

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«СТАВРОПОЛЬСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА»

На правах рукописи
УДК: 633.11«324»:631.
559:581.144

СТОРЧАК Ирина Геннадьевна

**ПРОГНОЗ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI
ДЛЯ УСЛОВИЙ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ**

06.01.01 – общее земледелие, растениеводство

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель:

заведующий отдела физиологии расте-
ний ФГБНУ Ставропольский НИИСХ,
доктор биологических наук

Ерошенко Ф.В.

Ставрополь 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1	
ОЗИМАЯ ПШЕНИЦА. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА, РАЗВИТИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЯ (обзор литературы)	8
1.1. Озимая пшеница в Ставропольском крае	8
1.2. Фотосинтетическая продуктивность растений	14
1.3. Роль азота в формировании урожая и качества зерна озимой пшеницы	21
1.4. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса в сельском хозяйстве	24
ГЛАВА 2	
УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	32
2.1. Общие условия и характеристика территории Ставропольского края	32
2.2. Агрохимическая характеристика почв ФГБНУ Ставропольский НИИ сельского хозяйства	36
2.3. Климатическая характеристика места проведения исследований	38
2.4. Методы проведения исследований	41
ГЛАВА 3	
ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ	48
3.1. Состояние посевов озимой пшеницы и NDVI как их оптико- биологическая характеристика	48
3.2. Площадь ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы и NDVI их посевов	60
3.3. Содержание хлорофилла в растениях озимой пшеницы и NDVI их посевов	71

3.4. Фотосинтетические потенциалы и продуктивность посевов озимой пшеницы	88
3.5. Содержание азота в растениях озимой пшеницы и NDVI их посевов	99
ГЛАВА 4	
ОЦЕНКА ПРОДУКТИВНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА	108
4.1. Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае	108
4.2. Почвенно-климатические зоны Ставропольского края и регрессионные модели зависимости урожайности озимой пшеницы от NDVI	118
4.3. Использование различных характеристик динамики NDVI озимой пшеницы для оценки её продуктивности в Ставропольском крае	
ГЛАВА 5	122
ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ЗЕРНА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ	128
5.1 Экономическая эффективность выращивания озимой пшеницы в производственных условиях	128
5.2 Экономическая эффективность использования данных дистанционного зондирования Земли при возделывании озимой пшеницы	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	135
ЛИТЕРАТУРА	136
ПРИЛОЖЕНИЯ	155

ВВЕДЕНИЕ

Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса в сельском хозяйстве в основном связано с решением таких задач как инвентаризация сельхозугодий, выделение участков эрозии, заболачивания, засоленности, опустынивания и др. В последние годы большой интерес приобретают исследования, которые проводятся в различных регионах России, стран СНГ и мира, позволяющие давать прогноз урожайности сельскохозяйственных культур (Муратова Н.Р., Терехов А.Г., 2007; Куссуль Н.Н. и др., 2012; Савин И.Ю. и др., 2010; Becker-Reshef I. et al, 2010). К сожалению, в Ставропольском крае такие работы практически не ведутся. Кроме того, не до конца разработаны общие подходы и методология оценки продуктивности растений по данным ДЗЗ. Поэтому необходимы исследования, раскрывающие специфику взаимосвязи урожайности сельскохозяйственных культур с данными дистанционного зондирования Земли в различных почвенно-климатических условиях, которые позволят повысить точность прогнозов.

Для оценки степени развития, состояния и продуктивности посевов обычно используют их NDVI. Наряду с площадью ассимиляционной поверхности и содержанием хлорофилла в растениях, вегетационный индекс является оптико-биологической характеристикой (Шуркина А.И. и др., 2007; Ерошенко Ф.В., 2014). В связи с этим, встает необходимость исследований по выявлению механизмов и закономерностей взаимосвязи этих показателей, что позволит с большей объективностью и достоверностью получать информацию о физиологическом состоянии и продукционном процессе сельскохозяйственных культур, используя данные дистанционного зондирования Земли из космоса.

Содержание азота в растениях озимой пшеницы определяет не только состояние посева, его пищевой режим, и, как следствие, величину будущего урожая зерна, но и его качество. Литературные данные свидетельствуют о том, что существует взаимосвязь между количеством этого элемента мине-

рального питания и хлорофилла в органах растений сельскохозяйственных культур (Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А., 2000; Saleem M.F. et al., 2010). Считается (Шуркина А.И., 2007), что NDVI связан с содержанием в растениях зеленых пигментов из-за того, что в его формуле присутствует величина коэффициента отражения посева в красной области спектра электромагнитных волн, в которой находится один из максимумов поглощения хлорофилла. Поэтому исследования, направленные на разработку способов мониторинга содержания азота в растениях сельскохозяйственных культур на основе оперативных и объективных показателей, получаемых с помощью данных дистанционного зондирования Земли, являются важными и актуальными не только в теоретическом плане, но и для применения их в производстве.

Целью нашей работы было установить взаимосвязь между продуктивностью посевов озимой пшеницы и их вегетационным индексом NDVI в условиях Ставропольского края.

Задачи исследований:

1. Изучить особенности фотосинтетической продуктивности производственных посевов озимой пшеницы в условиях Ставропольского края.
2. Установить связь между площадью ассимиляционной поверхности, содержанием хлорофилла и азота в растениях озимой пшеницы с вегетационным индексом NDVI их посевов.
3. Выявить возможность использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае.

Научная новизна результатов исследований заключается в том, что впервые установлена связь размеров площади ассимиляционной поверхности посева и количества хлорофилла в растениях озимой пшеницы с вегетационным индексом их посевов. Предложен новый показатель на основе данных дистанционного зондирования Земли, который отражает величину и продолжительность функционирования фотосинтетического аппарата посева и ха-

рактируется высокой корреляционной связью с урожаем зерна. Установлена связь содержания азота в растениях озимой пшеницы с NDVI. Для условий Ставропольского края построены регрессионные модели урожайности озимой пшеницы с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Существует взаимосвязь между площадью ассимиляционной поверхности, содержанием хлорофилла и азота с вегетационным индексом NDVI посевов озимой пшеницы, выращенных в условиях Ставропольского края.
2. Для характеристики продукционного процесса посевов озимой пшеницы можно использовать показатель, отражающий размеры и продолжительность работы ассимиляционного аппарата растений, рассчитанный по данным дистанционного зондирования Земли.
3. Для Ставропольского края взаимосвязь между урожаем зерна озимой пшеницы и средним NDVI за весенне-летний период существенно повышается, если проводить расчеты по данным почвенно-климатических зон. Использование максимального NDVI не только повышает точность прогнозов продуктивности этой культуры, но и позволяет их составлять в более ранние сроки.

Теоретическая и практическая значимость. Предложенный показатель (вегетационный фотосинтетический потенциал), отражающий размер и продолжительность функционирования фотосинтетического аппарата может быть использован для оценки продукционного процесса посевов сельскохозяйственных культур. Установленные закономерности дают возможность использования NDVI как одного из оперативных и объективных показателей при проведении почвенно-растительной диагностики минерального питания растений озимой пшеницы. Результаты исследований позволяют на основе данных дистанционного зондирования Земли прогнозировать урожайность

озимой пшеницы в таких территориально-административных единицах как район, почвенно-климатическая зона и Ставропольский край в целом.

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены и получили положительную оценку на заседаниях Ученого совета Ставропольского НИИСХ, Региональной научно-практической конференции «Научное обеспечение агропромышленного комплекса Юга России» (Майкоп, 2013), Двенадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Институт Космических Исследований РАН (Москва, 2014).

Публикации результатов исследований. По материалам диссертации опубликовано 13 научных работ. Из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, предложений по практическому использованию результатов исследований, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 160 страницах печатного текста, включает 25 таблиц и 37 рисунков. Список использованной литературы состоит из 146 источников, в том числе 34 на иностранных языках.

Личное участие автора состоит в разработке программы и методики исследований, определении их цели и задач, проведении полевых и лабораторных анализов, обработке и обобщении полученных данных, что позволило сформулировать выводы диссертационной работы и предложения по практическому использованию её результатов.

Работа проводилась в соответствии с планом НИР ФГБНУ Ставропольский НИИСХ в составе задания Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук, Приложение 11, раздел II, пункт 4.

ГЛАВА 1

ОЗИМАЯ ПШЕНИЦА. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА, РАЗВИТИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЯ (обзор литературы)

1.1. Озимая пшеница в Ставропольском крае

Агроклиматические условия Ставропольского края в целом достаточно благоприятны для возделывания озимой пшеницы. Оценка всей территории края показала, что площадь с неблагоприятными и плохими условиями для роста и развития этой культуры составляет 7%, с недостаточно благоприятными – 44%, с удовлетворительными – 34% и хорошими – 15% (Система..., 2013).

В структуре посевных площадей края озимой пшенице принадлежит лидирующее место. В среднем за 2009-2011 гг. из всех зерновых культур, которыми было засеяно 2183,6 тыс. га, она занимала 1747,3 тыс. га. В процентном соотношении удельный вес озимой пшеницы варьирует от 81,9-95,4% в засушливых и до 60,9-61,5% – в районах достаточного увлажнения Ставропольского края (Сельское хозяйство Ставрополя за 2001-2009 гг., 2010; Сельское хозяйство в Ставропольском крае..., 2010-2014 гг.).

В среднем по краю урожайность озимой пшеницы за 2009-2011 гг. составила 33,6 ц/га. Тем не менее, разница по почвенно-климатическим зонам составляет 22,7%. Так в среднем за этот период урожайность озимой пшеницы в зоне неустойчивого увлажнения составила 37,1 ц/га, а в крайне засушливой – 30,2 ц/га.

Продуктивность озимой пшеницы определяется многими факторами, главные из которых – почвенно-климатические условия, предшественники, удобрения, сорт, борьба с сорной растительностью, болезнями и вредителями (таблица 1).

Первичным и базовым фактором в формировании как продуктивности, так качества зерна озимой пшеницы является сорт. Технологические приемы

возделывания, несомненно, оказывающие большое влияние на рост и развитие растений, лишь способствуют в той или иной степени реализации генетического потенциала продуктивности (Ковтун В.И., 2002; Грабовец А.И, Фоменко М.А., 2007; Ерошенко А.А., Ерошенко Ф.В. 2009; Chand, Garg, Pandey, 2009).

Таблица 1 – Доля влияния отдельных приёмов возделывания в урожайности озимой пшеницы (III почвенно-климатическая зона), % (Система..., 2013)

№ п/п	Приёмы	Черноземы	Каштановые почвы
1	Подбор лучших предшественников	12	24
2	Применение удобрений в дозе 60 кг/га д.в. на почвах с низкой обеспеченностью: <ul style="list-style-type: none"> • фосфором • азотом • калием 	14 6 4	12 5 3
3	Посев протравленными семенами	6	5
4	Посев высокопродуктивными адаптивными сортами	13	11
5	Посев высококачественными семенами	6	5
6	Прикатывание при посеве в сухую почву	5	5
7	Применение гербицидов при засоренности посевов сорняками: <ul style="list-style-type: none"> • средней • сильной 	8 14	7 12
8	Применение средств защиты растений <ul style="list-style-type: none"> • фунгицидов • инсектицидов 	8 6	6 5
	ИТОГО	100	100

В настоящее время в сельскохозяйственном производстве Ставропольского края возделываются сорта озимой пшеницы разной интенсивности, что позволяет использовать их с учетом дифференциации районов по почвенно-климатическим зонам, предшественникам, обеспеченности минеральными удобрениями и средствами защиты. Это сорта трех основных групп:

1. **Полуинтенсивного типа** – как правило, высокорослые, для посевов по удобренным непаровым предшественникам с использованием экстенсивных технологий, с возможностью возделывания в экстремальных почвенно-климатических условиях.

2. **Универсального типа** – для возделывания по удобренным лучшим непаровым предшественникам, а также по неудобренным парам с использованием среднеинтенсивных технологий.

3. **Интенсивного типа** – как правило, короткостебельные, полукарлики и карлики. Возделываются по черным и занятым парам, зернобобовым предшественникам. Технологии – интенсивные.

Кроме того, сорта можно разделить еще и на такие группы как **требовательные к агрофону, для ресурсосберегающих технологий, высокоадаптивные, с возможностью поздних сроков сева, сорта-двуручки с коротким периодом яровизации** (Система..., 2013).

Реализация потенциала продуктивности озимой пшеницы происходит в условиях действия тех или иных факторов (рисунок 1), которые в итоге определяют конечный урожай (Шпаар Д.С. и др., 1998).

Главный лимитирующий фактор при возделывании озимой пшеницы на Ставрополье является влагообеспеченность. Поэтому лучшими предшественниками для этой культуры являются такие, после которых остается или накапливается к началу ее посева достаточное количество продуктивной влаги в пахотном слое почвы (Яловой А.В. и др., 2006).

Оптимизация минерального питания – один из наиболее эффективных путей повышения продуктивности и качества зерна озимой пшеницы (Усанова З.И., Сайко В.В., 2011; Кравцова Н.Е., Божков Д.В., 2013; Варламов В.А., Варламова Е.Н., 2013;). Для определения потребности растений в удобрениях проводят почвенную диагностику перед посевом и почвенно-растительную диагностику во время вегетации. На основании полученных результатов дают рекомендации по применению подкормок (форм, сроков и доз).

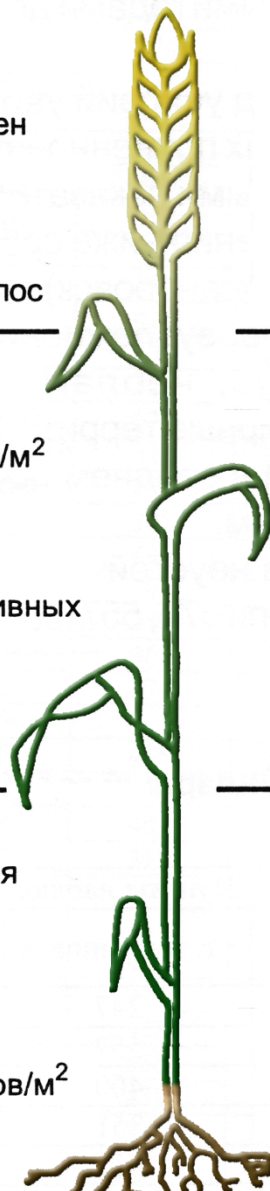
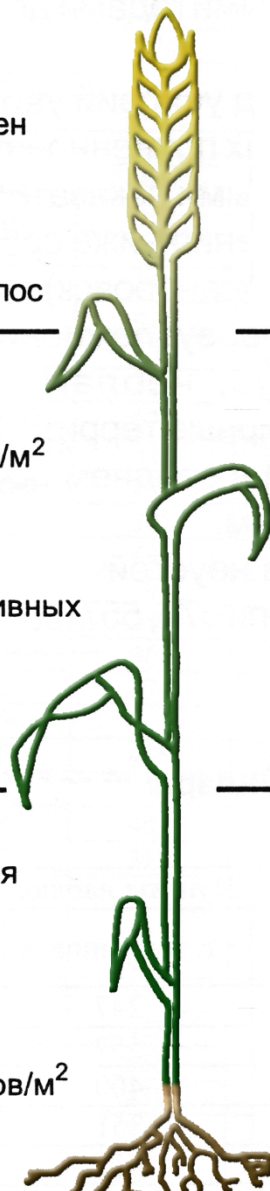
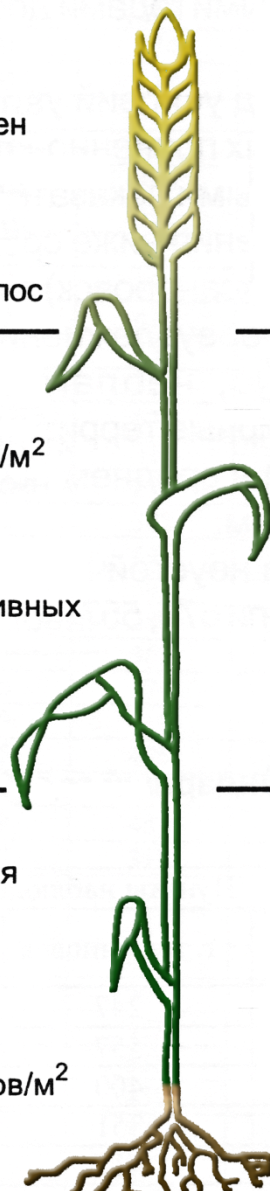
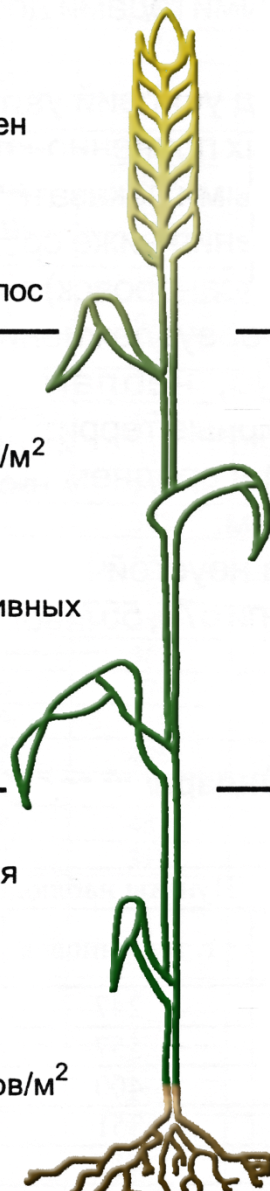
		Компоненты урожая	Отрицательные факторы
Летом		Налив зерна	Болезни и вредители колосьев
		Масса 1000 зерен	Неправильное применение азота
		Размер колоса	Дефицит главных микроэлементов
		Число зерен/колос	Недостаток влаги
Весной		Число колосьев/м ²	Ошибки при внесении питательных веществ, особенно N, болезни листьев и колосьев. Полегание, засорение, вредители. Недостаток влаги
		Число продуктивных стеблей	Неправильное управление посевами, применение азота и регуляторов роста
		Густота стояния посева	Прикорневые, корневые болезни и болезни листьев. Вредители
			Сорняки
Осенью		Число проростков/м ²	Полегание
		Число проростков/м ²	Неправильное внесение азотных удобрений (дозы, сроки)
			Недостаток влаги
		Число проростков/м ²	Ошибки при внесении азотных удобрений
Осенью		Густота стояния посева	Плохое качество семенного материала. Неправильный посев (срок посева, норма высева семян, глубина заделки, ширина междурядий, протравливание семян)
		Число проростков/м ²	Переувлажнение
			Засуха
		Число проростков/м ²	Прикорневые, корневые болезни
			Вредители

Рисунок 1 – Факторы, оказывающие влияние на компоненты урожайности озимой пшеницы (Шпаар Д. и др., 1998)

К сожалению, получение информации о физиологическом состоянии посева и содержании в растениях элементов минерального питания является трудоемким мероприятием, а в силу больших площадей обследования – не всегда достаточно точными. Для этих целей возможно применение оптических методов оценки, которые отличаются объективностью и оперативностью, но пока еще недостаточно разработаны методически (Ерошенко Ф.В., 2014). Поэтому необходимы исследования по выявлению особенностей взаи-

мосвязи данных дистанционного мониторинга посевов с их состоянием, результаты которых можно использовать при составлении рекомендаций по уходным мероприятиям.

Формирование посевов озимой пшеницы зависит от развития вегетативных (корней, стеблей, листьев) и генеративных органов (соцветий, цветков и органов размножения). Ф.М.Куперман в 1984 году установила в развитии растения двенадцать основных этапов органогенеза, на каждом из которых формируются характерные органы растения. В разные фазы развития у растений наблюдаются и разные требования к факторам внешней среды.

I этап органогенеза – прорастание семян. В семени активно развиваются зародышевые органы. Образуется конус нарастания побега, также формируется зародышевая почка. Завершается этап прорастанием семян.

II этап органогенеза – формируется вегетативная сфера. Происходит деление основания конуса нарастания на зачаточные узлы и междоузлия. Так же формируется кустистость взрослого растения.

III этап органогенеза – происходит вытягивание и сегментация конуса, образование верхних листьев. С началом кущения появляются вторичные корни.

IV этап органогенеза – появляются зачатки соцветий и конусов нарастания второго порядка. Происходит развитие нижних междоузлий. Начинается выход в трубку.

V этап органогенеза – образуются и дифференцируются цветки. Происходит закладка тычинок, пестика и покровных органов цветка. Определяется возможное число цветков в колосках.

VI этап органогенеза – формируются пыльниковые мешки, происходит завязь пестика. Растут тычинки и покровные органы цветка.

VII этап органогенеза – завершение формирования пыльцы. Развитие женского гаметофита, выпрямления язычков последнего листа.

VIII этап органогенеза – завершение процесса формирования всех органов соцветий и цветка. Начинается этап колошения у озимой пшеницы.

IX этап органогенеза – процесс цветения, оплодотворения, образования зиготы. Заканчивается рост стебля и междоузлий.

X этап органогенеза – процесс формирования зерновки. К концу этапа зерновки достигают типичной для сорта длины.

XI этап органогенеза – процесс налива зерна, идет рост зерновок в толщину и ширину. Фаза молочного и тестообразного состояния.

