использования для предсказания варьирования параметров наземной биомассы показали, что не во всех случаях индекс NDVI является оптимальным.

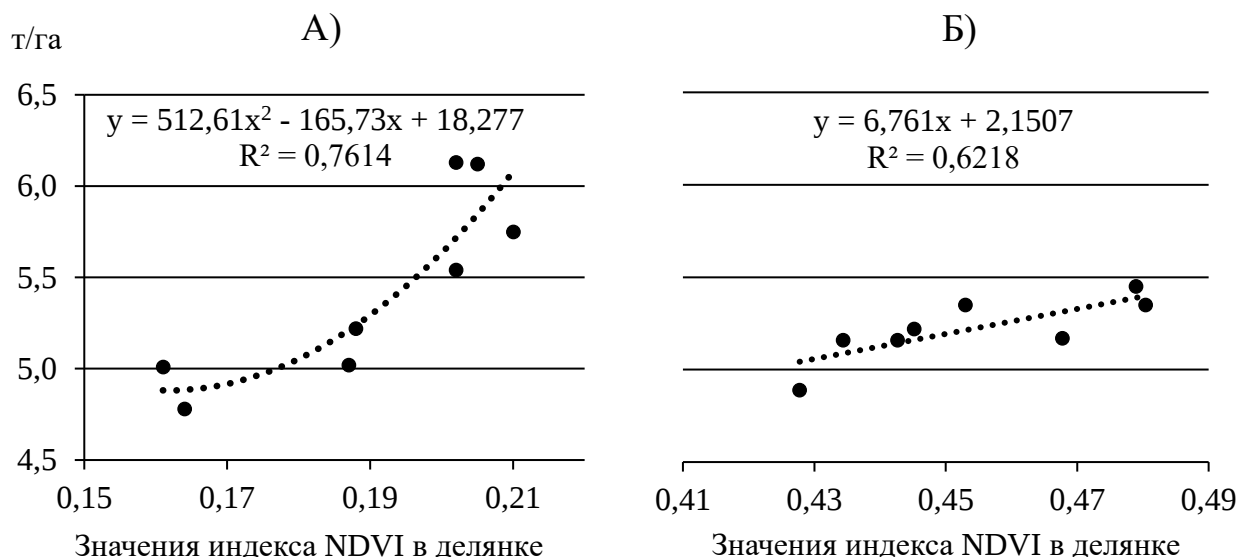


Рисунок 8 Регрессионная (полиномиальная) модель зависимости урожайности озимой пшеницы по делянкам А) в фазу восковой спелости в 2016 г, Б) в фазу выхода в трубку в 2017 г и средними значениями индекса NDVI

Урожайность озимой пшеницы за 2016 г. в среднем по всему полю составила 5,45 т/га, при этом разброс значений по делянкам был существенным (от 4,78 т/га до 6,13 т/га), что соответствует коэффициенту вариации 9%. Для нахождения зависимостей между с данными, полученными с БПЛА, и урожайностью для каждой из

восьми делянок был использован геопривязанный снимок с инфракрасным каналом NIRGB от 23.07.2016 (см. рис. 3Б).

Проведенный анализ усредненных попиксельно значений индекса NDVI показал, что средние для делянок в целом значения лежали в широком диапазоне от 0,16 до 0,25. Этот диапазон соответствует золотисто-коричневым тонам, что связано с тем, что снимок был сделан в фазу восковой спелости за 3 дня до уборки озимой пшеницы. Зависимость между значениями вегетационного индекса NDVI и данными по урожайности озимой пшеницы за 2016 г. по делянкам была описана регрессионной моделью (рис. 8А). При этом, большему значению индекса соответствовало большее значение урожайности озимой пшеницы, то есть делянки с большим урожаем созревали позднее. Коэффициент корреляции составил 0,84. Этот коэффициент значимо отличен от нуля, так как при уровне значимости 0,05 пороговое значение коэффициента корреляции для 8 точек составляет 0,75. Однако, как видно из рисунка 8А зависимость явно носит нелинейный характер.

Коэффициент детерминации равен 0,76, следовательно, регрессионная модель описывает 76% варьирования зависимой переменной. Наиболее информативным оказался диапазон NDVI от 0,19 до 0,21, так как на этом диапазоне урожай озимой пшеницы изменяется максимальным образом. В то же время, низкие значения NDVI от 0,15 до 0,19 позволяют выявлять разницу в урожае от 4,8 т/га до 5,3 т/га более дифференцировано.