XII этап органогенеза – фаза восковой и полной спелости. Накопленные питательные вещества превращаются в запасные.

Таким образом, этапы органогенеза – это периоды роста и развития, характеризующиеся образованием определенных органов растений и проявлением их соответствующего физиологического состояния. Практически на каждом из них, прямо или опосредованно, создается существенная, и порой не восполняемая на других этапах, часть конечной продуктивности.

Знание фаз развития или этапов органогенеза дает возможность с большей эффективностью применять основные элементы технологии возделывания озимой пшеницы, так как в этом случае они направлены на оптимизацию минерального питания, сохранение влаги, повышение иммунитета и защиту растений в те периоды роста и развития, когда посеvy наиболее остро нуждаются в них.

Продолжительность этапов органогенеза и время их наступления очень сильно зависит от условий выращивания (Петрова Л.Н., и др., 2009). Вклад погодных, сортовых и технологических факторов может составлять до 15-20 дней как в дате начала, так и в длительности фаз роста и развития растений озимой пшеницы. Поэтому при оценке состояния посевов, взятии образцов на лабораторные анализы и пр., необходимо строго придерживаться этапов органогенеза. Это важно еще и потому, что они определяют дату образования органов растений, влияние которых в той или иной степени определяют величину урожая (рисунок 2).

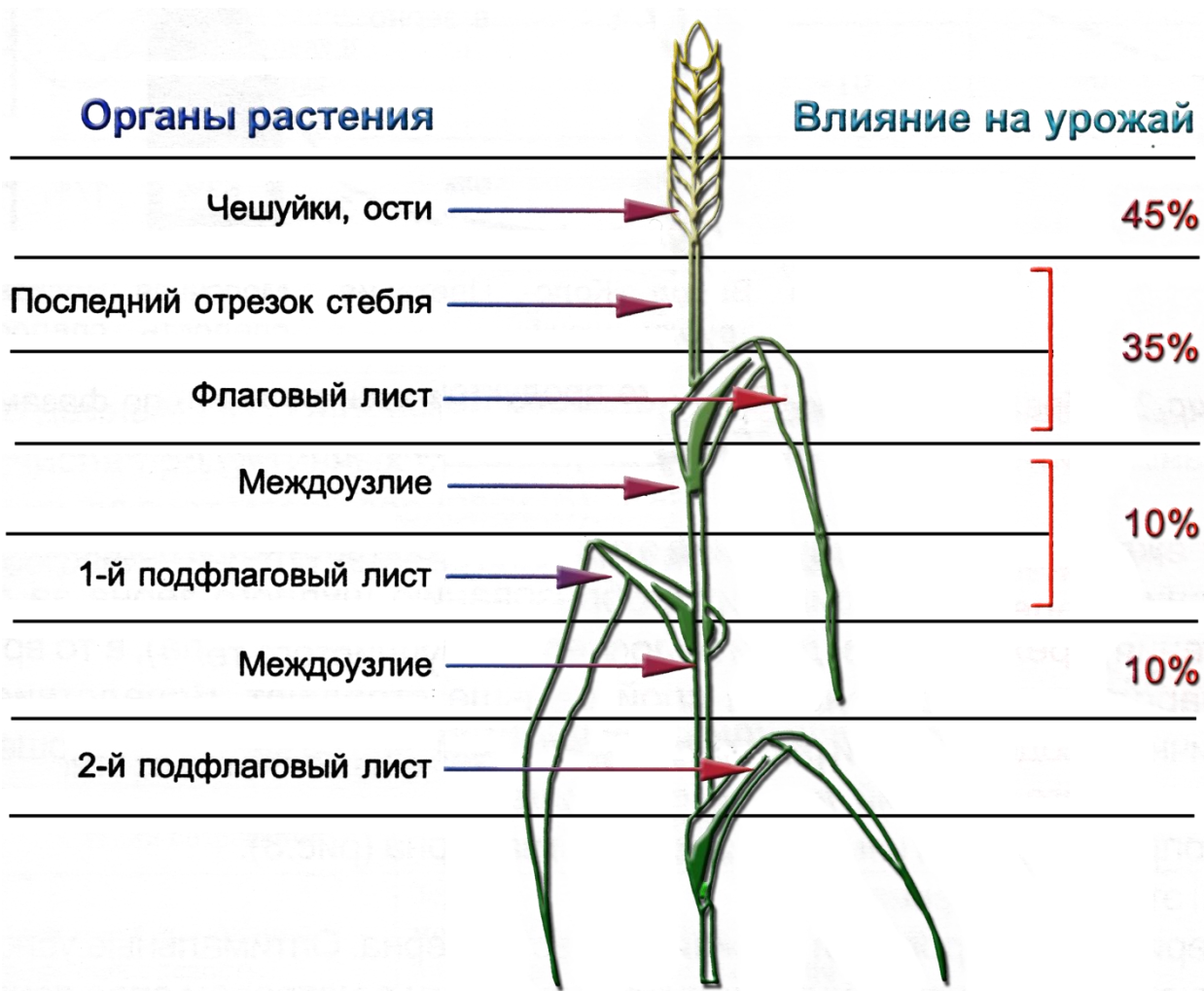


Рисунок 2 – Влияние отдельных органов растений на урожайность озимой пшеницы (Шпаар Д. и др., 1998).

Таким образом, озимая пшеница является основной зерновой культурой Ставропольского края. Её продуктивность определяется с одной стороны генотипом, а с другой – условиями выращивания, влияние которых на продукционный процесс существенно и происходит в течение всего периода роста и развития растений.

1.2. Фотосинтетическая продуктивность растений

Ведущая роль в формировании как общего урожая растений, так и хозяйственно ценной его части, принадлежит фотосинтезу (Rosati, Dejong, 2003; Roleda, 2008). основополагающие закономерности, позволяющие дать теоретическое обоснование получения высоких урожаев через оптимизацию

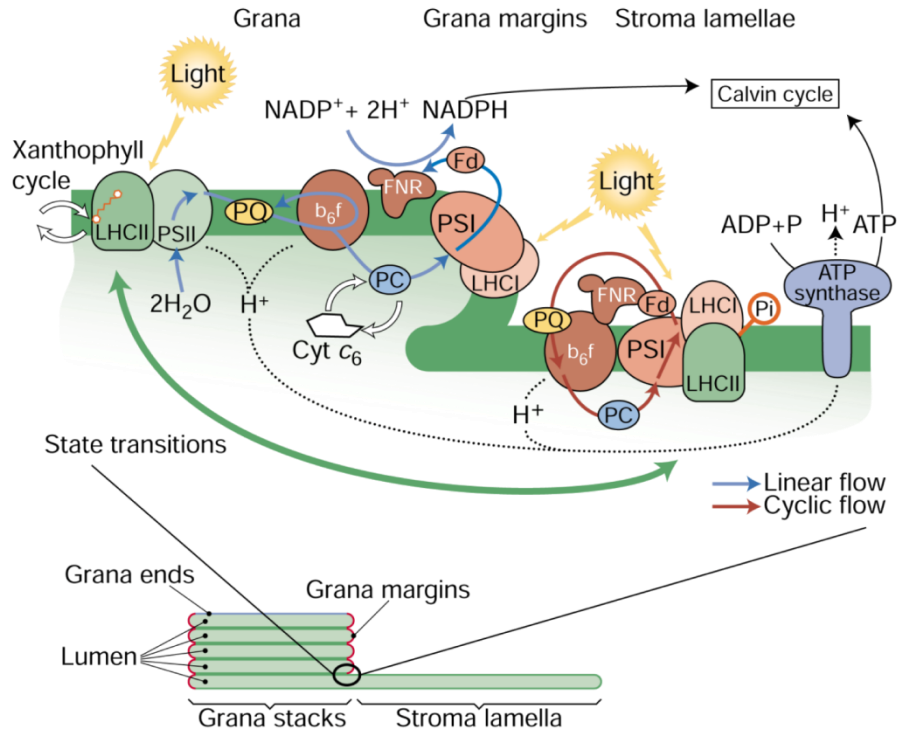
этого процесса в определенных условиях выращивания, легли в основу теории фотосинтетической продуктивности, которая была представлена А.А.Ничипоровичем на IX Тимирязевских чтениях в 1954 году. Свое развитие она нашла в работах российских и зарубежных исследователей (Rawson Н.М., Evans L.T., 1971; Loomis R.S. et al, 1971; Joshida S., 1972; Sabo M., 2002; Чиков В.И, 2008; Мокроносков А.Т., и др. 2006; Нешин И.В. и др. 2008).

Фотосинтез посева (ценоза) определяется суммой процессов ассимиляции отдельных растений или побегов, происходящих в условиях, которые создаются в результате их взаимодействия друг с другом, и проявляется конкуренция за свет, минеральное питание, CO_2 , и влагу (Гергокаев Д.А. и др., 2007, Ерошенко А.А. и др., 2013).

Фотосинтез высших растений происходит в хлоропластах, в которых располагаются тилакоидные мембраны (ламеллы) со структурно организованной частью ассимиляционного аппарата, который ответственен за поглощение световой энергии и преобразование её в стабильных химических связях высокоэнергетических соединений АТФ и НАДФН⁺ (рисунок 3). Непосредственная фиксация углекислого газа и образование первичных органических соединений (глюкоза, фруктоза) с использованием энергии, запасенной фотохимическими реакциями (цикле Кальвина), происходит в строме хлоропластов. Эти органические соединения называются ассимилятами (Чиков В.И., 1987). Они используются непосредственно в месте, где были синтезированы, или могут транспортироваться в корневую систему, зерновки и другие органы растения. Образованные в первичных процессах фотосинтеза АТФ и НАДФН⁺, кроме цикла Кальвина, обеспечивают энергией и такие процессы как восстановление нитратов, сульфатов, биосинтез белка, липидов и др.

Таким образом, количество органического вещества, созданного в ходе фотосинтетических реакций и запасенного растением в виде биомассы, определяется с одной стороны скоростью реакций, а с другой – количеством центров, в которых эти реакции происходят (активностью процессов фотосинтеза и размером ассимиляционного аппарата).

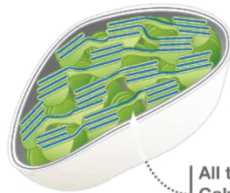
Световая стадия фотосинтеза (первичные процессы)



Тилакоидные мембраны, (Finazzi et al., 2003). Дизайнер –Николас Роггли, Женевский университет, Швейцария

Темновая стадия фотосинтеза (Цикл Кальвина)

(a) The Calvin cycle has three phases.

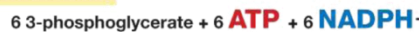


All three phases of the Calvin cycle take place in the stroma of chloroplasts

1. Fixation



2. Reduction

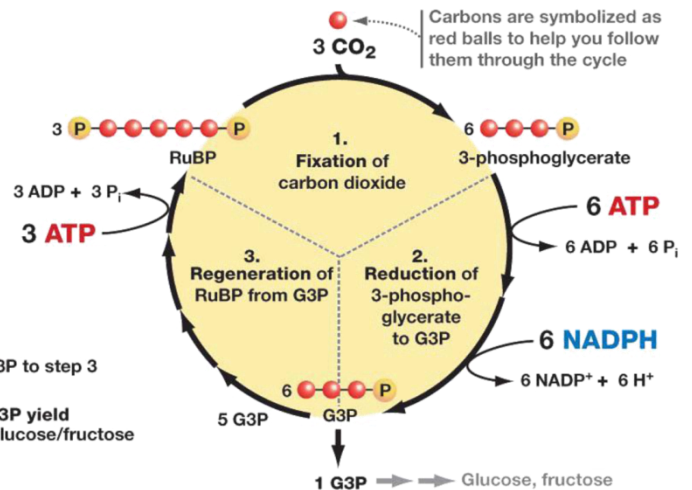


3. Regeneration



© 2011 Pearson Education, Inc.

(b) The reaction occurs in a cycle.



(BIOS 100 Lecture Material Online, Summer, 2010, Department of Biological Sciences The University of Illinois at Chicago) <http://www.uic.edu/classes/bios/bios100/summer2010/index.htm>.

Рисунок 3 – Фотосинтез высших растений (световая и темновая стадии)

Фотосинтетическая активность зависит от потребностей растений в ассимилятах (донорно-акцепторные отношения) и условий окружающей среды

(температура, водообеспеченность, минеральное питание, инсоляция, вентируемость посева и пр.). Эти же факторы оказывают влияние и на формирование размеров ассимиляционного аппарата, только реакция ростовых процессов на них несколько слабее и проявляется со значительным запозданием во времени (Федулов Ю.П., Подушин Ю.В., 2009).

Считалось, что основным фотосинтезирующим органом злаковых растений, в частности озимой пшеницы, является лист. Была установлена зависимость между урожаем и площадью листовой поверхности. Размеры листового аппарата характеризуют таким показателем, как «листовый индекс». Он определяется как отношение площади листовой поверхности к площади посева (Подушин Ю.В. и др., 2009).

При дальнейшем развитии учения о фотосинтезе был установлен значительный вклад в фотосинтез растений озимой пшеницы нелистовых органов: стебель, листовые влагалища, элементы колоса (Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А., 2000). Поэтому размеры ассимиляционного аппарата стали характеризовать общей площадью фотосинтезирующих органов, у которой проявлялась более тесная связь с продуктивностью, чем у листового индекса.

Для продуктивности растений большое значение имеет не только размеры фотосинтетического аппарата, но и продолжительность его функционирования (Ракоца Э.Ю. и др., 2006; Мартемьянова А.А. и др., 2007; Нешин И.В. и др., 2008; Ермакова Н.В. и др., 2008; Пигорев И.Я., 2008; Barigah T. et al., 1994; Leakey A. et al., 2006; Roleda, Mohlin, Pattanaik, 2008). Кумаков В.А. предложил показатель, который отражает вклад всех органов растения в размеры фотосинтетического аппарата за время его активной работы – ***поверхностный фотосинтетический потенциал (ПФСП)***.

Исследователями было показано, что доля участия различных органов растений в фотопотенциале озимой пшеницы зависит не только от условий выращивания, но и от генотипа (Хотулев В.Я., 1985). Так у высокорослых сортов большую роль в фотосинтезе растения играют стебли, в отличие от низкорослых, у которых она существенно ниже. В среднем же по сортам,

технологиям и годам вклад листовых пластинок в общий поверхностный потенциал составляет около 50%. Остальные 50% распределяются между стеблями с влагалищами листьев и колосьями (Ерошенко Ф.В., 2011).

Тот факт, что различные органы содержат не одинаковое количество хлорофилла – основного пигмента, участвующего в процессах фотосинтеза, позволил в качестве характеристики размеров ассимиляционного аппарата использовать его количество в растениях (Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А., 2000).

Использование содержания хлорофилла как исходных данных о размере ассимиляционного аппарата значительно повысило взаимосвязь между показателями фотосинтетической продуктивности и урожайностью растений сельскохозяйственных культур (Хотулев В.Я., 1985; Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А., 2000; Дуденко Н.В., 2001). Наиболее распространенный среди таких показателей – *хлорофилловый фотосинтетический потенциал (ХФСП)*, который характеризует количество зеленых пигментов квадратного метра посева и времени его активной работы в течение вегетации.

Для определения количества хлорофилла в растениях используют различные методы: например, *колориметрический или спектрометрический* (Сахарова, 1969), который позволяет определить суммарное количество хлорофиллов *a* и *b* с помощью фотоэлектроколориметра. Сначала производится экстракция зеленых пигментов, в качестве растворителя используется этиловый спирт. Далее определяется оптическая плотность полученного раствора, а содержание хлорофилла рассчитывается с помощью калибровочной кривой, используя уравнения Витермана и Де Мотса. Существенный недостаток такого метода – это разрушение органов растений.

Бенедиктом и Сундлером был разработан оптический метод определения количества хлорофилла (Benedict, Swidler, 1961). Они установили, что наиболее тесная корреляционная связь между коэффициентом поглощения света и содержанием зеленых пигментов в растениях наблюдается при длине

волны 625 нм. Достоинством такого метода является сохранение растений живыми.

Дальнейшее развитие методов определения содержания хлорофилла в растениях без их разрушения основывалось на изучении закономерностей, связанных с отраженной солнечной энергии от ценоза.

С развитием аэрокосмических методов зондирования Земли большой интерес стала представлять оценка содержания хлорофилла в посевах *дистанционным методом*. Для чего исследователи используют такой показатель, как коэффициент спектральной яркости (Андриянова Ю.Е., Тарчевский И.А., 2000).

Существует два подхода к определению количества хлорофилла по оптическим характеристикам, полученных дистанционно (Кондратьева К.Я., Федченко П.П., 1981):

1. с использованием коэффициентов отражения одного или нескольких каналов;
2. определение содержания хлорофилла по координатам цвета, когда снимается спектр всей видимой области электромагнитных волн.

Таким образом, литературные данные свидетельствуют о том, что показатели фотосинтетической продуктивности, связанные с содержанием хлорофилла в растениях, наиболее точно отражают их состояние и развитие, а также характеризуются тесной корреляционной связью с продуктивностью посевов.

Поэтому встает необходимость разработки методов, позволяющих оперативно и достоверно оценить содержание зеленых пигментов в посевах. Существующие лабораторные методы трудоемки, к тому же их результаты порой трудно отнести ко всему полю из-за больших его размеров и не выравненности. Дистанционные методы позволяют решить такие задачи, но, к сожалению, они не достаточно разработаны как технически, так и методически. К тому же в литературе практически отсутствует теоретическая основа

механизмов взаимосвязи данных дистанционного мониторинга с физиологическим состоянием растений и их структурной организацией в посеве.

Структурная организация посева – важный фактор его радиационного режима (Росс Ю.К., 1975; Росс Ю.К. и др., 1988). Для озимой пшеницы она определяется высотой растений, стеблестоем, ориентацией листьев в пространстве, а также площадью ассимиляционной поверхности и содержанием хлорофилла (Петрова Л.Н., Ерошенко Ф.В., 2006). Эти характеристики зависят от генотипа, технологии выращивания и условий окружающей среды.

Современные сорта озимой пшеницы создают саморегулирующиеся посевы. При использовании интенсивной технологии возделывания размеры листовой поверхности у таких сортов не превышают оптимальных. Это происходит из-за того, что листовые пластинки у них узкие, короткие и, как правило, вертикально ориентированы (Подушин Ю.В. и др., 2009). Вертикальная ориентация листьев обеспечивает более равномерное распределение солнечной радиации в посевах, и, такие сорта характеризуются более высокой чистой продуктивностью фотосинтеза, а также коэффициентом хозяйственной эффективности. В разреженном и низком посевах преимущество имеют растения с горизонтальным расположением листьев (Росс Ю.К., 1975).

Регулировать количество солнечной радиации, поглощаемой различными ярусами листьев, можно с помощью густоты стояния растений, которая зависит от факторов окружающей среды и нормы высева (Кудряшов И.Н., и др. 2006). Зависимость урожайности от количества стеблей имеет несколько фаз (Мельник А.Ф. и др. 2007). Так, с увеличением стеблестоя урожайность возрастает до определенного момента, после чего начинается взаимодействие растений, которое проявляется в снижении продуктивности по сравнению с таким же количеством растений незагущенного посева.

Солнечная радиация, используется растительным организмом всего на 2-3%. В то же время теоретически возможными являются 19-20% (Мокроносов А.Т. и др., 2006). Применение агротехнических и селекционных мероприятий позволяет формировать посевы с оптимальной структурой. Погло-

шенная фотосинтетическая активная радиация (ФАР) таких посевов усваивается на 7-8 и даже на 10% (Петрова Л.Н., Ерошенко Ф.В., 2006; Шукуров Р., 2007).

Таким образом, посев озимой пшеницы – структурно организованная система, определяющаяся его архитектурой и позволяющая создавать определенный радиационный режим. Следовательно, каждый посев обладает своими оптико-биологическими свойствами, которые можно использовать для оценки состояния растений.

1.3. Роль азота в формировании урожая и качества зерна озимой пшеницы

Продуктивность озимой пшеницы в значительной мере зависит от обеспеченности растений элементами минерального питания на протяжении всего периода роста и развития растений. Немаловажное значение при этом имеет не только достаточное количество питательных веществ, но и их сбалансированность. По данным Людмилы Николаевны Петровой (1973) при урожайности 60 ц/га растения озимой пшеницы различных сортов потребляли 195-244 кг/га азота, 51-70 кг/га фосфора и 160-179 кг/га калия. Автор делает вывод о том, что питание растений должно обеспечивать их возможность потреблять, а так же накапливать в органах питательные элементы в определенном соотношении. Так для озимой пшеницы соотношение азота к фосфору равное 5/1 является оптимальным для роста, развития и формирования урожая зерна хорошего качества (Петрова Л.Н., 1971).

Следовательно, растения озимой пшеницы наиболее чувствительны к условиям азотного питания. Недостаток этого элемента отражается не только на урожае, но и его качестве (Кравченко В.Н., Тукабаева А.И. 2006; Гергокаев Д.А. и др., 2007; Нешин И.В. и др., 2008; Пома Н.Г. и др., 2009). Азот входит в состав всех белковых соединений, что делает его крайне необходимым для всех живых организмов, в том числе и растений.

Применение азотных подкормок влияет как на размеры, так и на активность фотосинтетического аппарата, которое в зависимости от способов, времени и доз могут действовать неодинаково на растительный организм (Квасов Н.А. и др., 1991; Петрова Л.Н. и др., 2002; Никитишен В.И. и др., 2007; Жердецкий И.Н., 2010; Хамидуллина Л.А. и др., 2011). Так выращивание озимой пшеницы на полупаровом предшественнике (озимая пшеница) и на удобренном фоне ($N_{60}P_{60}K_{60}$ при посеве + N_{30} ранней весной) способствует увеличению как площади ассимиляционного аппарата, так и количества хлорофилла в растениях, по сравнению с контрольным вариантом (Ерошенко Ф.В. и др., 2002). В то же время автор отмечает снижение у них активности фотосинтетического аппарата, о чем свидетельствует уменьшение и выхода замедленной флуоресценции, и чистой продуктивности фотосинтеза посевов (ЧПФ). С другой стороны, в опытах Бархотовой О.А. с соавторами (2007) поздние некорневые азотные подкормки способствовали не только повышению количества зеленых пигментов в органах растений озимой пшеницы, но и усиливали активность фотосинтетического аппарата. Этот эффект значительно усиливался при совместном применении азотных удобрений и физиологически активных веществ.

На основе установленных закономерностей минерального питания растений озимой пшеницы разработаны критерии оценки потребностей в дополнительных удобрительных средствах в течение вегетации для оптимизации процессов поглощения, перераспределения по органам и накопления азотистых веществ в конечном урожае (Кулинцев В.В. и др., 2013; Кулинцев В.В., Дуденко Н.В., и др., 2014).

Обеспечение азотом растений озимой пшеницы в генеративный период роста и развития – необходимое условие формирования урожая зерна и его качества. В это время происходит формирование зерновки, её заполнение органическими соединениями и синтез запасных веществ (Петров Н.Ю., Онищенко Н.С., 2012). Условия окружающей среды оказывают большое влияние на этот процесс. Высокие температуры ускоряют созревание зерна (в сред-

нем на 8 дней), а низкие – замедляют (до 40-43 дней). Недостаток влаги и высокая температура воздуха могут прерывать процесс синтеза и накопления запасных веществ в любой момент формирования зерна (Балашов В.В., Агафонов А.К., 2011). С другой стороны, умеренное повышение температуры воздуха на XI этапе органогенеза способствует усилению накопления азота в зерне озимой пшеницы. Кроме того, в этом случае происходит ускорение процессов нитрификации в почве, что способствует улучшению азотного режима растений, что положительно сказывается на качестве зерна, так как дефицит доступного азота в почве – главная причина снижения его белковости (Громов А.А., Щукин В.Б., 2004)

Обильные осадки и переувлажнение почвы в генеративный период уменьшают количество белка в зерне (Кожоков М.Х. и др., 2006). Тем не менее, если не происходит вымывание азота, и нет торможения его накопления, то умеренная оводненность растений с достаточно хорошими условиями питания, способствуют повышению белковости зерна.

В литературе встречаются данные, свидетельствующие о том, что содержание азота в растениях коррелирует с данными дистанционного зондирования Земли, в частности с NDVI (Raz M. et al., 2002; Ferwerda J.G. et al., 2005; Reyniers M., Vrindts E., 2006; Doiron M. et al., 2013). К сожалению, таких работ крайне мало, а в Ставропольском крае они не проводились вовсе.

Таким образом, необходимость контроля потребности озимой пшеницы в азотном питании на протяжении всего периода роста и развития растений – важная задача, решение которой позволяет своевременно принимать решения по корректировке технологии выращивания этой культуры для получения стабильных и высоких урожаев качественного зерна. К сожалению, существующие способы определения содержания азота в растениях очень трудоемки и требуют лабораторных анализов. Поэтому необходимы научные изыскания по разработке методов оперативного и объективного мониторинга обеспеченности посевов этим элементом минерального питания.

1.4. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса в сельском хозяйстве

Проблема повышения устойчивости зернового производства является ключевой в сельском хозяйстве. Один из перспективных путей её решения – это построение автоматизированных систем, позволяющих принимать решения в аграрном секторе на основе объективной информации, в том числе, полученной с помощью спутников (Повх В.И. и др., 2006; Муратова Н.Р., Терехов А.Г. 2007; Барталев С.А. и др., 2008; Лупян Е.А., и др., 2011; Куссуль Н.Н., и др. 2012; Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В., 2014).

К задачам космического мониторинга в агропромышленном комплексе можно отнести:

- точное определение границ, инвентаризация;
- картографирование севооборотов;
- выявление неиспользуемых земель;
- определение участков деградации (эрозии, засоленности, опустынивания, засухи);
- создание почвенных карт;
- обнаружение незаконного использования территории;
- наблюдение за состоянием сельскохозяйственных посевов на различных этапах роста и развития;
- мониторинг мелиоративных и гидротехнических объектов;
- установление неоднородностей посевов сельскохозяйственных культур;
- мониторинг лесов;
- выявление лесных пожаров и прочие.

Одним из основных преимуществ данных спутникового мониторинга, является их оперативность, когда получение снимков возможно несколько раз в сутки. Кроме того такие данные отличаются объективностью – инфор-

мация, полученная по космоснимкам, показывает действительное состояние исследуемых объектов (Лупян Е.А. и др., 2004).

Данные дистанционного зондирования Земли широко используются для контроля лесных массивов (Егоров В.А., и др. 2006). На основе спутникового мониторинга разработана система, позволяющая дать оценку таких параметров как возраст, биомасса, распространение и гибель лесного покрова (Терехин Э.А. и др., 2012). Это особенно важно для контроля состояния территориальных экосистем.

В институте космических исследований Российской Академии наук разработана информационная система мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз), которая производит сбор и предоставление информации о лесных пожарах, и их последствиях (Барталев С.А. и др., 2008).

Использование аэрокосмических методов при инвентаризации земель сокращает материальные затраты, позволяет оперативно выполнить поставленные задачи, значительно повышает качество и точность определения местонахождения объектов по координатам, что особенно важно на больших территориях проведения исследований (Кулик К.Н. и др., 2009).

Еще одно направление использования ДЗЗ – это выявление эрозионных процессов, заболачивания, засоленности, а так же опустынивания сельскохозяйственных угодий (Курочкина Л.Я. Кокарева А.Л., 2007; Залибекова М.З. и др., 2011; Морковкин Г.Г. и др. 2014). Чем выше пространственное разрешение снимков, тем более четко проявляются такие явления. По данным дистанционного зондирования Земли возможно регулярное отслеживание состояния сельскохозяйственных угодий и интенсивности развития эрозии, что позволяет быстро и оперативно разрабатывать и принять комплекс профилактических мероприятий (Ведешин Л.А., и др., 2011).

Данные дистанционного зондирования Земли представляют собой космоснимки в различных участках спектра электромагнитных волн (каналы), что позволяет на их основе разрабатывать и применять показатели, представ-

ляющие собой определенные математические соотношения между такими данными. Эти показатели называются **вегетационными индексами (ВИ)**. В настоящее время существует около 160 ВИ, но наиболее активно используются всего несколько из них (Дубинин М., 2006). Вегетационные индексы подбираются экспериментально, исходя из особенностей спектральной отражательной способности растительности и почв (Черепанов А.С., 2011). Чаще всего при расчетах используют коэффициенты спектральной яркости (**КСЯ**) в красной (**RED**) и в ближней инфракрасной (**NIR**) областях спектра электромагнитных волн.

- *Относительный вегетационный индекс (Ratio VI):*

$$RVI = \frac{NIR}{RED}$$

Впервые описан Jordan в 1969 году;

- *Усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index, EVI):*

$$EVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + C1 * RED - C2 - BIUE + L} \right) * (1 + L)$$

Впервые описан Rouse B.J. с соавторами в 1973 году;

- *Инфракрасный вегетационный индекс (Infrared Percentage VI, IPVI):*

$$IPVI = \left(\frac{NIR}{NIR + RED} \right) = \left(\frac{NDVI + 1}{2} \right)$$

Впервые описан Crippen R.E. в 1990г;

- *Разностный вегетационный индекс (Difference VI, DVI):*

$$DVI = (NIR - RED)$$

Первые упоминания у Lillesand and Kiefer в 1987 году, описан как отдельный вегетационный индекс ВИ Richardson и Averitt в 1992 году;

- *Перпендикулярный вегетационный индекс (Perpendicular Vegetation Index (PVI)):*

$$PVI = (\sin(a) * NIR - \cos(a) * RED)$$

где a – угол между почвенной линией и осью NIR.

Впервые описан Richardson и Wiegand в 1977 году;

- *Взвешенный разностный вегетационный индекс (Weighted Difference VI, WDVI):*

$$WDVI = NIR - \rho * RED$$

где ρ – наклон почвенной линии.

Впервые описан Clavers в 1988 году;

- *Трансформированный вегетационный индекс (Transformed Vegetation Index TVI):*

$$TVI = \sqrt{NDVI + 0.5}$$

Впервые описан Tucker C.J. с соавторами в 1979 году;

- *Почвенный вегетационный индекс (Soil Adjusted VI, SAVI):*

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L}$$

где $L=0$ для густого растительного покрова, $L=1$ – для очень разреженного.

Впервые описан Huete в 1988 году;

- *Модифицированный почвенный вегетационный индекс (Modified Soil Adjusted VI, MSAVI):*

$$MSAVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \right) * (1 + L)$$

где $L = 1 - 2 * S * NDVI * WDVI$

s – наклон почвенной линии

Впервые описан Qi J. с соавторами в 1994 году;

- *Трансформированный почвенный вегетационный индекс (Transformed Soil Adjusted VI, TSAVI) Индекс глобального мониторинга окружающей среды (Global Environmental Monitoring Index, GEMI):*

$$TSAVI = \left(\frac{s * (NIR - s * RED - a)}{a * NIR + RED - a * s + x(1 + s^2)} \right)$$

где a – координата пересечения почвенной линии с NIR, s – наклон почвенной линии, x – коэффициент коррекции.

Впервые описан Baret F. с соавторами в 1989 году;

- *Вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы (Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI):*

$$ARVI = \left(\frac{NIR - Rb}{NIR + Rb} \right)$$

$$Rb = RED - a(RED - BLUE)$$

$a=1$, при малом покрытии растительности $a=0,5$.

Впервые описан: Kaufman, Y.J., Tanre, D., 1992;

- *Почвенный вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index (SARVI)):*

$$SARVI = \left(\frac{NIR - p * Rb}{NIR + p * Rb} \right)$$

$$p * Rb = RED - \gamma(BLUE - Red)$$

Впервые описан Huete A.R. и Liu H. в 1994 году;

- *Нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI):*

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Впервые описан Rouse B.J. с соавторами в 1973 году, его концепция впервые представлена Kriegler с соавторами в 1969 году;

Вегетационный индекс NDVI – наиболее популярен и часто используется. Для растительности он принимает положительные значения, и чем больше зеленая биомасса, тем он выше (Дубинин М., 2002; Шуркина А.И. и др. 2007).

Считается, что NDVI должен быть взаимосвязан и с содержанием хлорофилла, и с площадью ассимиляционной поверхности растений, так как при его расчетах используются коэффициенты отражения в красной и ближней инфракрасной областях спектра электромагнитных волн, потому что в **RED** области находится максимум поглощения зеленых пигментов, а в **NIR** – максимум отражения структурных элементов органов растений (Шуркина А.И., и др. 2007).

Ученые из Японии при изучении сезонных изменений некоторых физиологических показателей роши японского бука и характеристик её спектра поглощения установили (Kodani E., et al., 2002), что содержание хлорофилла коррелирует с коэффициентом отражения в красной области, а индекс листовой поверхности (ИЛП) – в инфракрасной.

Вегетационный индекс NDVI используется для распознавания сельскохозяйственных культур. Для этого изучается его динамика в онтогенезе, выявляются специфичные участки, характерные только для выбранного вида растений. Так в литературе имеются данные о проведении исследований в этой области по таким культурам как рапс, ячмень, кукуруза, картофель, рис, многолетние травы, а так же овес (Брыксин В.М., Евтюшин А.В., 2005; Шевырногов А.П. и др., 2007; Кузнецов К.В., Липилин Д.А., 2012; Новохатин В.В., Чубарева И.С., 2013; Терехин Э.А., 2014). Были изучены спектрально-отражательные свойства их посевов для различных каналов и построены соответствующие динамики NDVI.

Еще одним направлением использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса является определения наступления засухи, выявление территории на которых распространено это явление, что позволяет более точно рассчитать материальный ущерб, нанесенный сельскохозяйственному производству. Такие исследования ведутся в Казахстане, ученые оперативно выявляют деградационные процессы, используя вегетационный индекс NDVI, а так же информацию наземных наблюдений: температура воздуха, влажность почвы, количество выпавших осадков, состояния посевов (Муратова Н.Р., Терехов А.Г. 2007).

Урожайность сельскохозяйственных культур является важным показателем эффективности сельскохозяйственного производства. Именно поэтому прогнозирование зерновой продуктивности является важным направлением исследований с использованием данных дистанционного зондирования Земли (Брыскин В.М., и др., 2010; Майорова В.И. и др., 2013).

Существуют различные подходы к прогнозированию урожайности: оценка состояния полей по вегетационным индексам, статистическая обработка результатов мониторинга, поиск года-аналога, построение моделей роста и регрессионных зависимостей продуктивности от вегетационных индексов (Chipanshi A.C. et al., 1999; Maselli F., Rembold F., 2001; Wall L. et al., 2007; Муратова Н.Р., Терехов А.Г., 2007; Савин И.Ю., и др., 2011; Куссуль Н.Н. и др., 2012; Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В., 2014). При построении регрессионных моделей в качестве данных ДЗЗ используют вегетационный индекс NDVI. Авторы отмечают, что этот показатель зависит от сроков сева, состояния растений на различных этапах роста и развития и метеорологических данных.

Проведенные исследования в различных регионах Российской Федерации, а так же Украины и Казахстана свидетельствуют о том, что регрессионные модели урожайности сильно зависят от почвенно-климатических условий, а, следовательно, их распространение на другие регионы не корректны. К сожалению подобных работ крайне мало, а для территории Ставропольского края они вообще отсутствуют.

Спутниковые снимки для любой территории с определенным пространственным разрешением можно скачать в сети интернета, так как они находятся в свободном доступе на сайтах соответствующих организаций (например, <http://earthexplorer.usgs.gov/> и <http://glovis.usgs.gov/>). В зависимости от задач, решаемых с использованием данных ДЗЗ, такие снимки, как правило, нуждаются в обработке: устранение шумов, оцифровка территории, расчет вегетационных индексов и т.д.. С этой точки зрения очень удобен сервис «ВЕГА» разработанный в Институте космических исследований Российской академии наук, с помощью которого возможно оперативное получение информации мониторинга состояния растительности на всей территории России, Украины, Белоруссии и Казахстана. Этот сервис позволяет работать, как с архивными однородными и очищенными данными (более чем за десятилетний период), так и с оперативной информацией (ежедневное обновле-

ние). Анализ осуществляется как для региона, района, полигона, так и заданной точки. Для отдельных полей, после задания их координат, пользователь может получить следующую информацию: тип возделываемой культуры, ход вегетационного индекса NDVI, а так же ежедневные метеоданные (Лупян Е.А., и др., 2011; Толпин В.А., и др., 2011).

Таким образом, необходимы исследования, позволяющие разработать новые и усовершенствовать существующие способы мониторинга состояния растений и оценки их продуктивности с использованием оперативной и объективной информации, которая может быть получена на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса, для составления более точных рекомендаций по уходным мероприятиям за посевами сельскохозяйственных культур.

ГЛАВА 2

УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Общие условия и характеристика территории Ставропольского края

Диссертационная работа выполнена в ФГБНУ Ставропольский НИИ сельского хозяйства в период с 2011 по 2014 годы. Объектами исследований были посевы озимой пшеницы различных административно-территориальных единиц Ставропольского края – район, почвенно-климатическая зона, край в целом. Анализ проводили за период 2003-2014гг.

При изучении взаимосвязи данных дистанционного зондирования Земли с фотосинтетической продуктивностью растений в качестве объектов исследований были взяты поля производственных посевов озимой пшеницы СНИИСХ (таблица 2).

Ставропольский край по рельефу может быть разделен на Пятигорский вулканический район, Ставропольскую возвышенность, Манычскую впадина, Терско-Кумскую низменность. Территория характеризуется разнообразием почвенно-климатических условий и сменой ландшафтов от лесостепей на западе до полупустынь на северо-востоке (Шальнев В.А., 1995).

Наиболее распространенными на территории края являются черноземы и каштановые почвы. Первые в основном располагаются в западной части и занимают около 38 % территории, а вторые – в восточной и занимают около 43% (Куприченков М.Т., 2005).

Содержание гумуса в почве убывает с юго-запада на северо-восток края и в среднем по краю его величина составляет 2,69%. Черноземные почвы имеют высокий и средний уровень валового азота, а каштановые – низкий и очень низкий.

Пашни Ставропольского края с низким, средним и высоким содержанием подвижного фосфора занимают 32,4%, 50,7% и 16,9% соответственно.

Содержание обменного калия со средними и высокими значениями составляет 96,4% от всей территории края.

Таблица 2 – Производственные посевы озимой пшеницы СНИИСХ

Поле	Площадь, га	Сорт	Предшественник
2012 год			
Поле №1	40,0	Ксения	Озимый рапс
Поле №2	75,0	Скарбница	Пар
Поле №3	25,9	Украинка одесская	Озимая пшеница
Поле №4	23,0	Селянка одесская	Горох
Поле №5	60,0	Багира	Пар
Поле №6	30,0	Березит	Озимый рапс
Поле №7	88,0	Украинка одесская	Многолетние травы
2013 год			
Поле №1	10,0	Полевик	Горох
Поле №2	10,0	Казачий атаман	Горох
Поле №3	25,0	Багира	Пар
Поле №4	8,9	Одесская 200	Соя
Поле №5	12,6	Одесская 200	Пар
Поле №6	65,0	Зустрич	Пар
Поле №7	63,0	Писанка	Соя
Поле №8	35,0	Скарбница	Пар
2014 год			
Поле №1	68,7	Писанка	Озимый рапс
Поле №2	25,0	Скарбница	Пар
Поле №3	5,6	Одесская 200	Горох
Поле №4	11,2	Одесская 200	Горох
Поле №5	5,1	Одесская 200	Горох
Поле №6	8,4	Одесская 200	Горох
Поле №7	18,5	Одесская 200	Многолетние травы
Поле №8	47,5	Пилипенко	Горох
Поле №9	63,5	Скарбница	Пар
Поле №10	43,3	Украинка одесская	Озимая пшеница

Географическое положение определяет своеобразие и неоднородность климата. Среднегодовая температура воздуха составляет +10.4°C. На северо-западе и юго-востоке края отмечаются наибольшие значения этого показате-

ля – 11,2°C. Наименьшее его значение наблюдается в районе предгорий – менее +9°C. Самый холодный месяц – январь, среднемесячная температура которого -1,9°C (в зависимости от метеостанции эти значения колеблются от -0,7°C до -2,4°C). Самый теплый месяц – июль со средней температурой равной +23,5°C и колебаниями от 18,7°C до 25°C.

Сумма активных температур выше 10°C по краю изменяется от 2573 до 3799°C, что является достаточным для всех сельскохозяйственных культур. Летний период на большей территории Ставропольского края очень жаркий, с суммой температур 3600°C и выше.

На всей территории края зима умеренно мягкая и лишь в предгорном районе мягкая. Абсолютный минимум температуры воздуха в среднем по краю равен -22,6°C. Оттепели в восточных районах длятся 48-50 дней, в северо-западных – 40-46 дней, а в центральных и северо-восточных – 45-48 дней. Наибольшее количество оттепелей (59 дней) наблюдалось в г. Кисловодске.

На территории Ставропольского края в среднем за год выпадает 525 мм осадков. Распределение их по краю неравномерно, с уменьшением с запада на восток. Так в Новоалександровском районе этот показатель составляет величину 636 мм, а в Арзгирском – 400мм. Наибольшее количество осадков выпадает в октябре, а их дефицит отмечается в августе.

В Ставропольском крае по агроклиматическим и почвенным условиям выделено четыре зоны (рисунок 4): I – крайне-засушливая, II – засушливая, III – неустойчивого и IV – достаточного увлажнения. (Система..., 2013).

Крайне засушливая зона (I) включает часть Туркменского района, Апанасенковский, Арзгирский, Лвокумский и Нефтекумский районы. В зоне преобладают каштановые, светло-каштановые почвы и имеется большое количество песчаных массивов. Среднегодовое количество осадков – 387-400 мм, сумма температур выше 10°C – 3720-3750°C, гидротермический коэффициент (ГТК) – 0,63-0,72.