Урожайность озимой пшеницы за 2017 г. в среднем по всему полю составила 5,25 т/га, при этом разброс значений по делянкам составил от 5,05 т/га до 5,46 т/га, что соответствует коэффициенту вариации 5%. Следовательно, в результате более холодного и влажного вегетационного сезона варьирование урожая между делянками в 2017 г. было значительно (примерно в два раза) меньше по сравнению с предыдущим вегетационным сезоном.

В 2017 г. Съёмка с помощью БПЛА проводилась в фазу выхода в трубку, то есть ранее, по сравнению с 2016 г. для того, чтобы оценить возможность прогноза неоднородности при формировании урожая (см. рис. 3 Г). Значения индекса NDVI изменялись от 0,42 до 0,48. Эти значения соответствуют хорошо развитой растительности с большой биомассой и высоким содержанием хлорофилла. Таким образом, диапазон значений NDVI был в два раза выше по сравнению с 2016 г. при варьировании урожая в два раза меньше.

Зависимость между значениями вегетационного индекса NDVI и данными по урожайности озимой пшеницы за 2017 г. по делянкам была описана линейной регрессионной моделью (см. рис. 8Б)

Большему значению индекса соответствовало большее значение урожайности озимой пшеницы. В данном случае, коэффициент корреляции составил 0,79 при уровне значимости 0,05. Коэффициент детерминации был равен 0,62, следовательно, регрессионная модель описывает 62% варьирования зависимой переменной. Таким образом, в условиях меньшего варьирования урожая удалось выявить достаточно хорошую зависимость от индекса NDVI, к тому же за месяц до уборки.

Использование данных дистанционного зондирования, полученных с помо-

щью БПЛА, позволяет учитывать внутриверхнее варьирование показателей урожайности посевов озимой пшеницы с достаточно высоким коэффициентом детерминации: по полям в целом в 2016 г. ($R=0,84$; $R^2 = 0,71$) и 2017 г. ($R=0,79$; $R^2=0,62$) даже при незначительном варьировании урожая с коэффициентами вариации в 5-9 %.

Для сравнительного анализа информативности использования широко применяемых вегетационных индексов для анализа пространственной изменчивости параметров биомассы был проведен анализ снимков, полученных с помощью БПЛА (см. рис.3 В и Г) в видимом и инфракрасном диапазоне от 9 июня 2017 г.

Были исследованы высота растений, густота стеблестоя и проективное покрытие, измеренные 9 и 29 июня 2017 г., соответственно, в фазу выхода в трубку и цветение. Для фазы цветения также изучались общая наземная биомасса, а также ее составляющие.

Для всех рассмотренных случаев значения коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена оказались близкими, при этом коэффициенты корреляции Спирмена оказались несколько выше по модулю, что свидетельствует о нелинейности описываемых связей. В таблицах 5 и 6 приведены соответствующие коэффициенты корреляции Спирмена, отличные от нуля.

Таблица 5 Коэффициенты корреляции Спирмена между вегетационными индексами и показателями биомассы озимой пшеницы в 2017 г.

Вегетационный индекс	Высота растений, см		Густота стеблестоя, шт./м ²		Проективное покрытие посевов, %
	9 июня	29 июня	9 июня	29 июня	9 июня
По данным инфракрасного снимка (NIRGB)					
NIR	0,61	0,61	-	0,52	-
GREEN	0,47	-	-	-	-
BLUE	-	-	-	-	-
NDVI	-	0,51	0,62	0,46	0,48
ENDVI	-	0,56	0,68	0,53	0,53
GNDVI	-	-	-	-	-
DVI	-	0,72	0,63	0,60	0,47
GDVI	-	0,66	0,60	0,59	-
OSAVI	-	0,49	0,64	0,45	0,50
RDVI	-	0,65	0,63	0,62	0,51
GSAVI	-	-	0,41	-	-
По данным видимого снимка (RGB)					
R	-	-0,43	-	-	-
G	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-
GLI	0,44	0,75	0,59	0,47	-
TGI	0,41	0,78	0,66	0,48	-
NGRDI	0,56	0,67	0,49	0,47	-
VARI	0,63	0,63	0,44	0,44	-

Все приводимые далее коэффициенты детерминации были рассчитаны по коэффициентам корреляции Пирсона. Помимо вегетационных индексов в таблицы включены значения отражения в каналах. Для инфракрасного снимка они обозначены, соответственно, NIR – инфракрасный, GREEN – зеленый, BLUE – голубой; для снимка в видимом диапазоне: R – красный, G – зеленый, B – голубой.