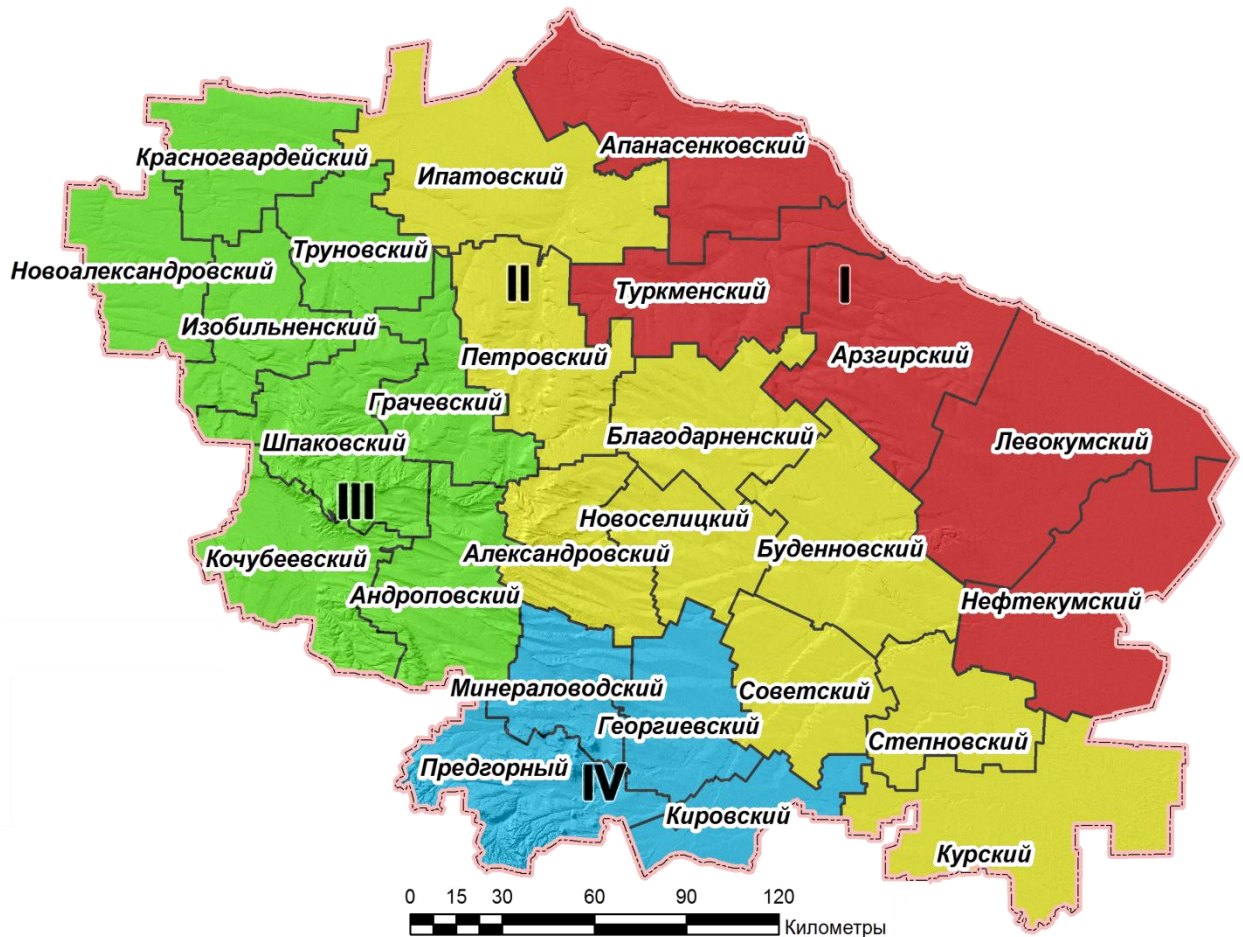


Рисунок – 4 Агроклиматические зоны Ставропольского края

Засушливая зона (II) располагается с северо-запада на юго-восток края. Включает Ипатовский, западную часть Туркменского, Курский, Благодарненский, Буденновский, Советский, Новоселицкий и Степновский районы. Среднегодовое количество осадков – 433-482 мм, сумма температур выше 10°C – 3650-3800 $^{\circ}\text{C}$, ГТК 0,72-0,81. Большую часть в засушливой зоне занимают темно-каштановые почвы – около 40%, каштановые – 30%, так же встречается небольшое количество светло-каштановых почв и пески.

Зона неустойчивого увлажнения (III) включает Петровский, Александровский, Новоалександровский, Красногвардейский, Изобильненский, Труновский, Грачевский, Шпаковский, Кочубеевский, Андроповский. Среднегодовое количество осадков – 511-636 мм, ГТК 1,0-1,1 сумма температур выше

10⁰С – 3300-3650⁰С. В зоне преобладают черноземы обыкновенные, а при движении на восток сменяются южными черноземами.

К *зоне достаточного увлажнения (IV)* относятся четыре района: Минераловодский, Георгиевский, Кировский и Предгорный. Климатические условия зоны очень благоприятны: годовое количество осадков составляет 665 мм, ГТК варьирует от 1,1 до 1,8, сумма температур выше 10⁰С – 2570⁰С. Большую часть почвенного покрова данной зоны занимают типичные черноземы – около 52%, черноземы обыкновенные занимают – 19%, выщелоченные – 15%, горно-лесные и горно-луговые – 10%.

2.2. Агрохимическая характеристика почв ФГБНУ Ставропольский НИИ сельского хозяйства

Почвы полей СНИИСХ представлены черноземом обыкновенным, среднемоощным, малогумусным, тяжелосуглинистым.

Агрохимический анализ почв каждого поля, проведенный в осенний период перед посевом озимой пшеницы представлен в таблице 3 (данные лаборатории почвоведения и агрохимии СНИИСХ).

Реакция почвенных образцов пахотного слоя почвы слабощелочная и нейтральная. Содержание гумуса в слое 0-20 см почвы за весь период наблюдения у всех полей было низкое и находилось в пределах 3,17-3,77%.

Содержание подвижного фосфора в пахотном слое в среднем по полям было в пределах 23-27 мг/кг. Отмечена закономерность уменьшения фосфора с каждым годом изучения. Так в среднем по полям в 2012 году в пахотном слое было 27 мг/кг, 2012 г. – 24 мг/кг, а в 2014 г. – 23 мг/кг.

Таблица 3 – Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы полей Ставропольского НИИСХ перед посевом озимой пшеницы, 2012-2014гг.

Год исследования	№ поля	pH	Гумус, %	Фосфор, мг/кг	Калий, мг/кг	Азот общий., %
2012	1	6,9	3,90	60	470	0,22
	2	7,0	3,81	22	200	0,25
	3	7,3	4,19	21	220	0,25
	4	7,0	3,76	16	171	0,20
	5	7,0	3,84	14	216	0,22
	6	6,9	3,76	51	140	0,21
	7	7,3	3,61	22	280	0,22
	Среднее	7,1	3,84	29	242	0,22
2013	1	7,0	4,22	21	270	0,25
	2	7,2	3,71	26	212	0,25
	3	6,9	2,52	26	149	0,22
	4	6,9	2,52	26	149	0,22
	5	6,9	2,52	14	160	0,20
	6	6,3	2,62	20	190	0,20
	7	7,6	3,61	20	304	0,22
	8	7,6	3,61	36	306	0,22
	Среднее	7,1	3,17	24	218	0,22
2014	1	7,0	3,81	22	200	0,25
	2	6,9	3,68	20	178	0,25
	3	6,3	2,62	24	248	0,22
	4	6,7	3,23	16	282	0,25
	5	6,3	2,62	24	248	0,22
	6	6,3	2,62	28	300	0,22
	7	6,9	2,52	17	183	0,20
	8	7,2	3,73	31	272	0,25
	9	7,6	3,61	23	266	0,22
	10	7,6	3,61	22	280	0,22
	Среднее	6,9	3,21	23	246	0,23

У представленных полей Ставропольского НИИСХ отмечено разное содержание обменного калия, которое колебалось от 140 мг/кг до 470 мг/кг.

Содержание азота в пахотном слое почвы в среднем за годы исследований по всем полям находилось в пределах 0,22-0,23%. На всех полях за весь период наблюдения общий азот не превышал 0,25%.

2.3. Климатическая характеристика места проведения исследований

2011-2012гг. Погодные условия для посева и получения всходов осенью 2011г в крае складывались не совсем благоприятно (рисунок 5). В третьей декаде сентября на фоне повышенной температуры отмечался недостаток осадков. В 1 и 2 декадах октября прошли дожди, что позволило получить всходы. В связи с низкими температурами третьей декады октября длительность осенней вегетации была меньше обычной (50-60 дней). Раннее прекращение осенней вегетации и позднее возобновление весенней (через $+5^{\circ}\text{C}$ в третьей декаде марта) не позволило растениям в достаточной мере раскуститься и сформировать оптимальный стеблестой. При недостатке осадков в апреле (всего 57%) среднесуточная температура воздуха превышала среднее многолетнее значение на $4,3^{\circ}\text{C}$, а в мае – на $3,7^{\circ}\text{C}$ при недостатке осадков (21%). Такие экстремальные условия привели к ускорению (на 10 дней) сроков наступления фаз. Ухудшение условий вегетации при формировании и наливе зерна (температура в июне выше среднее многолетнего значения на $2,6^{\circ}\text{C}$) отразилось на конечном урожае.

2012-2013гг. Агроклиматические условия осени 2012г. сложились неблагоприятно для сева и появления всходов озимой пшеницы. Температурный режим сентября был превышен в среднем на $2,2^{\circ}\text{C}$, а октября – на $4,6^{\circ}\text{C}$ при половинной норме осадков в сентябре и при их значительном недостатке в октябре (85%). Благоприятный водный режим в первой декаде ноября (220% от нормы) и повышенный температурный фон всего месяца ($+6,3^{\circ}\text{C}$, что на $+2,6^{\circ}\text{C}$ выше нормы) способствовали хорошему развитию посевов.

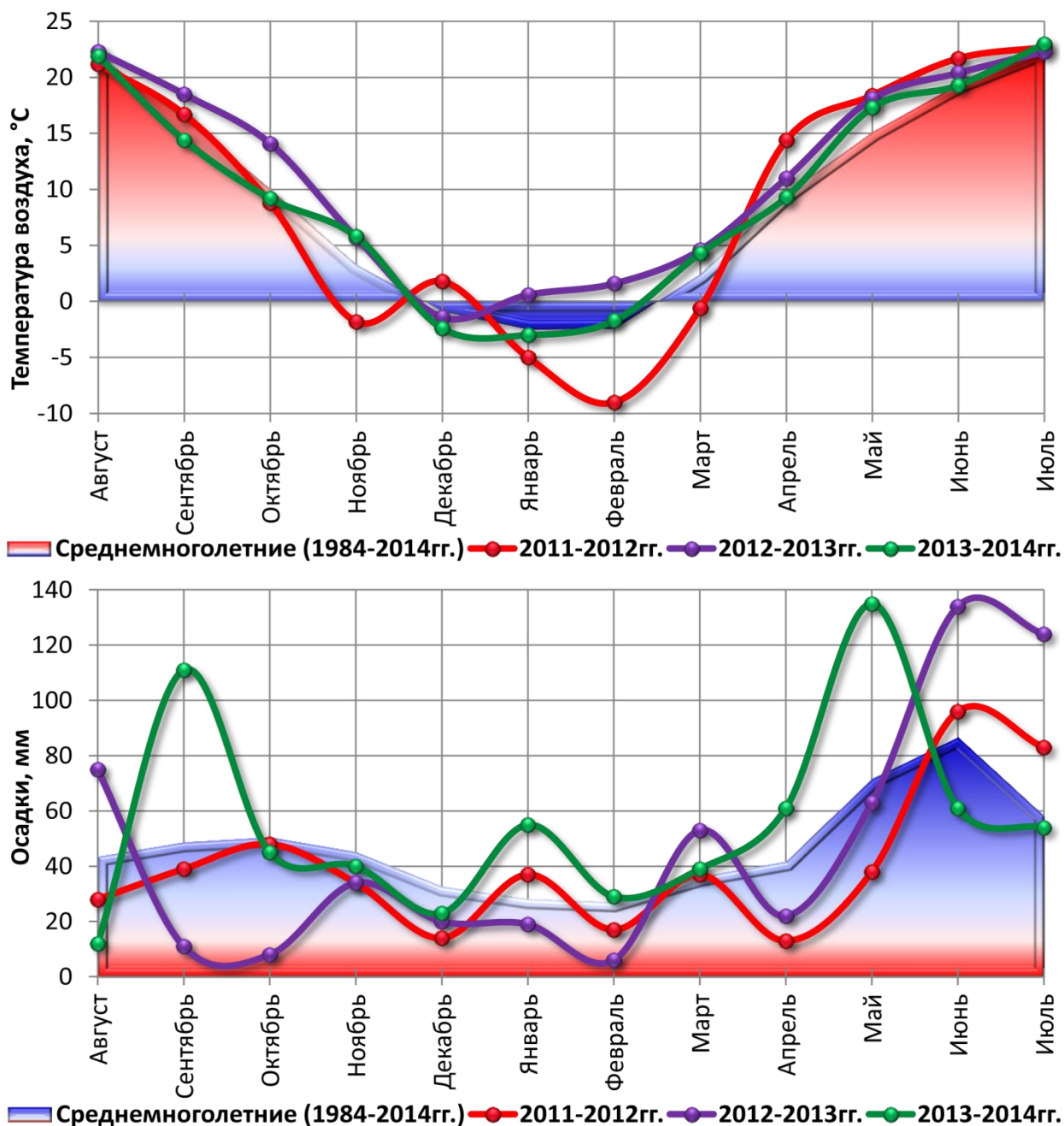


Рисунок 5 – Температура воздуха и количество осадков, данные метеостанции Ставрополь

Температура зимнего периода в крае была на $1,5^{\circ}\text{C}$ выше многолетних значений, а недобор осадков за это время составил 43%. Весенняя вегетация началась на 10-15 дней раньше обычного срока. Среднемесячная температура превышала норму на $2,2^{\circ}\text{C}$, а количество осадков было в 2 раза выше многолетнего значения. В апреле при повышенном температурном режиме наблюдался недобор осадков. Первая декада мая была сухой и жаркой. Среднесуточная температура воздуха превышала норму на $4,4^{\circ}\text{C}$ с дефици-

том осадков. Во второй декаде мая температура воздуха, хотя и превышала норму на $2,0^{\circ}\text{C}$, но количество осадков было около 162% от нормы. В целом условия первой декады июня были благоприятными для налива зерна. Во второй декаде температура воздуха была на $2,4^{\circ}\text{C}$ выше среднемноголетнего значения с недобором осадков. В третьей декаде июня температура воздуха также на $1,7^{\circ}\text{C}$ превышала норму при половинной норме осадков.

2013-2014гг. В сентябре и октябре 2013г. наблюдалось обильное выпадение осадков, а условия осенне-зимнего периода были благоприятными для роста и развития озимой пшеницы. Возобновление весенней вегетации наступило на две недели раньше среднемноголетних сроков. Среднемесячная температура марта на $2,7^{\circ}\text{C}$ превышала норму при повышенном количестве осадков (129%). В апреле наблюдался небольшой недобор осадков (19%) при пониженной температуре воздуха (на $0,5^{\circ}\text{C}$). В мае температура воздуха хотя и превышала среднемноголетнее значение на $2,8^{\circ}\text{C}$, но благодаря обильным осадкам (168%), не оказала отрицательного влияния на ход формирования урожая озимой пшеницы. Такие хорошие условия весеннего увлажнения компенсировали недобор осадков в июне (46%), тем более что температура воздуха была близка к норме ($21,3^{\circ}\text{C}$). Все это благоприятно отразилось на формировании урожая зерна в 2014 году.

Таким образом, 2011-2012 сельскохозяйственный год характеризовался ранним прекращением осенней и поздним возобновлением весенней вегетации при повышенном температурном режиме и недоборе осадков в весенне-летний период. Особенностью 2012-2013 сельскохозяйственного года было: сильная засуха в сентябре и октябре, которая в значительной степени компенсировалась благоприятными условиями ноября и декабря, раннее возобновление весенней вегетации и своевременное выпадение осадков в репродуктивный период. 2013-2014 сельскохозяйственный год отличался благоприятными условиями температурного и водного режимов во все периоды роста и развития озимой пшеницы.

2.4. Методы проведения исследований

Показатели фотосинтетической продуктивности, формирование урожая и качества зерна озимой пшеницы изучали на производственных посевах СНИИСХ. Отборы производили в фазы весеннее кущение (IV этап органогенеза), трубкование (VI этап органогенеза), колошение (VIII этап органогенеза), налив зерна (X этап органогенеза) и полную спелость (XII этап органогенеза). Отборы растительных образцов (сноповой материал) проводили по общепринятой методике. Повторность – 4-х кратная.

Для решения поставленных задач изучали: климатические показатели (температура воздуха и количество осадков), показатели фотосинтетической продуктивности озимой пшеницы – биомасса органов, растений и посева, площадь ассимиляционной поверхности, количество хлорофилла, фотосинтетические потенциалы.

Площадь листьев и стеблей определяли весовым методом по Ничипоровичу (1961г.). Площадь колоса рассчитывали по формуле В.А.Кумакова (1968г.):

$$S_{\text{колоса}} = 3,8 \times A \times B, \text{ где}$$

A – длина колоса;

B – ширина.

Хлорофилл определяли по методу Я.И.Милаевой и Н.П.Примака (1969). Растения разбирались на органы. Брали навеску из всего органа. Извлечение пигментов этиловым спиртом проводилось в темном сушильном шкафу ($T +40^{\circ}\text{C}$) в течение 24 часов. На спектрофотометре SPECOL-11 измеряли оптическую плотность спиртовой вытяжки. При расчете количества пигментов использовали систему уравнений Винтерманса и Де Мотса (1965):

$$C = 6,1 \times D_{665} + 20,0 \times D_{649} \quad A = \frac{C \times V}{P} \times 100, \text{ где}$$

C – содержание хлорофилла в мг/л;

D – значения оптических плотностей в максимумах поглощения хлорофилла a и b в красной области спектра;

A – содержание пигментов в мг/г сухого веса;

V – концентрация пигментов в мг/л;

P – навеска растительного образца.

Показатели продукционных процессов, определяющих величину урожая озимой пшеницы, рассчитывали общепринятым методом с помощью данных о величине поверхности фотосинтезирующих органов, а также по содержанию хлорофилла.

Определение химического состава органов растений озимой пшеницы проводили по методике В.Т.Куркаева с соавторами (1977).

В исследованиях по разработке регрессионных моделей оценки продуктивности озимой пшеницы по данным дистанционного зондирования Земли мы использовали статистические материалы (Сельское хозяйство Ставрополья за 2001-2009гг., 2010; Сельское хозяйство в Ставропольском крае..., 2010-2014гг.) и вегетационные индексы NDVI, полученные с помощью сервиса «ВЕГА» ИКИ РАН. С указанного сервиса загружали архивные данные по всем районам Ставропольского края за период с 2003 по 2014 годы, которые затем анализировались. Расчет динамики NDVI за указанный период нами производился с учетом посевных площадей озимой пшеницы в каждом районе, в результате чего получали средневзвешенное значение вегетационного индекса.

При изучении взаимосвязи NDVI с фотосинтетическими показателями посевов озимой пшеницы нами так же с помощью сервиса «ВЕГА» были получены значения вегетационных индексов в период роста и развития растений за все годы проведения исследований. Для этого нами была проведена оцифровка каждого поля ГБНУ Ставропольский НИИСХ и по его координатам загружены данные NDVI (таблица 4, рисунки 6, 7 и 8).

Таблица 4 – Координаты полей посевов озимой пшеницы ГБНУ Ставропольский НИИСХ

Поле	Координаты (начинаются с точки, отмеченной на картах и по часовой стрелке)
2012 год	
№1	45°06'41,66"с.ш.,42°03'53,66"в.д.;45°07'04,58"с.ш.,42°04'24,70"в.д.; 45°07'03,63"с.ш.,42°04'25,56"в.д.;45°06'40,82"с.ш.,42°04'21,60"в.д.; 45°06'38,96"с.ш., 42°03'58,74"в.д.
№2	45°07'35,07"с.ш.,42°04'11,98"в.д.;45°07'47,95"с.ш.,42°04'28,80"в.д.; 45°07'39,66"с.ш., 42°04'41,31"в.д.;45°07'27,21"с.ш., 42°04'25,09"в.д.
№3	45°08'23,01"с.ш.,42°04'25,09"в.д.;45°08'27,94"с.ш.,42°05'43,29"в.д.; 45°07'46,94"с.ш., 42°05'41,35"в.д.;45°07'41,34"с.ш., 42°05'18,68"в.д.
№4	45°09'12,46"с.ш.,42°06'12,20"в.д.;45°09'12,39"с.ш.,42°06'28,08"в.д.; 45°09'12,93"с.ш.,42°06'32,74"в.д.;45°08'30,39"с.ш.,42°06'34,10"в.д.; 45°08'30,79"с.ш., 42°06'13,21"в.д.
№5	45°09'05,00"с.ш.,42°06'46,01"в.д.;45°09'05,10"с.ш.,42°07'06,35"в.д.; 45°08'30,96"с.ш., 42°07'07,73"в.д.;45°08'30,52"с.ш., 42°06'45,83"в.д.
№6	45°09'05,06"с.ш.,42°07'06,49"в.д.;45°09'05,25"с.ш.,42°07'21,91"в.д.; 45°08'38,25"с.ш.,42°07'22,46"в.д.;45°08'36,72"с.ш.,42°07'22,99"в.д.; 45°08'31,53"с.ш.,42°07'22,91"в.д.;45°08'31,20"с.ш.,42°07'22,45"в.д.; 45°08'30,92"с.ш., 42°07'07,77"в.д.
№7	45°08'40,32"с.ш.,42°15'44,39"в.д.;45°08'51,94"с.ш.,42°16'16,06"в.д.; 45°08'16,43"с.ш., 42°16'42,12"в.д.;45°08'03,73"с.ш., 42°16'11,54"в.д.
2013 год	
№1	45°08'31,81"с.ш.,42°04'31,51"в.д.;45°08'43,39"с.ш.,42°04'47,63"в.д.; 45°08'21,03"с.ш., 42°04'48,17"в.д.
№2	45°08'19,29"с.ш., 42°04'49,21"в.д.; 45°08'22,94"с.ш., 42°05'17,78"в.д.; 45°07'40,93"с.ш., 42°05'17,94"в.д.; 45°07'37,99"с.ш., 42°05'05,81"в.д.; 45°07'41,15"с.ш., 42°04'57,70"в.д.; 45°07'39,98"с.ш., 42°04'49,40"в.д.
№3	45°09'12,54"с.ш., 42°05'53,33"в.д.;45°09'12,62"с.ш., 42°06'1145"в.д.; 45°08'30,57"с.ш., 42°06'12,09"в.д.;45°08'28,93"с.ш., 42°05'53,44"в.д.;
№4	45°08'40,48"с.ш., 42°07'24,20"в.д.;45°08'49,92"с.ш., 42°07'42,42"в.д.; 45°09'05,12"с.ш., 42°08'01,87"в.д.;45°08'58,64"с.ш., 42°08'02,24"в.д.; 45°08'39,42"с.ш., 42°07'33,72"в.д.;45°08'39,79"с.ш., 42°07'24,43"в.д.;
№5	45°08'39,29"с.ш., 42°07'24,79"в.д.;45°09'39,14"с.ш., 42°07'31,16"в.д.; 45°08'27,23"с.ш., 42°07'38,06"в.д.;45°08'27,60"с.ш., 42°07'23,46"в.д.; 45°08'37,14"с.ш., 42°07'23,22"в.д.;
№6	45°08'20,37"с.ш., 42°14'52,61"в.д.;45°08'32,83"с.ш., 42°15'26,07"в.д.; 45°08'03,87"с.ш., 42°15'46,45"в.д.;45°07'51,60"с.ш., 42°15'13,92"в.д.;
№7	45°08'32,83"с.ш., 42°15'26,07"в.д.;45°08'40,22"с.ш., 42°15'43,76"в.д.; 45°08'10,96"с.ш., 42°16'05,16"в.д.;45°08'03,87"с.ш., 42°15'46,45"в.д.;
№8	45°08'03,08"с.ш., 42°15'47,32"в.д.; 45°08'09,44"с.ш., 42°16'05,54"в.д.; 45°07'33,32"с.ш., 42°16'32,85"в.д.;45°07'24,88"с.ш., 42°16'17,04"в.д.;
2014 год	
№1	45°08'23,01"с.ш., 42°04'25,09"в.д.;45°08'27,94"с.ш., 42°05'43,29"в.д.; 45°07'46,94"с.ш., 42°05'41,35"в.д.;45°07'41,34"с.ш., 42°05'18,68"в.д.
№2	45°09'10,82"с.ш., 42°05'44,53"в.д. 45°09'12,60"с.ш., 42°05'54,01"в.д. 45°08'29,16"с.ш., 42°05'54,59"в.д.45°08'28,25"с.ш., 42°05'44,96"в.д.
№3	45°08'38,62"с.ш., 42°07'43,47"в.д.45°08'38,77"с.ш., 42°07'50,81"в.д. 45°08'30,55"с.ш., 42°07'55,61"в.д.45°08'26,67"с.ш., 42°07'56,36"в.д.

	45°08'29,33"с.ш., 42°07'49,20"в.д.
№4	45°08'33,54"с.ш., 42°08'14,31"в.д.45°08'33,63"с.ш., 42°08'20,84"в.д. 45°08'32,34"с.ш., 42°08'23,31"в.д.45°08'32,10"с.ш., 42°08'25,76"в.д. 45°08'15,52"с.ш., 42°08'08,10"в.д.
№5	45°08'50,31"с.ш., 42°08'02,10"в.д.45°08'43,62"с.ш., 42°08'02,60"в.д. 45°08'38,71"с.ш., 42°07'56,29"в.д.45°08'39,67"с.ш., 42°07'47,19"в.д.
№6	45°08'51,62"с.ш., 42°08'04,07"в.д.45°09'02,82"с.ш., 42°08'23,83"в.д. 45°08'57,23"с.ш., 42°08'24,10"в.д.45°08'44,81"с.ш., 42°08'04,51"в.д.
№7	45°09'09,23"с.ш., 42°07'39,09"в.д.45°09'09,15"с.ш., 42°08'01,76"в.д. 45°09'05,98"с.ш., 42°08'01,96"в.д.45°08'48,69"с.ш., 42°07'38,914"в.д. 45°09'00,63"с.ш., 42°07'39,04"в.д.45°09'00,74"с.ш., 42°07'43,87"в.д. 45°09'05,59"с.ш., 42°07'44,12"в.д.45°09'05,61"с.ш., 42°07'39,13"в.д.
№8	45°08'07,90"с.ш., 42°04'33,79"в.д.45°08'18,42"с.ш., 42°04'48,10"в.д. 45°07'40,03"с.ш., 42°04'48,38"в.д.45°07'38,77"с.ш., 42°04'46,73"в.д.
№9	45°07'41,42"с.ш., 42°14'49,26"в.д.45°07'56,13"с.ш., 42°15'28,66"в.д. 45°07'18,14"с.ш., 42°15'56,73"в.д.45°07'03,98"с.ш., 42°15'16,21"в.д.
№10	45°08'52,38"с.ш., 42°16'17,11"в.д.;45°09'03,95"с.ш., 42°16'48,54"в.д.; 45°08'00,92"с.ш., 42°17'34,02"в.д.;45°07'46,06"с.ш., 42°17'05,87"в.д.

Биологический урожай озимой пшеницы определяли следующим образом: снопы отбирали с площади 0,25м² в четырехкратной повторности. В лабораторных условиях проводили разбор образцов, ручной обмолот колосьев и определение структуры урожая.

Математическая и статистическая обработка данных (Доспехов Б.А., 1979; Quinn, Keough, 2002) проводилась на персональном компьютере. Программное обеспечение – AgStat, Statistica 6.0, MicrosoftOffice 2007. Картографический материал создан с помощью MapInfo и ArcGis.

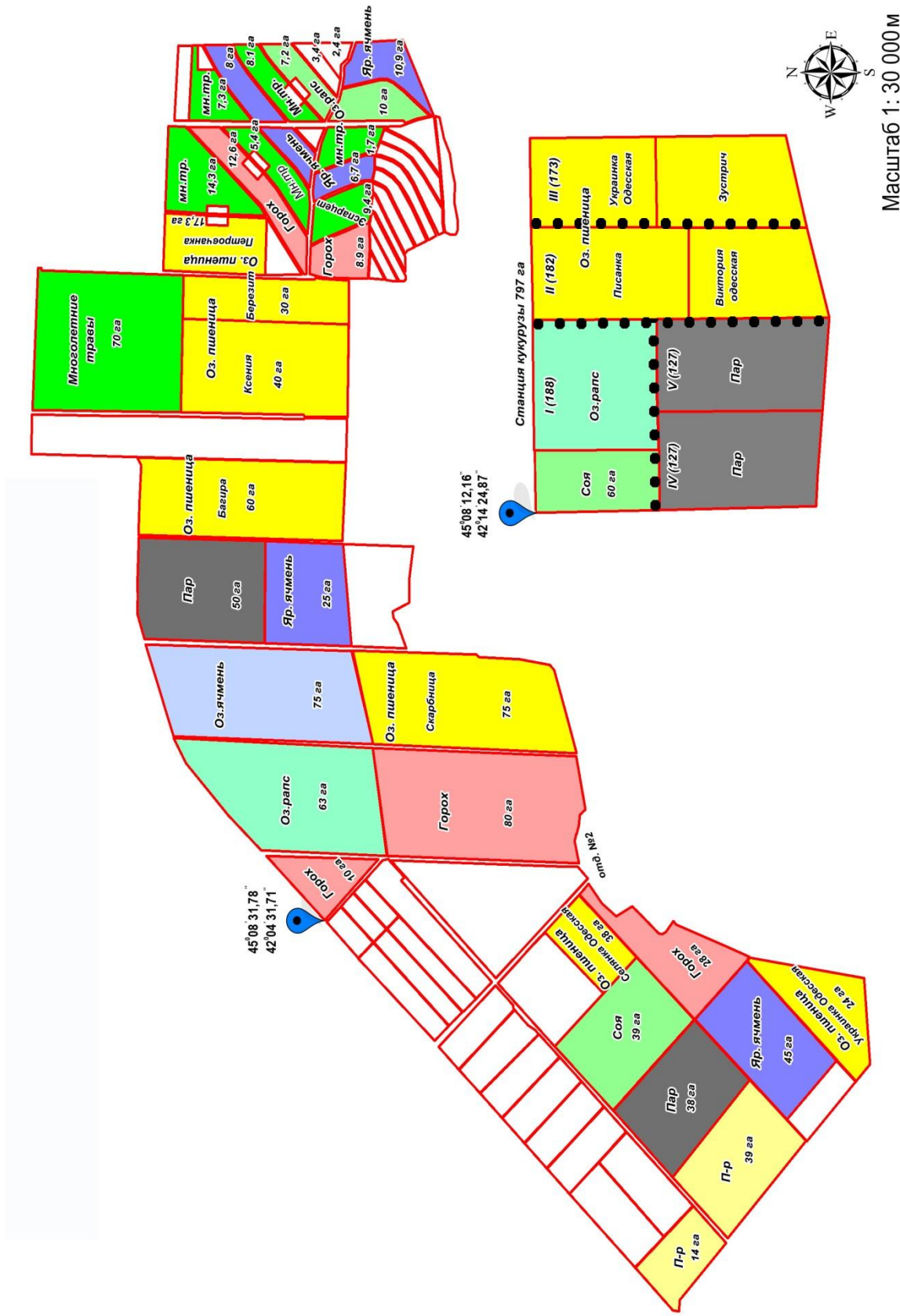


Рисунок 6 – Размещение посевов озимой пшеницы СНИИСХ, 2012 год

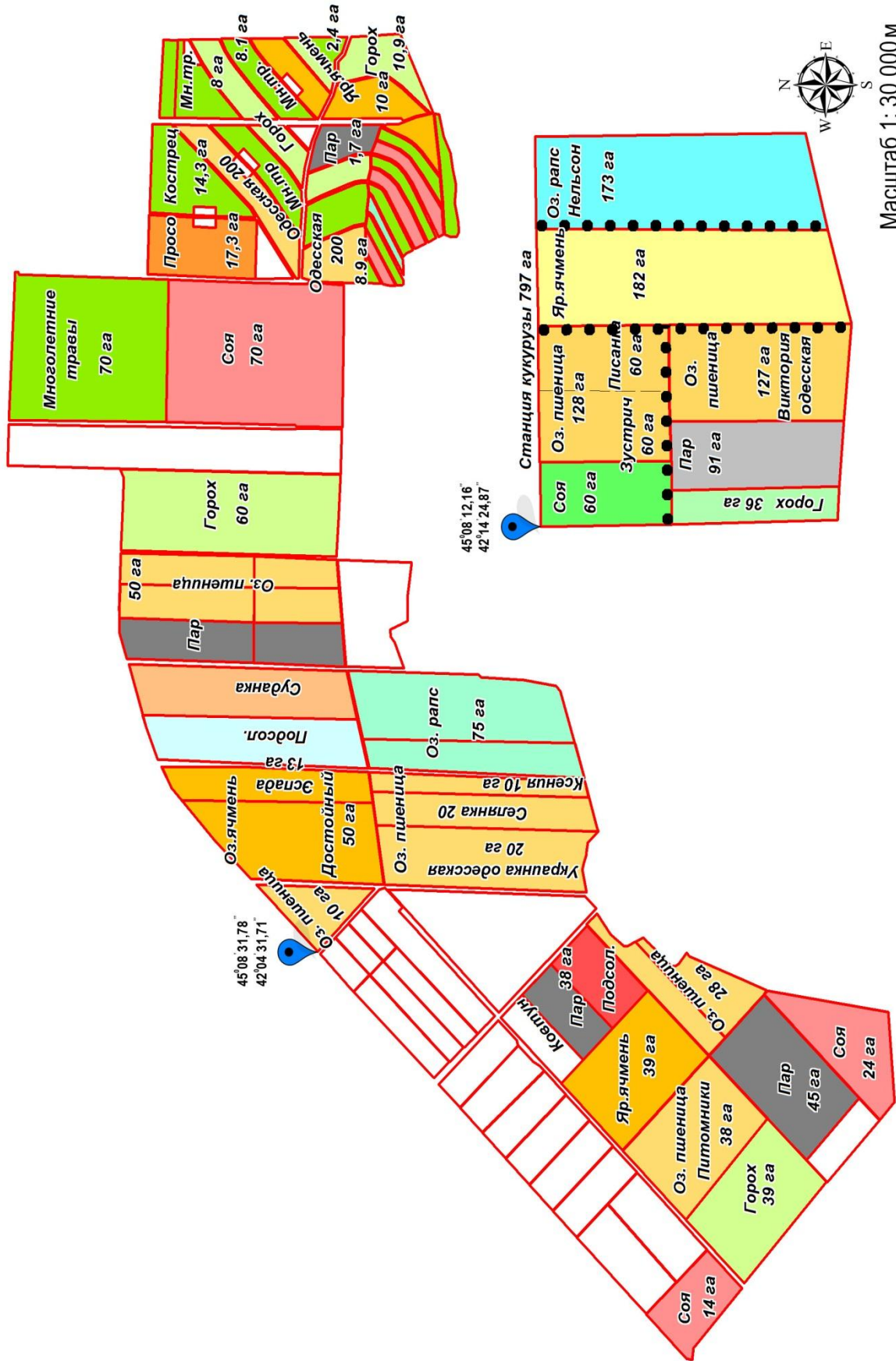


Рисунок 7 – Размещение посевов озимой пшеницы СНИИСХ, 2013 год

ГЛАВА 3

ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

3.1. Состояние посевов озимой пшеницы и NDVI как их оптико-биологическая характеристика

Для мониторинга посевов в сельском хозяйстве чаще всего используют космические снимки, полученные со сканеров Landsat и MODIS. Первые обладают пространственным разрешением 15м с периодичностью получения данных 16 дней. У вторых пространственное разрешение составляет 250 метров, а временное – 1-2 дня (Нейштад И.А.,2007).

В наших исследованиях использованы данные сервиса «ВЕГА» с временным интервалом 7 дней, расчет которых проводился по снимкам, полученным со спутников MODIS. Мы проанализированы такие данные с различным временным разрешением для выявления возможности их использования при характеристике роста и развития растений. С этой целью были рассчитаны NDVI всех полей озимой пшеницы ФГБНУ Ставропольский НИИСХ и построены динамики вегетационного индекса с периодичностью 7, 14 и 21 дней (рисунок 9).

В целом изменения во времени NDVI по всем временным интервалам примерно одинаково. На графиках четко выражены два максимума: в конце осенней вегетации, и в начале колошения. Анализ полученных данных показал, что для временного интервала 7 дней увеличение вегетационного индекса продолжалось до 3 декабря. Окончание осеннего периода для динамики NDVI с периодичностью 14 дней наступило 26 ноября, а 21 – 10 декабря.

С возобновлением весенней вегетации наблюдается активный рост и развитие посевов озимой пшеницы, что отражается на динамике NDVI. Этот процесс продолжается до начала фазы колошения, где наблюдается второй максимум вегетационного индекса. Наибольшие значения NDVI для всех временных интервалов практически одинаково – 0,74, 0,73 и 0,73. Тем не ме-

нее, для временного интервала 7 дней максимуму NDVI соответствует дата 14 мая, а для 14 и 21 – 7 мая.

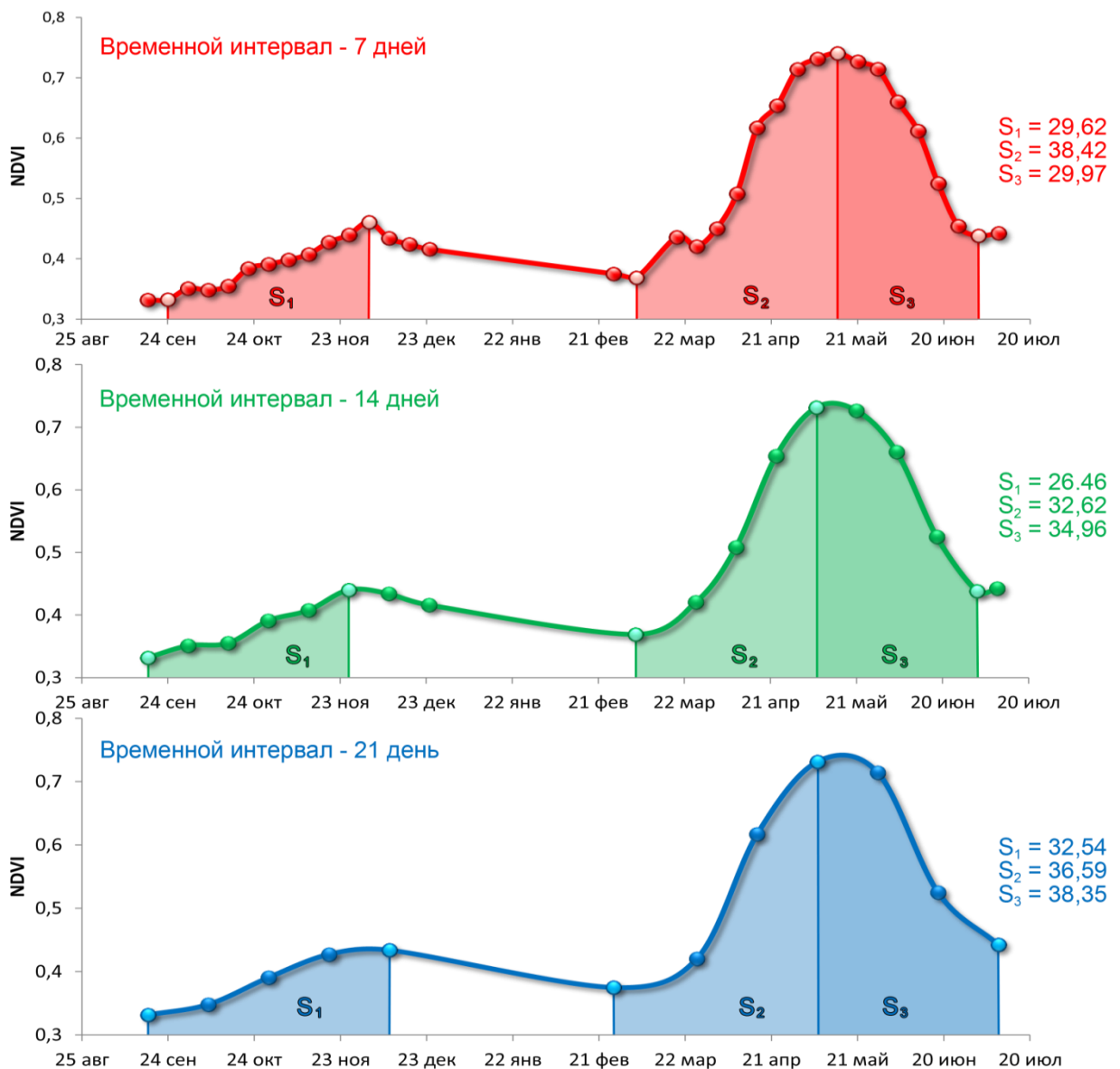


Рисунок 9 – Динамика NDVI посевов озимой пшеницы по производственным полям ФГБНУ СНИИСХ, 2011-2014гг. (S_1 -суммарный NDVI за период: всходы - прекращение осенней вегетации, S_2 - суммарный NDVI за период: возобновление весенней вегетации - колошение, S_3 - суммарный NDVI за период: колошение – полная спелость)

После фазы колошения содержание хлорофилла в растении снижается, что отражается в уменьшении вегетационного индекса, которое продолжает-

ся до фазы полной спелости. Для временных интервалов 7 и 14 дней окончание XII этапа органогенеза наступало 2 июля, а для 21 – 9 июля.

Для характеристики динамики вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы на различных этапах органогенеза можно использовать такие показатели как суммарный NDVI за период от всходов до прекращения осенней вегетации (S_1), суммарный NDVI за период от возобновления весенней вегетации до колошения (S_2) и суммарный NDVI за период от колошения до полной спелости (S_3). Эти показатели отражают изменения вегетационного индекса на различных стадиях роста и развития растений озимой пшеницы. Так, суммарный NDVI в осенний период (S_1) для временного интервала 7 дней составляет 29,62. Для динамики NDVI с временным разрешением 14 дней наблюдается уменьшение этого показателя на 10,6% по сравнению с 7 дневным временным разрешением, а с 21 – увеличение на 10%.