Значимая корреляция для высоты растений в фазу выхода в трубку отмечается только с вегетационными индексами со снимка RGB, вычисляемыми как разность значений отражения в красном и зеленом каналах. Максимальное значение наблюдается с индексом VARI – 0,63, то есть по снимку можно предсказать практически 40% от варьирования высоты растений пшеницы.

Для высоты растений от 29 июня зависимости с вегетационными индексами выражены сильнее, это связано, по-видимому с тем, что чем ближе к урожаю, тем сильнее проявляется разница в развитии биомассы, то есть по мере развития растений дифференциация по высоте не выравнивается, а усиливается.

Максимальное значение коэффициента корреляции, полученное для высоты растений пшеницы, составило – 0,78, то есть по снимку можно предсказать 61% от варьирования высоты растений пшеницы на начало фазы созревания. Для снимка RGB коэффициенты корреляции оказались выше, чем для инфракрасного снимка NIRGB.

Максимальное значение коэффициента корреляции, полученное для густоты стеблестоя растений пшеницы, составило – 0,68, то есть по снимку можно предсказать 46% от варьирования этого показателя. Густота стеблестоя одинаково хорошо коррелирует с обоими снимками, однако значения коэффициентов корреляции получились несколько выше для снимка NIRGB.

Максимальное значение коэффициента корреляции, полученное для проективного покрытия посевов растений пшеницы в фазу выхода в трубку составило – 0,53, то есть по снимку можно предсказать до 28%. Проективное покрытие посевов от 9 июня не имеет корреляционных зависимостей с вегетационными индексами, рассчитанными по снимку в RGB-спектре.

Для проективного покрытия посевов от 29 июня не оказалось ни одного значимого коэффициента корреляции, поэтому данная графа не была включена в таблицу 5. Это связано скорее всего с тем, что выбранная методика определения проективного покрытия посевов привела к большим неточностям во вторую фазу наблюдения.

В целом для сухой наземной биомассы и ее составляющих коэффициенты корреляции оказались выше, чем для высоты растений, густоты стеблестоя и проективного покрытия посевов. Достаточно высокие значения были получены как для снимка в видимом свете, так и для снимка в инфракрасном диапазоне.

Наибольшие коэффициенты корреляции были отмечены для колосьев, они выше, чем для других частей биомассы. Максимальное значение коэффициента корреляции, полученное для наземной биомассы, составило 0,82 (процент объясненного варьирования составил $R^2 = 67\%$), для колосьев – 0,85 ($R^2 = 72\%$), для стеблей – 0,80 ($R^2 = 64\%$), для листьев – 0,71 ($R^2 = 50\%$).

Анализ таблиц 5 и 6 показал, что в целом для предсказания наземной биомассы озимой пшеницы индекс NDVI не всегда дает лучшие результаты по сравнению с остальными вегетационными индексами. Например, в данном исследовании во всех случаях индекс ENDVI показал более высокие коэффициенты корреляции по сравнению с индексом NDVI. Однако оба индекса DVI и GDVI были во всех случаях лучше по сравнению с указанными двумя индексами. Среди вегетационных индексов для видимого диапазона лучшие результаты показали индексы VARI и TGI. Индексы GNDVI и GSAVI показали или отсутствие, или низкие коэффициенты корреляции со всеми изученными параметрами биомассы.

Таблица 6 Коэффициенты корреляции Спирмена между вегетационными индексами и показателями сухой надземной биомассы, полученными в начале созревания озимой пшеницы 29 июня 2017 года

Вегетационный индекс	Листья кг/м ²	Стебли. кг/м ²	Колосья кг/м ²	Общая надземная биомасса, кг/м ²
По данным инфракрасного снимка (NIRGB)				
NIR	-	-	-	-
GREEN	-	-	-	-
BLUE	-	-	0,46	-
NDVI	-0,60	-0,59	-0,70	-0,63
ENDVI	-0,69	-0,65	-0,75	-0,70
GNDVI	-	-	-0,47	-
DVI	-0,69	-0,71	-0,80	-0,74
GDVI	-0,57	-0,64	-0,76	-0,67
OSAVI	-0,61	-0,58	-0,68	-0,61
RDVI	-0,68	-0,67	-0,80	-0,71
GSAVI	-	-	-0,54	-0,42
По данным видимого снимка (RGB)				
R	0,54	0,67	0,60	0,64
G	-	-	-	-
B	-	-	0,44	-
GLI	-0,69	-0,81	-0,85	-0,82
TGI	-0,71	-0,80	-0,85	-0,81
NGRDI	-0,63	-0,77	-0,74	-0,76
VARI	-0,62	-0,74	-0,67	-0,72

Сравнительный анализ информативности основных вегетационных индексов, рассчитанных по данным дистанционного зондирования видимого и инфракрасного диапазона, полученных с БПЛА, для характеристики временного и пространственного разнообразия посевов озимой пшеницы в условиях Московской области выявил новые возможности их использования для предсказания целого ряда параметров биомассы пшеницы на фазах выхода в трубку и начала созревания.