Суммарный NDVI за период возобновление весенней вегетации – колошение (S_2) возрастает с увеличением временного интервала между точками определения вегетационного индекса NDVI и составляет 38,42, что выше на 15%, чем за период 14 дней и на 4,7%, чем за период 21 день.

Суммарный NDVI S_3 (от колошения до полной спелости) составляет 29,97, что меньше на 16,6% по сравнению с 14 дневным временным интервалом и на 28% с периодичностью измерения 21 день.

Жизненный цикл растений озимой пшеницы состоит из определенных этапов органогенеза, которые характеризуются качественными изменениями физиологических функций и образованием новых органов (Приложение 1). Каждый из этапов характеризуется внешними морфологическими изменениями и обладает определенными оптико-биологическими характеристиками. Поэтому при описании закономерностей роста и развития растений показателями, характеризующими этот процесс, необходимо придерживаться этапов органогенеза, продолжительность которых составляет от 23 (XI этап органогенеза) до 4-5 (VI и IX этапы органогенеза) дней.

Кроме того, в зависимости от условий выращивания наступление этапов органогенеза растений озимой пшеницы могут смещаться как по годам, так и в пределах онтогенеза. Такое смещение может составлять от 1 дня до 15-20 дней.

Таким образом, увеличение временного интервала приводит к существенным изменениям характеристик динамики NDVI озимой пшеницы, поэтому для описания биологических объектов предпочтительно использовать данные с наименьшим временным интервалом.

Для определения возможности использования данных дистанционного зондирования Земли с пространственным разрешением 250 метров, которые предоставляет сервис «ВЕГА» ИКИ РАН, для характеристики оптико-биологических свойств посевов озимой пшеницы, мы проанализировали значения вегетационных индексов NDVI всего поля (S_0), а так же уменьшенных по периметру на 100 (S_{100}) и 200 (S_{200}) метров его частей. Такими действиями мы добиваемся механического увеличения пространственного разрешения спутниковых данных до 150 и 50 метров. Для эксперимента были выбраны визуально однородные поля с площадями порядка 60 и 30 гектар. Наш эксперимент был основан на следующих соображениях. Если получаемые данные искажены из-за низкого пространственного разрешения, то NDVI поля и его уменьшенных частей должны быть значимо различны, так как в этом случае будет проявляться влияние краевого эффекта на значение вегетационного индекса, которое должно усиливаться с увеличением площади выбранной части посева. Анализ проводили в фазы весеннее кущение, конец трубкования, колошение и налив зерна (рисунок 10). Исследования показали, что значения вегетационных индексов первого поля и его уменьшенных частей в период возобновления весенней вегетации различаются незначительно и составляют величины 0,62, 0,65 и 0,67 для всей площади, уменьшенной по периметру на 100 и 200 метров соответственно. Для второго поля такие NDVI находятся в пределах всего 2,4%: значение вегетационного индекса всего поля составляет

0,45, а при уменьшении его периметра как на 100, так и на 200 метров – этот показатель снижается всего на 0,03.

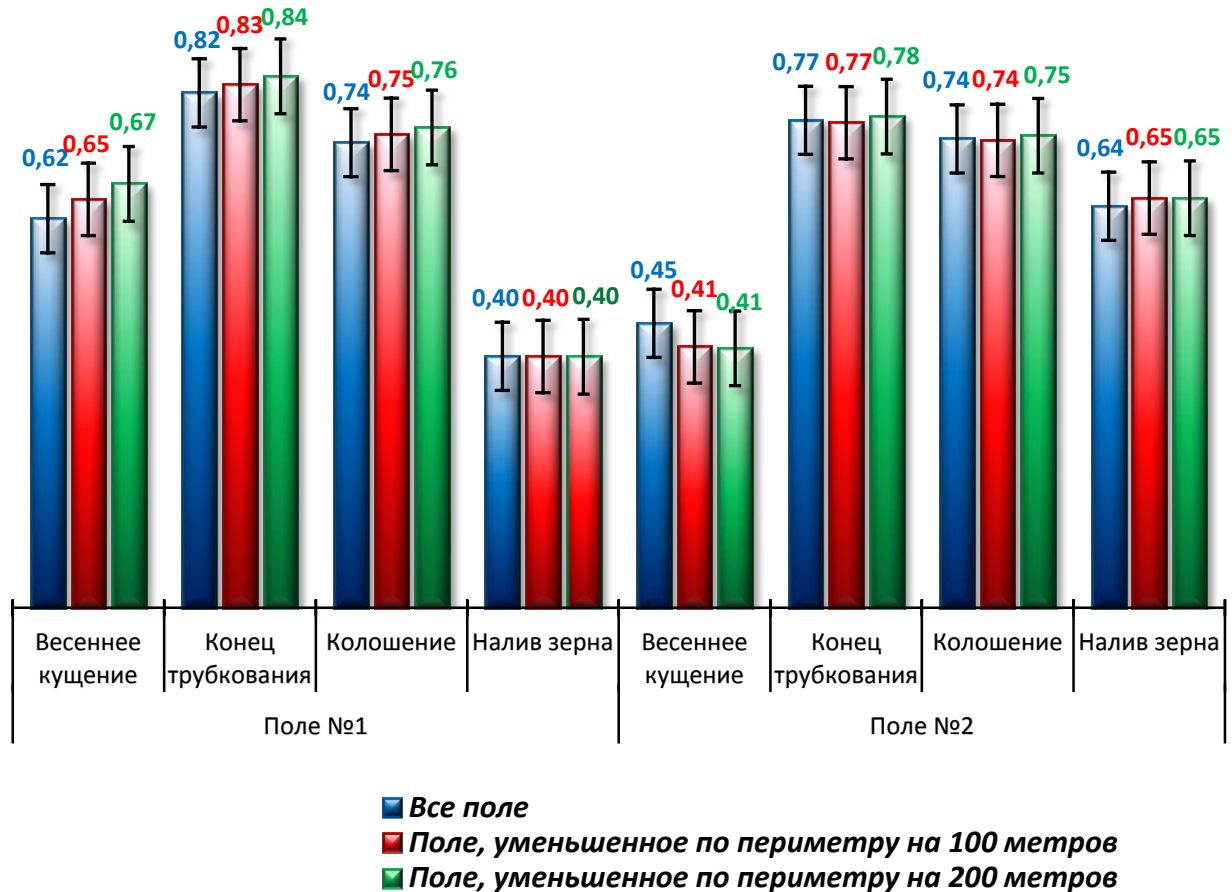


Рисунок 10 – NDVI посевов озимой пшеницы в зависимости от размера учетной площади, СНИИСХ, 20013г.

В дальнейшем с ростом и развитием растений озимой пшеницы NDVI полей и их уменьшенных частей становятся практически равными. Так, в конце трубкования значение вегетационного индекса первого поля равно 0,82, в то время как при его уменьшении по периметру на 100 метров этот показатель увеличивается всего лишь на 0,01, а на 200 метров – на 0,02. NDVI второго поля изменяются в пределах 1,3%, при этом вегетационный индекс для S_0 составляет 0,77, а для S_{100} и S_{200} – 0,77 и 0,78 соответственно.

В фазу колошение NDVI первого поля равен 0,74, при уменьшении его периметра на 100 и 200 метров – 0,75 и 0,76. Вегетационный индекс второго

поля в этот период так же определяется величиной 0,74, а при уменьшении площади по периметру на 100 метров NDVI не изменился и на 200 метров – увеличился незначительно (на 0,01).

В фазу налива зерна, значения вегетационных индексов первого поля одинаковы и составляют величину 0,40 для S_0 , S_{100} и S_{200} . NDVI второго поля составляет величину 0,64, а при уменьшении его на 100 и 200 метров – 0,65.

Таким образом, проведенные нами исследования показали, что значения вегетационных индексов посевов озимой пшеницы всего поля и их уменьшенных площадей на 100 и 200 метров по периметру варьируют в пределах ошибки опыта в период возобновления весенней вегетации и практически не имеют различий на поздних этапах роста и развития растений. Следовательно, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что точность данных дистанционного зондирования Земли для отдельных полей с пространственным разрешением 250 метров практически не меняется с её увеличением до 150 и 50 м.

Вегетационный индекс NDVI как оптико-биологическая характеристика посева может быть использована для оценки его физиологического состояния (Ерошенко Ф.В., 2014). Усредненная динамика этого показателя по полям озимой пшеницы ФГБНУ Ставропольский НИИСХ за годы проведения исследований представляет собой пикообразную неравномерную кривую с максимумом в начале фазы колошения (рисунок 11). В предыдущей главе мы отмечали, что на NDVI большое влияние оказывают условия выращивания сельскохозяйственных культур. Об этом же свидетельствуют и литературные данные (Куссуль Н.Н. и др., 2012). Так как территория исследований находится в одной почвенно-климатической зоне, то вариации основных параметров, определяющих внешние факторы, могут быть только у двух величин – температура воздуха и количество осадков.

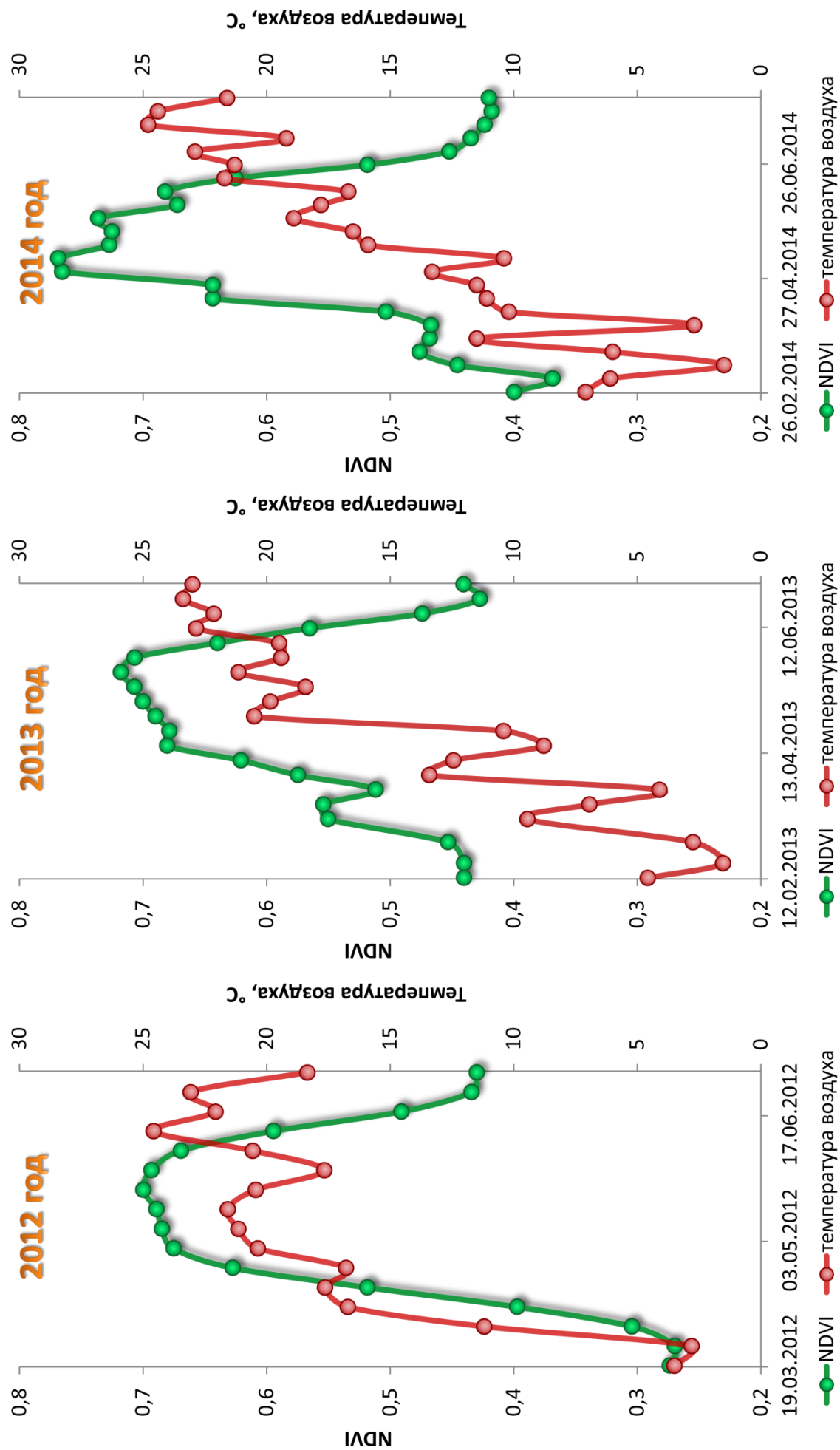


Рисунок 11 – Динамика NDVI озимой пшеницы посевов СНИИСХ и температуры воздуха

Влагообеспеченность растений является более консервативной по изменчивости характеристикой, а её действие медленней проявляется на состоянии растений, чем температуры воздуха.

Поэтому мы сопоставили графики изменений вегетационного индекса и среднесуточной температуры воздуха, которая была получена с помощью сервиса Gismeteo (<http://www.gismeteo.ru/diary/5141/>). Представленные данные свидетельствует о том, что пики кривой NDVI практически полностью совпадают с температурными колебаниями. Наблюдаемые совпадения динамик рассматриваемых величин происходят с некоторым временным сдвигом, что обусловлено более поздним проявлением реакции растений на меняющиеся условия окружающей среды. Такие свойства вегетационного индекса особо явно проявились в 2013 и 2014 годах.

В 2012 году с возобновлением весенней вегетации наблюдался равномерный рост среднесуточной температуры воздуха, что нашло отражение в безпиковой динамике NDVI посевов озимой пшеницы в этот период. Некоторое снижение температуры воздуха в конце апреля, начале мая 2012 года практически не отразилось на форме кривой вегетационного индекса. С нашей точки зрения, такая закономерность может быть обусловлена тем, что к этому времени температура воздуха установилась на практически оптимальном для роста и развития растений уровне, и небольшие ее колебания не могли сильно повлиять на оптико-биологические свойства посевов.

Таким образом, изменения вегетационного индекса NDVI посева озимой пшеницы в онтогенезе отражает его физиологическое состояние и зависит как от фазы развития, так и от условий выращивания.

Нами были построены динамики NDVI каждого поля производственных посевов озимой пшеницы ФГБНУ Ставропольский НИИСХ за 2012, 2013 и 2014гг. (Рисунки 12, 13 и 14).

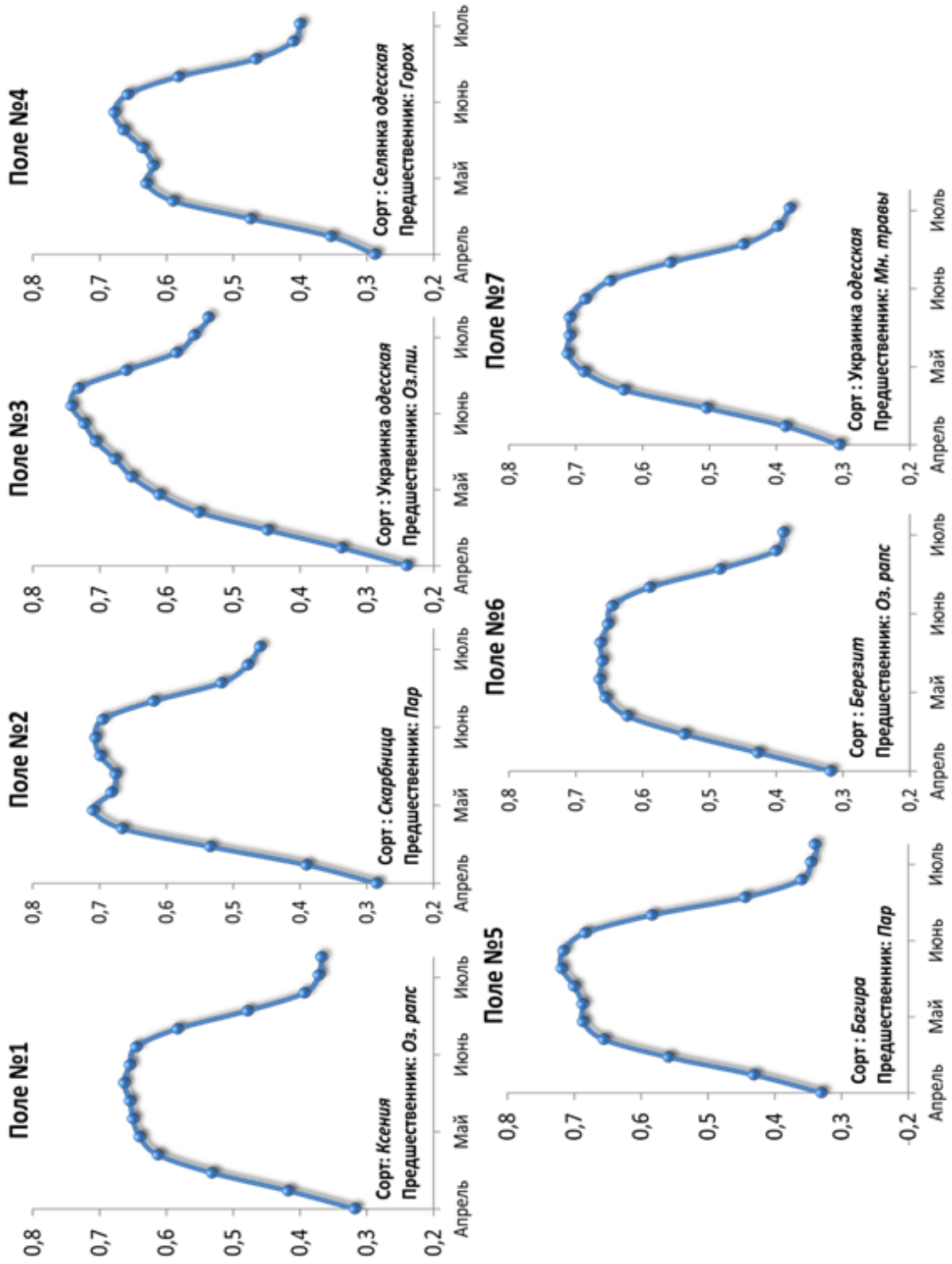


Рисунок 12 – Динамика вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы ФГБНУ Ставропольский НИИСХ, 2012г.

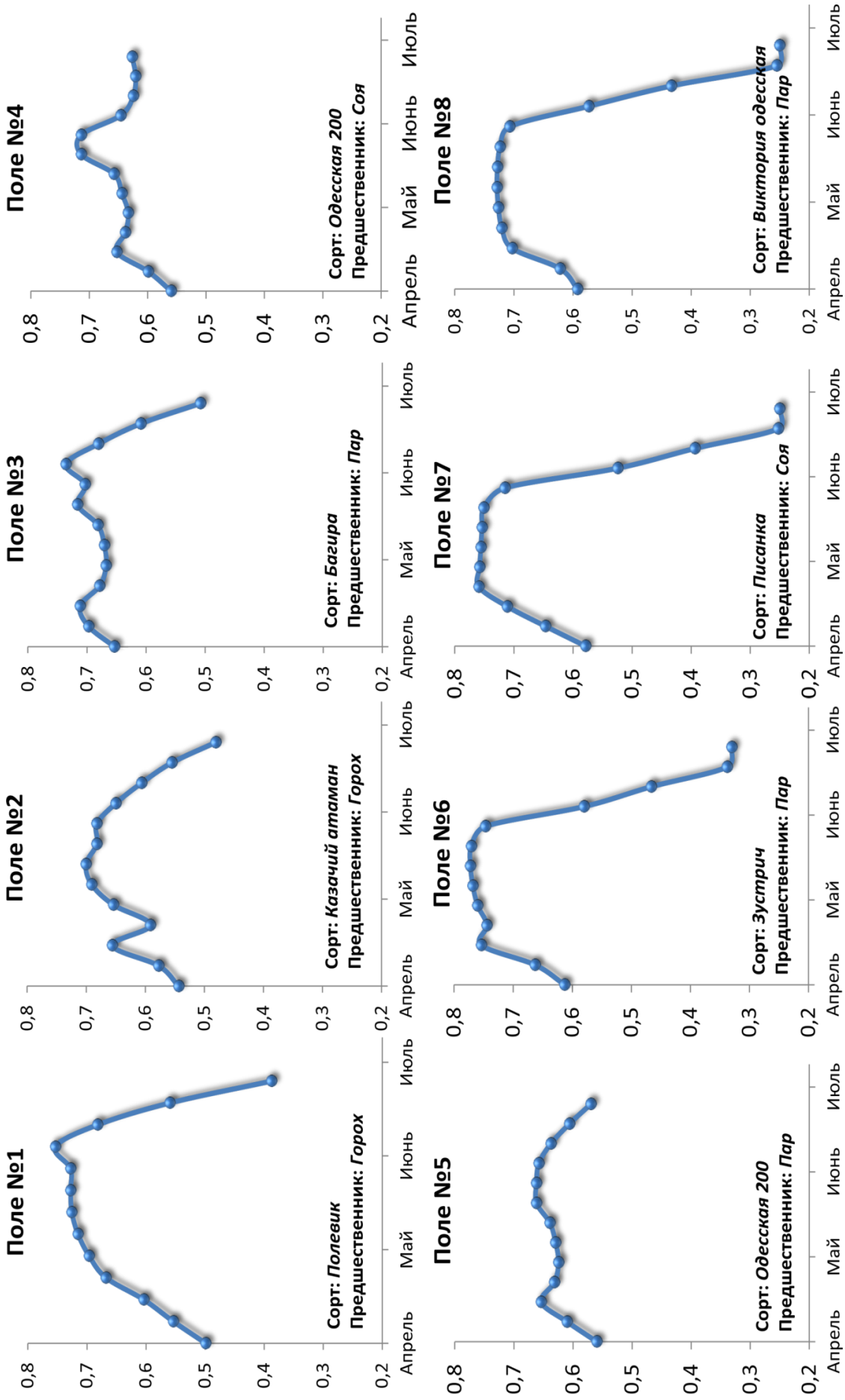


Рисунок 13 – Динамика вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы ФГБНУ Ставропольский НИИСХ, 2013г.

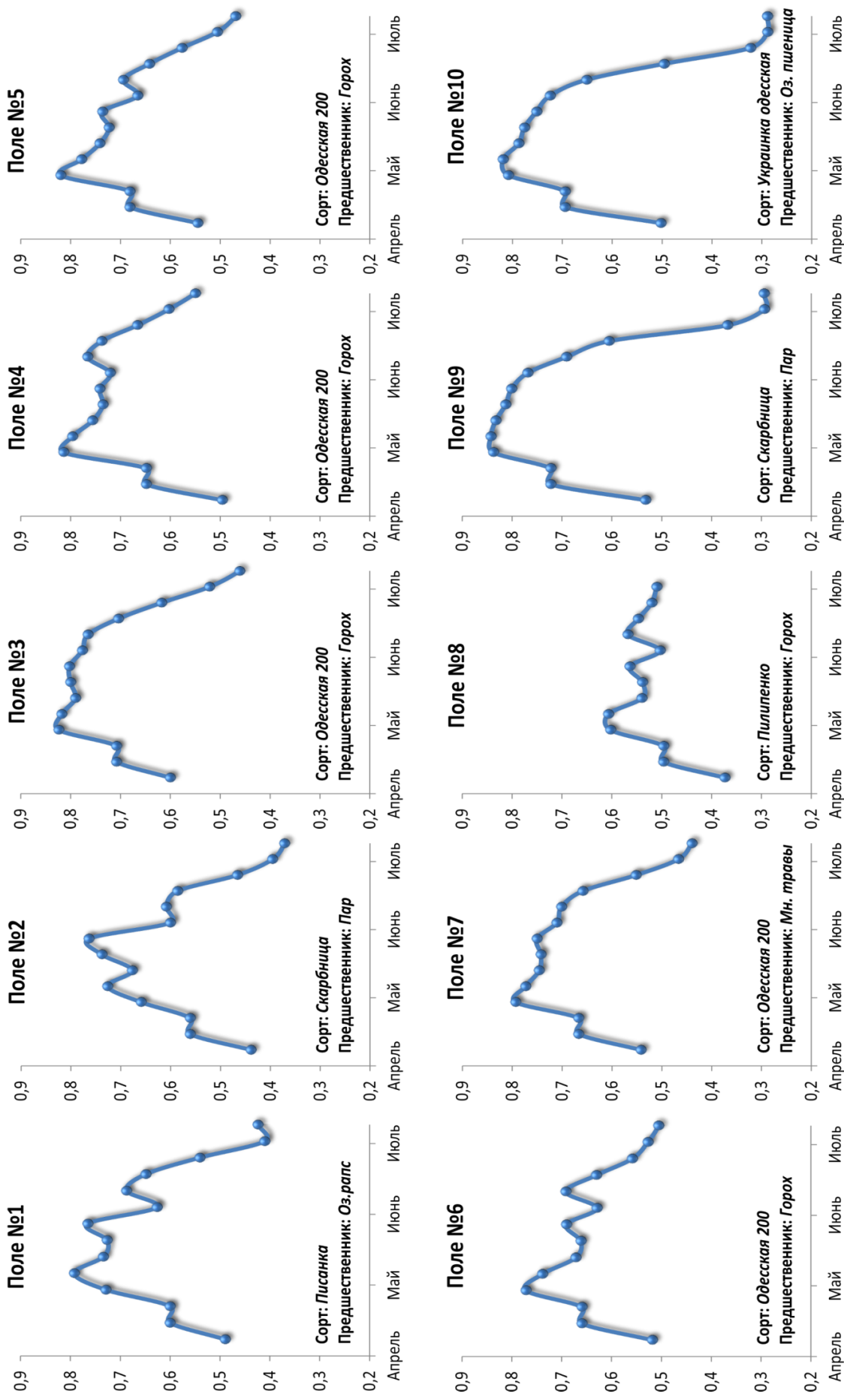


Рисунок 14 – Динамика вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы ФГБНУ Ставропольский НИИСХ, 2014г.

С возобновлением весенней вегетации наблюдается активный рост растений озимой пшеницы, что находит свое отражение в увеличении вегетационного индекса. Следует отметить, что начало роста NDVI зависит от погодных условий. Так в 2012 и в 2013 году оно приходилось на 2 апреля, а в 2014 – на 9 апреля.

Увеличение вегетационного индекса продолжается до начала фазы колошения, когда NDVI достигает своего максимального значения. В среднем по полям датами его наступления были – 21, 24 и 26 мая в 2012, 2013 и 2014 гг. соответственно. Средние значения максимумов вегетационного индекса по годам составили: в 2012 г. – 0,71, в 2013 г. – 0,73 и в 2014 году – 0,75.

Наибольшее значение $NDVI_{max}$ в 2012 году отмечалось у посева сорта Зустріч на предшественнике многолетние травы и составило величину 0,78, а наименьшие – у Ксении и Березит, которые возделывались по предшественнику озимый рапс со значением равным 0,66.

Максимальный NDVI в 2013 году изменялся в пределах от 0,66 до 0,75. Самое высокое значение $NDVI_{max}$ было на шестом поле, где возделывалась озимая пшеница сорта Зустріч по предшественнику пар, а минимальное наблюдалось у Одесской 200 по такому же предшественнику (поле №5). Самый высокий максимальный NDVI в 2014 году был у посева сорта Украинка одесская на предшественнике озимая пшеница – 0,82, а наименьшее – на поле №6 (сорт Одесская 200 по предшественнику горох) со значением 0,69.

После VIII этапа органогенеза озимой пшеницы (фаза колошение) происходит уменьшение содержания хлорофилла в органах растений при замедлении роста биомассы, что приводит к снижению вегетационного индекса, которое продолжается до фазы полной спелости. В среднем по полям полное прекращение вегетации отмечалось по следующим датам: в 2012 г. – 4 июля, в 2013 г. – 25 июня и в 2014 г. – 15 июля.

Следует отметить, что динамики NDVI посевов озимой пшеницы представляют собой пикообразную кривую, особенно явно это свойство проявлялось в 2014 году, менее – в 2013 и практически незаметным оно было в 2012 г.

Оптико-биологические свойства посевов определяются физиологическим состоянием растений, и, как уже отмечалось ранее, зависят от температурного режима. Кроме того, на рост и развитие сельскохозяйственных культур оказывает влияние влагообеспеченность и вентилируемость посевов, их обеспеченность минеральным питанием, а так же фитосанитарная обстановка и т.д. (Кулинцев В.В. с соавт., 2014г.), что, с нашей точки зрения, отражается на динамике вегетационного индекса NDVI.

В связи с этим, возникает необходимость рассмотрения механизмов взаимосвязи вегетационного индекса, как объективной характеристики оптических свойств посева, с формированием его урожая. Так как фотосинтез является наиболее существенной частью продукционного процесса, то изучение влияния размеров и продолжительности функционирования ассимиляционного аппарата на NDVI растений является важным и актуальным направлением исследований в области использования данных дистанционного зондирования Земли в биологии и сельском хозяйстве.

3.2. Площадь ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы и NDVI их посевов

В формировании урожая озимой пшеницы важную роль играет размер и продолжительность работы фотосинтетического аппарата. Из литературных данных известно, что существует зависимость между площадью листьев и урожайностью сельскохозяйственных культур (Мокроносов Т.А. и др., 2006; Ракоца Э.Ю. и др., 2006; Нешин И.В. и др., 2008; Рахимов М.М., Ниязмухамедова М.Б., 2011). Кроме того, большое значение в процессах ассимиляции растений озимой пшеницы принадлежит нелистовым органам, которое особенно велико в репродуктивный период.

Нами был проведен анализ изменений в онтогенезе площади фотосинтезирующей поверхности производственных посевов озимой пшеницы полей ФГБНУ Ставропольский НИИСХ за 2013 и 2014гг. (таблицы 5, 6 и 7).

Таблица 5 – Динамика площади ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы, 2012г., м²/м²

№ поля	Сорт	Предшественник	Орган	Дата отбора			
				09.04	30.04	21.05	04.06
1	Ксения	Озимый рапс	лист	1.3	2.36	2.75	1.55
			стебель		0.5	1.22	1.45
			колос			0.6	1.26
			растение	1.30	2.86	4.57	4.26
2	Скарбница	Пар	лист	0.87	1.5	3.69	1.79
			стебель		0.56	0.71	1.11
			колос			1.13	1.98
			растение	0.87	2.06	5.53	4.88
3	Украинка одесская	Озимая пшеница	лист	1.12	2.71	3.08	2.87
			стебель		0.45	0.75	1.27
			колос			0.33	1.16
			растение	1.12	3.16	4.16	5.3
4	Селянка одесская	Горох	лист	1.33	2.59	3.19	2.06
			стебель		0.28	1.27	1.59
			колос			0.91	1.3
			растение	1.33	2.87	5.37	4.95
5	Багира	Пар	лист	1.27	2.04	2.26	2.18
			стебель		0.2	1.53	1.64
			колос			0.92	1.09
			растение	1.27	2.24	4.71	4.91
6	Березит	Озимый рапс	лист	1.29	2.51	4.53	2.81
			стебель		0.48	0.68	1.46
			колос			0.35	1.53
			растение	1.29	2.99	5.56	5.8
7	Украинка одесская	Многолетние травы	лист	1.29	1.55	2.97	2.07
			стебель		0.13	1.1	1.34
			колос			0.28	0.55
			растение	1.29	1.68	4.35	3.96

Проведенные нами исследования показали, что наименьшая площадь ассимиляционной поверхности в 2012 году составила величину 0,87 м²/м² у сорта Скарбница, который возделывался по предшественнику пар, наибольшая – 1,33 м²/м² на поле № 4 (сорт Селянка одесская, предшественник горох).

Наименьшее значение ($1,68 \text{ м}^2/\text{м}^2$) на VI этапе органогенеза отмечалось у сорта Украинка одесская по предшественнику многолетние травы, максимальная величина этого показателя наблюдалась на третьем поле – $3,16 \text{ м}^2/\text{м}^2$ (Украинка одесская, предшественник озимая пшеница).

В колошение наибольшее значение площади ассимиляционной поверхности было у поля №6 – $5,56 \text{ м}^2/\text{м}^2$ (сорт Березит, предшественник озимый рапс), а наименьшее ($4,16 \text{ м}^2/\text{м}^2$) отмечалось у сорта Украинка одесская, который возделывался по предшественнику озимая пшеница. На X этапе наибольшее значение этого показателя отмечалось на поле № 6 – $5,80 \text{ м}^2/\text{м}^2$ (Березит по предшественнику озимый рапс), а минимальное – $3,96 \text{ м}^2/\text{м}^2$ на сорте Украинка одесская по предшественнику многолетние травы.

В условиях 2013 года в фазу весеннего кушения наименьшая площадь ассимиляционной поверхности листьев озимой пшеницы составила величину $0,95 \text{ м}^2/\text{м}^2$ у сорта Казачий атаман, который возделывался по предшественнику горох, а наибольшая – у Виктории одесской на предшественнике пар со значением $6,73 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

В фазу трубкования наименьшее значение отмечалось так же у сорта Казачий атаман на предшественнике пар ($1,41 \text{ м}^2/\text{м}^2$). Наибольшая величина этого показателя наблюдалась на шестом поле – $6,17 \text{ м}^2/\text{м}^2$ (сорт Зустрич предшественник пар).

Максимальное значение площади ассимиляционной поверхности посевов на VIII и X этапах органогенеза отмечались на поле №3 у посева сорта Багира, который возделывался по предшественнику пар – $8,23 \text{ м}^2/\text{м}^2$ и $7,33 \text{ м}^2/\text{м}^2$ соответственно, а минимальные – $2,16 \text{ м}^2/\text{м}^2$ и $1,60 \text{ м}^2/\text{м}^2$ на поле №2, где размещался посев сорта Казачий атаман по предшественнику горох.

В условиях 2014 года в фазу весеннее кушение наибольшая площадь ассимиляционной поверхности $1,50 \text{ м}^2/\text{м}^2$ наблюдалась на поле № 4 у посева сорта Одесская 200 по предшественнику горох, а минимальное – на поле №10, где возделывался сорт Украинская одесская, предшественник озимая пшеница ($0,77 \text{ м}^2/\text{м}^2$).

Таблица 6 – Динамика площади ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы, 2013г., м²/м²

№ поля	Сорт	Предшественник	Орган	Дата отбора			
				09.04	30.04	21.04	04.06
1	Полевик	Горох	лист	2,37	2,76	2,30	1,52
			стебель		0,63	1,23	0,79
			колос			0,86	1,19
			растение	2,37	3,39	4,39	3,51
2	Казачий атаман	Горох	лист	0,95	1,20	1,06	0,42
			стебель		0,21	0,59	0,42
			колос			0,51	0,76
			растение	0,95	1,41	2,16	1,60
3	Багира	Пар	лист	5,93	4,93	4,32	2,85
			стебель		1,13	2,49	1,78
			колос			1,42	2,70
			растение	5,93	6,06	8,23	7,33
4	Одесская 200	Соя	лист	1,66	2,35	1,92	0,55
			стебель		0,37	0,71	0,47
			колос			0,85	1,45
			растение	1,66	2,71	3,48	2,47
5	Одесская 200	Пар	лист	4,39	3,71	3,80	1,73
			стебель		0,86	1,89	1,23
			колос			1,28	2,12
			растение	4,39	4,57	6,97	5,08
6	Зустріч	Пар	лист	5,86	4,98	4,60	1,31
			стебель		1,20	1,79	1,19
			колос			1,38	2,42
			растение	5,86	6,17	7,78	4,93
7	Писанка	Соя	лист	1,92	1,70	1,21	0,41
			стебель		0,29	0,55	0,39
			колос			0,57	1,26
			растение	1,92	1,98	2,32	2,06
8	Виктория одесская	Пар	лист	4,73	4,57	2,77	0,91
			стебель		1,09	1,55	0,95
			колос			1,17	1,81
			растение	4,73	5,66	5,49	3,66

На IV этапе органогенеза наименьшее значение площади ассимиляционной поверхности отмечалось на десятом поле (сорт Украинка одесская предшественник озимая пшеница) – 1,24 м²/м², а максимальное – на шестом поле (4,09 м²/м²), где возделывался сорт Одесская 200 по предшественнику горох.

Таблица 7 – Динамика площади ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы, 2014 г., м²/м²

№ поля	Сорт	Предшественник	Орган	Дата отбора			
				09.04	30.04	21.04	04.06
1	Писанка	Озимый рапс	лист	1,41	2,90	3,68	2,21
			стебель		0,38	1,57	1,85
			колос			1,55	1,67
			растение	1,41	3,28	6,80	5,73
2	Скарбница	Пар	лист	1,37	2,13	5,61	2,74
			стебель		0,36	1,23	1,63
			колос			1,45	2,02
			растение	1,37	2,48	8,29	6,39
3	Одесская 200	Горох	лист	1,42	3,31	3,69	2,76
			стебель		0,42	1,24	1,90
			колос			1,79	2,04
			растение	1,42	3,73	6,72	6,71
4	Одесская 200	Горох	лист	1,50	2,89	4,15	2,71
			стебель		0,61	1,31	1,92
			колос			2,05	2,60
			растение	1,50	3,50	7,51	7,23
5	Одесская 200	Горох	лист	1,42	2,39	3,53	2,51
			стебель		0,30	1,07	1,81
			колос			1,82	1,90
			растение	1,42	2,69	6,43	6,22
6	Одесская 200	Горох	лист	1,44	3,48	4,96	2,75
			стебель		0,61	1,50	3,21
			колос			2,34	2,84
			растение	1,44	4,09	8,80	8,80
7	Одесская 200	Многолетние травы	лист	1,40	1,69	3,46	1,75
			стебель		0,30	1,03	1,27
			колос			1,82	1,92
			растение	1,40	1,99	6,31	4,64
8	Пилипенко	Горох	лист	0,80	1,20	1,96	1,29
			стебель		0,19	0,70	1,15
			колос			0,71	0,75
			растение	0,80	1,39	3,37	3,20
9	Скарбница	Пар	лист	1,43	2,57	4,23	2,55
			стебель		0,59	1,32	2,97
			колос			2,22	2,88
			растение	1,43	3,15	7,78	7,39
10	Украинка одесская	Озимая пшеница	лист	0,77	1,03	3,06	1,84
			стебель		0,21	0,94	1,51
			колос			1,47	1,54
			растение	0,77	1,24	5,48	4,88

В среднем за 2013 год площадь ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы в фазе весеннее кушение составила величину $3,72 \text{ м}^2/\text{м}^2$, что значительно выше, чем в 2014 году ($1,30 \text{ м}^2/\text{м}^2$). На VI этапе величина этого показателя были равны $4,00 \text{ м}^2/\text{м}^2$ и $2,76 \text{ м}^2/\text{м}^2$ для 2013 и 2014гг. соответственно. В фазу колошения средние значения площади 2014 года были выше на 1,65 по сравнению с 2013г. ($5,10 \text{ м}^2/\text{м}^2$). В фазу налива зерна площадь ассимиляционной поверхности в среднем по полям в 2014г. была $6,12 \text{ м}^2/\text{м}^2$, что на $2,29 \text{ м}^2/\text{м}^2$ выше, чем в 2013г. ($3,83 \text{ м}^2/\text{м}^2$).

Преимущество в величине площади ассимиляционной поверхности посевов озимой пшеницы в 2014г, по сравнению с 2013г. объясняется влиянием погодных условий. Так температура воздуха за период апрель-июнь в 2013 году была выше на $1,2^\circ\text{C}$, чем в за этот же период 2014г. В то же время, количество осадков за весенне-летний период 2013 года было на 12,7 мм меньше по сравнению с 2014 годом, и составило величины 73,0 и 85,7 мм соответственно. Таким образом, благоприятные погодные условия (температурный и водный режимы) во время вегетации 2014 года способствовали формированию посевов с мощно развитым ассимиляционным аппаратом, по сравнению с 2013 годом.

Площадь ассимиляционной поверхности является важной составляющей оптико-биологических свойств посевов сельскохозяйственных культур (Нешин И.В. и др., 2008; Ерошенко Ф.В., 2010). При характеристике размеров фотосинтетического аппарата часто используют такой показатель как листовой индекс (ЛИ) – площадь листового аппарата 1 м^2 посева. Поэтому нами была изучена взаимосвязь этого показателя с вегетационным индексом NDVI (рисунок 15). Проведенный анализ показал (Yeroshenko F.V, Storck I.G, 2014; Ерошенко Ф.В., Сторчак И.Г., 2014), что коэффициенты корреляции между этими характеристиками оптико-биологических свойств посева в условиях 2012 года изменялись от 0,39 до 0,99 (средние значения по всем полям равно 0,74). В 2013 году находились в пределах от -0,93 до 0,22. Практически все значения полученного показателя были отрицательными, за исклю-

чением полей 2, 4 и 8, у которых R_{corr} составлял величины 0,07, 0,08 и 0,22 соответственно. Среднее его значение по всем полям было равно -0,54.