В результате проведенного исследования были выявлены наиболее информативные для условий изучаемой полевой агроэкосистемы вегетационные индексы,

которые позволяют рассчитывать параметры биомассы. Оптимальными для прогнозирования высоты озимой пшеницы оказались вегетационные индексы, рассчитанные по снимку видимого диапазона (TGI и VARI, максимальное значение коэффициентов корреляции – 0,78), а для отслеживания проективного покрытия – вегетационные индексы, рассчитанные по инфракрасному снимку (например, ENDVI максимальное значение коэффициентов корреляции – 0,53).

Для моделирования густоты стеблестоя, а также сухой массы наземной биомассы и ее частей подходят вегетационные индексы с обоих снимков: наибольшие коэффициенты корреляции были получены для индексов DVI, GDVI, TGI, GLI (максимальные значения коэффициентов корреляции, соответственно, составили 0,80, 0,76, 0,85 0,85). Индексы GNDVI и GSAVI оказались неэффективными для описанного случая, при отсутствии выраженной разреженности посевов, когда варьирование всех параметров наземной биомассы не превышало 25%.

Заключение

1. Результаты агроэкологического мониторинга, проведенного в вегетационном сезоне 2015-2016 гг., близком к среднегодовым агроэкологическим условиям, показали принципиальную возможность использования модели CERES-Wheat для моделирования продукционного процесса озимой пшеницы на дерново-подзолистых почвах в условиях Центральной России. Расхождение по урожайности экспериментально полученных данных продукционного процесса озимой пшеницы с их расчетными значениями по локализованной к условиям эксперимента модели CERES-Wheat не превысило 5 %.

2. Сопоставление параметров биомассы озимой пшеницы, полученных на ранних этапах вегетации в фазу кущения, с характеристиками урожая, полученными в конце вегетации, показало возможность их эффективного использования для предсказания урожая. По результатам двух сезонов проведения мониторинговых агроэкологических исследований показано, что изменения во времени параметров биомассы озимой пшеницы (рост, проективное покрытие посевов) от фазы кущения до фазы цветения носят линейный характер с коэффициентами детерминации 0,95-0,98. Наиболее высокая зависимость была найдена между числом зерен на м² и густотой стеблестоя (шт./м²) в фазу кущения ($R = 0,83$).

3. Проведение мониторинговых агроэкологических исследований в условиях двух контрастных по агроклиматическим условиям сезонов (близкого к среднегодовым данным 2015-2016 гг. и существенно более холодного и влажного 2016-2017 гг.) показало высокую чувствительность модели CERES-Wheat системы DSSAT к изменению погодных условий, что определяет необходимость создания серии настроек модели на разные погодные условия с учетом региональных особенностей проявления сортовой специфики озимой пшеницы.

4. Анализ чувствительности настроенной модели CERES-Wheat системы DSSAT к применению удобрений показал адекватное отражение в модели влияния применяемых доз NPK, применения азотных удобрений с осени и увеличения азотных подкормок, что позволяет говорить о возможности использования модели для выбора оптимальных вариантов агротехнологий, в части применения удобрений.

5. В то же время, действующий модуль влияния на урожайность способа обработки почв не имеет адекватного отклика в развитии продукционного процесса и нуждается в дополнительной адаптации к условиям исследуемого региона, с учетом результатов агроэкологического мониторинга представительных экспериментальных участков. Построенные на основе усредненных данных мониторинговых наблюдений двух сезонов регрессионные уравнения сезонной динамики (с коэффициентами детерминации 0,95-0,98) высоты растений и проективного покрытия посевов показали достоверные отличия вариантов с отвальной и нулевой обработкой (до 10% проективного покрытия посевов в стадию кущения и до 311 шт. /м² по густоте стеблестоя в фазу колошения, 4,3 см по высоте растений в фазу цветения).

6. В условиях характерных для южно-таежной зоны Центральной России, повышенной пестроты плодородия почв, важным элементом информационно-методического обеспечения агроэкологических моделей продукционного процесса озимой пшеницы становится использование данных дистанционного зондирования, полученных с помощью БПЛА. В условиях исследованных участков мониторинга оно позволяет учитывать внутрипольное варьирование урожайности посевов озимой пшеницы с достаточно высоким коэффициентом детерминации: по делянкам в целом в 2016 г. ($R=0,84$; $R^2 = 0,71$) и 2017 г. ($R=0,79$; $R^2=0,62$).

7. Оптимальными для прогнозирования роста озимой пшеницы оказались вегетационные индексы, рассчитанные по данным видимого диапазона (TGI и VARI), а для отслеживания проективного покрытия посевов – вегетационные индексы, рассчитанные по данным инфракрасного диапазона (например, ENDVI). Для моделирования густоты стеблестоя, а также сухой массы наземной биомассы и ее частей достаточно информативны вегетационные индексы с обоих вариантов съемки: наиболее высокие коэффициенты корреляции были получены для индексов DVI, GDVI, TGI, GLI.

8. Ускоренно проявляющиеся на основной территории России глобальные изменения климата актуализируют адаптацию агроэкологических моделей продукционного процесса к условиям основных сельскохозяйственных регионов, что позволяет более оперативно реагировать на изменения агроклиматических условий и применяемых агротехнологий.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Пивченко, Д.В. Опыт адаптации системы DSSAT для моделирования урожая озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в условиях Московской области / Д.В. Пивченко, Ю.Л. Мешалкина, И.И. Васенев, М.В. Тихонова, М.М. Визирская // Проблемы агрохимии и экологии. – 2019. – № 1. – С. 33-39.

2. Пивченко, Д.В. Сравнительный анализ вегетационных индексов для агроэкологического мониторинга озимой пшеницы в условиях Московской области [Электронный ресурс] / Д.В. Пивченко, Ю.Л. Мешалкина, А.М. Ярославцев, М.В. Тихонова, М.М. Визирская, И.И. Васенев // «АгроЭкоИнфо». – 2019. – № 3. – Режим доступа:

http://agroecoinfo.narod.ru/journal/TEXT/RUSSIAN/2019/st_324_annot.html

Статьи в прочих изданиях:

3. Пивченко, Д.В. Перспективы использования адаптированных к условиям Центральной России версии DSSAT для корректировки агротехнологий по результатам агроэкологического мониторинга / Д.В. Пивченко // Информационно-методическое обеспечение агроэкологического мониторинга и экологический мониторинг парниковых газов в условиях Центрального региона России. Материалы V конференции ЛАМП (Лаборатории агроэкологического мониторинга, моделирования и прогнозирования экосистем РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева) / Под ред. Васенева И.И. – Москва: ООО «Типография «ПринтФормула», 2015. – С.104-106.

4. Пивченко, Д.В. Перспективы применения к условиям центральной России системы поддержки и принятия агротехнологических решений DSSAT / Д.В. Пивченко // Ломоносов – 2016: XXIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Секция «Почвоведение»: Тезисы докладов / Сост. Л.А. Поздняков. – М.: МАКС Пресс, 2016. – С. 95-96.

5. Пивченко, Д.В. Применение программного обеспечения DSSAT для создания агроэкологической модели продукционного процесса озимой пшеницы в условиях дерново-подзолистых почв Центральной России / Д.В. Пивченко // Ломоносов – 2017: XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Секция «Почвоведение»: Тезисы докладов / Сост. Л.А. Поздняков. – М.: МАКС Пресс, 2017. – С. 110.

6. Пивченко, Д.В. Настройка системы DSSAT для продукционного процесса озимой пшеницы в условиях дерново-подзолистых почв центральной России / Д.В. Пивченко // Материалы Международной научной конференции XX Докучаевские молодежные чтения «Почва и устойчивое развитие государства» / Под ред. Б.Ф. Апарина. – СПб., 2017. – С. 169-170.

7. Пивченко, Д.В. Информационно-методическое обеспечение продукционного процесса озимой пшеницы в условиях дерново-подзолистых почв Центральной России / Д.В. Пивченко // Материалы Международной научной конференции XXI Докучаевские молодежные чтения «Почвоведение – мост между науками» / Под ред. Б.Ф. Апарина. – СПб., 2018. – С. 396-397.

8. Pivchenko, D.V. DSSAT localization experience for modeling the production process of winter wheat on Arable Sod-Podzolic soils of the Central region of Russia / D.V. Pivchenko, J.L. Meshalkina, A.M. Yaroslavtsev, I.I. Vasenev // European Geosciences Union General Assembly 2018. – Vienna, Austria, 8–13 April 2018. – Vol. 20. – С. EGU2018-15340.