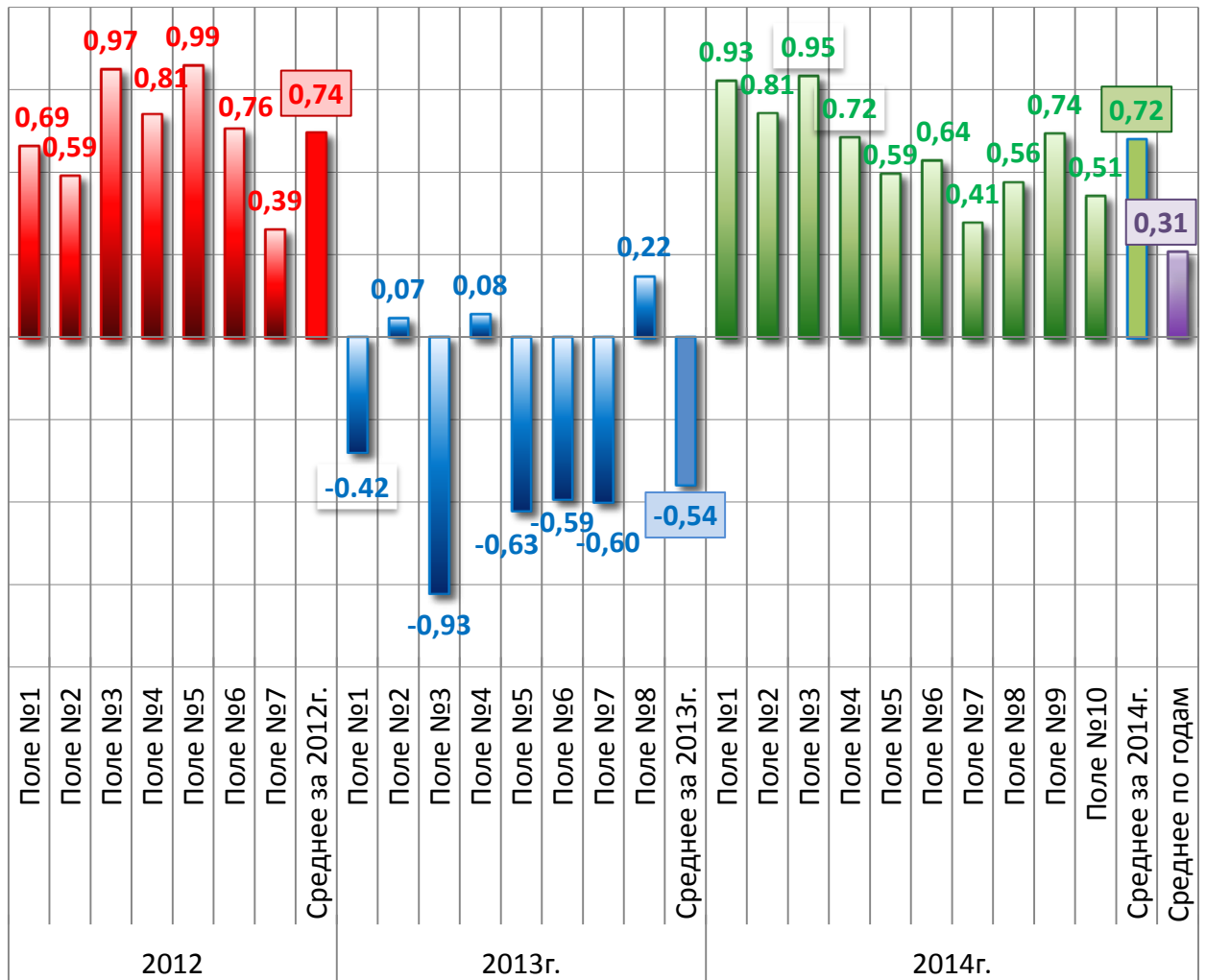


Рисунок 15 – Коэффициенты корреляции между площадью листовой поверхности посевов озимой пшеницы и их NDVI.

В условиях 2014 года коэффициенты корреляции между площадью листовой поверхностью посевов озимой пшеницы и их NDVI по полям изменялись от 0,41 (поле №7) до 0,95 (поле №3). В среднем за годы проведения исследований этот показатель составил величину 0,72.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что связь между NDVI и листовым индексом крайне нестабильна и сильно зависит от погодных условий. В благоприятных по водному и температурному режиму условиях (2014г.) она довольно высока (коэффициент корреляции составляет 0,72), а в стрессовых условиях (в 2013г., когда

наблюдался дефицит осадков и высокие температуры в период вегетации) – полностью отсутствует (коэффициент корреляции равен -0,54).

Полученные результаты можно объяснить тем, что при воздействии неблагоприятных факторов окружающей среды формируются слаборазвитые растения с небольшой площадью фотосинтетической поверхности, что уменьшает затенение внутренней части посева листьями верхних ярусов. Как следствие, в поглощенной посевом приходящей фотосинтетически активной радиации увеличивается доля, которая усваивается нелистовыми органами (стебли и колосья), которые по литературным данным играют важную роль в фотосинтезе озимой пшеницы. Особо их значимость увеличивается в неблагоприятных условиях выращивания (Тарчевский И.А., 2001; Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А., 2000). Такие же результаты получены и в наших опытах (таблица 8).

Таблица 8 – Площади ассимиляционной поверхности различных органов растений озимой пшеницы в период налива зерна в среднем по полям для 2013 и 2014гг.

Орган растения	2012г.		2013г.		2014г.	
	м ² /м ²	%	м ² /м ²	%	м ² /м ²	%
Листья	2,19	44,97	1,21	31,7	2,31	37,8
Стебли	1,41	28,95	0,90	23,6	1,92	31,4
Колосья	1,27	26,08	1,71	44,8	1,89	30,8
Растения	4.87	100	3,83	100,0	6,12	100,0

В благоприятном для роста и развития растений озимой пшеницы 2014 году средняя по всем полям площадь ассимиляционной поверхности в налив зерна была на 59,8% больше, чем в 2013 году. Кроме того, размеры фотосинтезирующей поверхности листовых пластинок в 2013 году были на 47,5% меньше, чем в 2014. Анализ данных по структуре общей ассимиляционной

площади растений озимой пшеницы показал, что с ухудшением условий выращивания снижается доля листовых пластинок. Так если в 2014 году их площадь составляла 37,8% от всей поверхности, то в 2013 году – 31,7%.

В связи с этим, нами была изучена связь NDVI с общей площадью ассимиляционной поверхности (листья, стебли и колосья) посевов озимой пшеницы (рисунок 16).

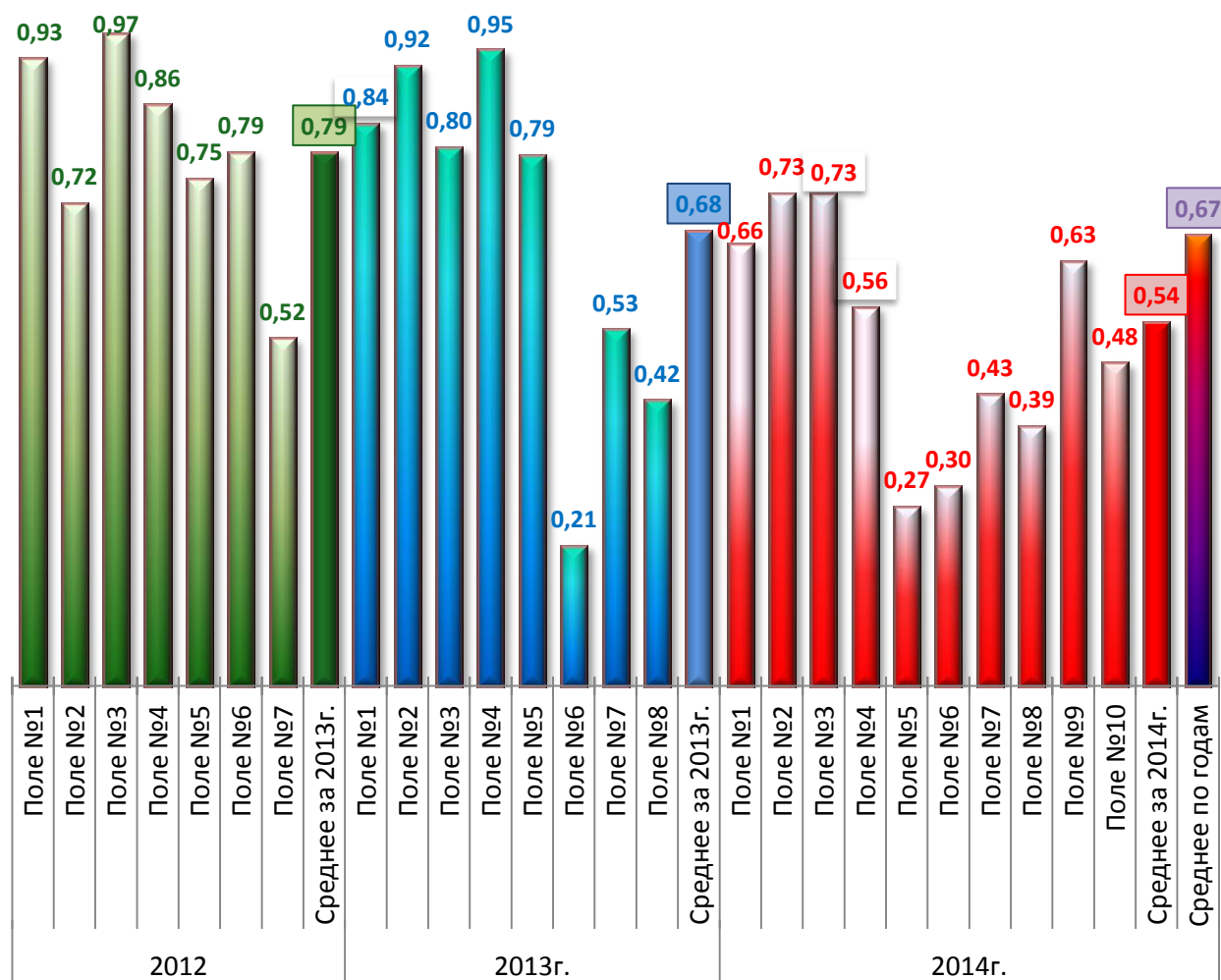


Рисунок 16 – Коэффициенты корреляции между площадью ассимиляционной поверхностью посевов озимой пшеницы и их NDVI

Анализ полученных данных показал, что в 2012 году коэффициенты корреляции между площадью ассимиляционной поверхности посевов озимой пшеницы и NDVI изменялись в пределах от 0,52 (поле №7) до 0,97 – поле №3. Среднее значения по полям составило величину 0,79.

Максимальный коэффициент корреляции в условиях 2013 года составил величину 0,95 на поле №4, а минимальный на шестом поле – 0,21. Среднее значение этого показателя по всем полям в этот год был равен 0,68.

Следует отметить, что коэффициент корреляции между NDVI и площадью ассимиляционной поверхности в рассматриваемом году только у двух полей был меньше 0,5 (поля 6 и 8). Если для поля №8 $R_{\text{corr.}}=0,48$, то для поля №6 – всего 0,21. Такой низкий коэффициент корреляции у последнего можно объяснить тем, что его посев в 2013 году был сильнее остальных поражен вирусом желтой карликовости ячменя, что привело к изменению пигментации растений. А так как NDVI – это математическое выражение, отражающее определенное соотношение коэффициентов поглощения в красной и ближней инфракрасной областях спектра электромагнитных волн, то на полученные величины вегетационного индекса поля №8 оказало влияние пожелтение растений из-за действия вируса.

Коэффициент корреляции между NDVI и общей площадью ассимиляционной поверхности в условиях 2014 года изменялся в пределах 0,27 – 0,73. Минимальное его значение отмечалось на пятом поле, а максимальное – на втором и третьем. Среднее значение $R_{\text{corr.}}$ в 2014г. было на 20,1% меньше чем в 2013г. и составило величину равную 0,54.

Таким образом, в наших опытах с улучшением условий выращивания взаимосвязь между вегетационным индексом NDVI и общей площадью ассимиляционной поверхности посевов озимой пшеницы снижалась.

Полученные результаты можно объяснить там, что с улучшением водного и температурного режимов выращивания увеличиваются как сами размеры фотосинтезирующей поверхности, так и доля площади листового аппарата в ней. Следовательно, в этом случае участие нелистовых органов растений в усвоении приходящей солнечной радиации снижается. Как следствие, в 2014 году нами были получены более низкие коэффициенты корреляции NDVI посевов озимой пшеницы с их общей площадью ассимиляционной по-

верхности, чем в 2013, а с размерами только листового аппарата – наблюдалась обратная закономерность.

Нами была изучена связь вегетационного индекса посева с размерами его фотосинтетической поверхности на различных этапах роста и развития растений озимой пшеницы. Исследования показали (рисунок 17), что при возобновлении весенней вегетации коэффициент корреляции между NDVI и площадью ассимиляционной поверхности в среднем за годы исследований составляет величину 0,59. В фазу трубкования значения R_{corr} равен 0,42. Дальнейшее развитие посевов озимой пшеницы сопровождалось снижением этого показателя: в колошение и в налив зерна коэффициент корреляции между площадью ассимиляционной поверхности и NDVI равен 0,33 и 0,35 соответственно.

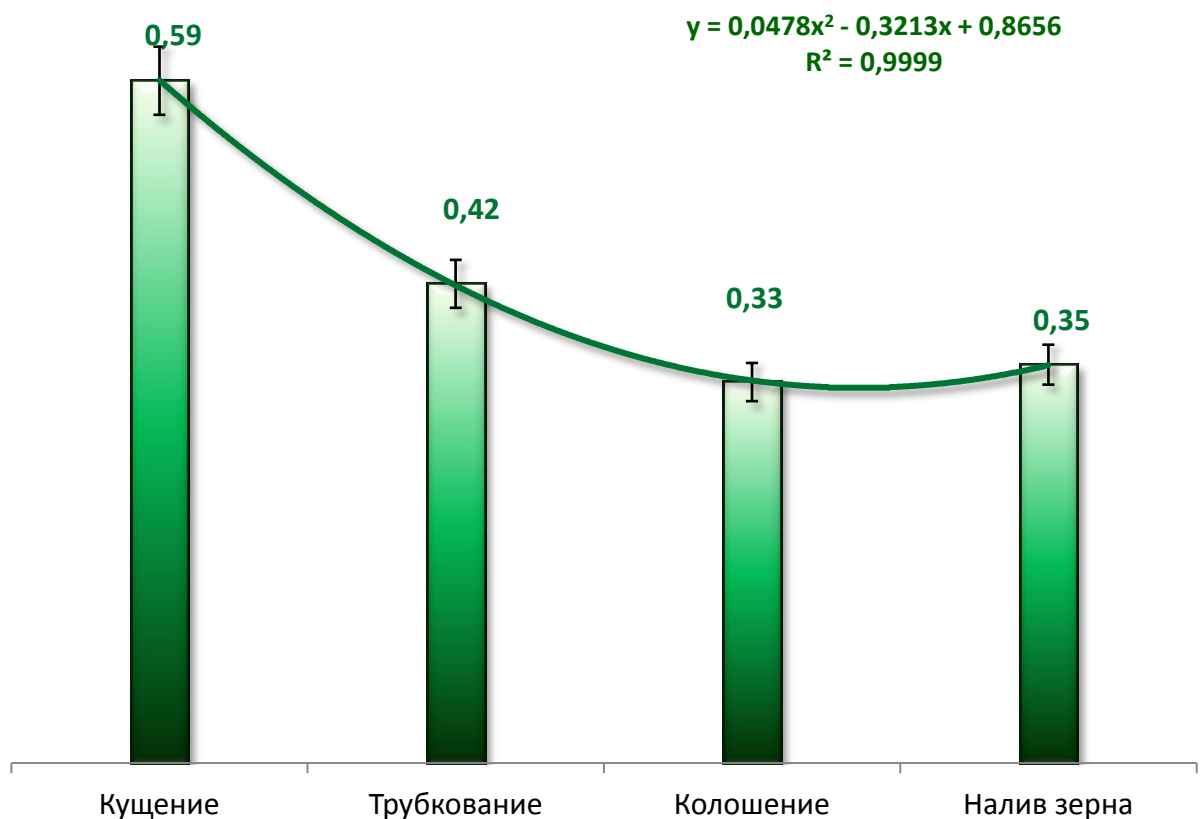


Рисунок 17 – Коэффициенты корреляции между площадью ассимиляционной поверхностью посевов и их NDVI по фазам развития растений озимой пшеницы (в среднем за годы исследований)

Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о том, что с ростом и развитием растений наблюдается снижение коэффициента корреляции между вегетационным индексом и площадью ассимиляционной поверхности посевов озимой пшеницы, что наглядно демонстрирует построенная линия тренда.

Полученные данные объясняются тем, что на ранних этапах органогенеза озимой пшеницы сортовые и технологические особенности практически не влияют на физиологическое состояние посевов, а, следовательно, на их оптико-биологические свойства. Дальнейший рост и развитие растений сопровождается нарастанием проявлений таких особенностей – это высота посева, его густота и биомасса, ориентация листьев, разновидность колоса (*lutescens*, *erythrospermum*) и другие, включая диаметр стебля и толщину кутикулярного слоя листьев.

Таким образом, существует взаимосвязь между площадью ассимиляционной поверхности и вегетационным индексом NDVI посевов озимой пшеницы, которая оценивается коэффициентом корреляции равным 0,61 (в среднем за годы исследований). С улучшением условий выращивания R_{corr} снижается.

3.3. Содержание хлорофилла в растениях озимой пшеницы и NDVI их посевов

Считается, что содержание хлорофилла и фотосинтетические показатели, рассчитанные по их количеству в органах растений наиболее точно характеризуют продукционный процесс сельскохозяйственных культур (Хотулев В.Я., 1985; Дуденко Н.В., 2001; Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А., 2000; Ерошенко Ф.В., 2006).

Нами была изучена динамика относительного содержания хлорофилла в растениях озимой пшеницы, выращенных в условиях производства на полях СНИИСХ. Проведенные нами исследования показали, что в условиях

2012 года наибольшее его количество отмечалось в фазу весенние кушение на посевах сорта Багира, который возделывался по предшественнику пар (4,98 мг/г), а наименьшее (3,45 мг/г) – сорта Украинка одесская, предшественник озимая пшеница (табл. 9).

Таблица – 9 Динамика относительного содержания хлорофилла (a+b) в растениях посевов озимой пшеницы, 2012г., мг/г

№ поля	Сорт	Предшественник	Орган	Дата отбора			
				09.04	30.04	21.05	04.06
1	Ксения	Озимый рапс	лист	4,55	4,35	4,05	3,27
			стебель		0,47	0,26	0,10
			колос			1,03	0,98
			растение	4,55	2,16	1,23	0,68
2	Скарбница	Пар	лист	3,73	3,28	3,19	3,07
			стебель		0,42	0,35	0,21
			колос			0,46	0,35
			растение	3,73	1,43	1,44	0,61
3	Украинка одесская	Озимая пшеница	лист	3,45	3,24	4,20	0,64
			стебель		0,38	0,71	0,31
			колос			1,27	0,27
			растение	3,45	1,13	1,66	0,33
4	Селянка одесская	Горох	лист	4,95	4,19	5,25	3,10
			стебель		0,43	0,49	0,69
			колос			1,27	0,15
			растение	4,95	1,02	1,54	0,78
5	Багира	Пар	лист	4,98	4,64	5,12	4,50
			стебель		0,47	0,61	0,84
			колос			1,04	0,39
			растение	4,98	2,19	1,79	1,00
6	Березит	Озимый рапс	лист	4,82	4,24	5,48	2,34
			стебель		0,35	0,57	0,87
			колос			1,12	0,51
			растение	4,82	1,61	1,98	0,89
7	Украинка одесская	Многолетние травы	лист	3,45	3,10	3,05	1,17
			стебель		0,26	0,64	0,35
			колос			0,27	0,13
			растение	3,45	1,10	1,05	0,34
СРЕДНЕЕ				4,28	1,52	1,53	0,66

В фазу трубкования наибольшее значение этого показателя отмечалось, у сорта Багира по предшественнику пар и составило величину 2,19 мг/г, наименьшее – 1,02 мг/г у сорта Селянка одесская, предшественник горох.

На VIII этапе органогенеза максимальное содержание хлорофилла было на шестом поле, где возделывался сорт Березит по озимому рапсу (1,98 мг/г), минимальное – 1,05 мг/г на поле №7 (сорт Украинка одесская, предшественник многолетние травы).

В фазу налива зерна наибольшее значение этого показателя было у сорта Багира, предшественник пар (0,89 мг/г), наименьшее (0,33 мг/г) отмечалось у растений сорта Украинка одесская (по предшественнику озимая пшеница).

Таким образом, относительное содержание хлорофилла в растениях озимой пшеницы в среднем за 2012 год составило величины 4,28, 1,52, 1,53 и 0,66 в фазы весеннее кущение, трубкование, колошение и налив зерна соответственно.

Исследования показали, что в условиях 2013 года наибольшее его количество отмечалось в период возобновления вегетации у растений сорта Одесская 200 на предшественнике соя 5,26 мг/г, а наименьшее – Писанка, предшественник соя, 3,58 мг/г (таблица 10). В трубкование максимальная величина этого показателя в листьях отмечалась у сорта Полевик, который возделывался на предшественнике горох, и составил величину 5,63 мг/г, минимальная – 3,09 мг/г у сорта Писанка (предшественник соя). Наибольшее содержание хлорофилла в стеблях на VI этапе органогенеза было на поле №1 (сорт Полевик, предшественник горох), а наименьшее – у сорта Писанка, предшественник соя (0,28 мг/г). В фазу колошения содержание хлорофилла в растениях озимой пшеницы изменялось от 0,85 мг/г (поле №2) до 2,35 мг/г (поле №4). В листьях минимальное значение этого показателя отмечалось у сорта Писанка и составляло величину 3,08 мг/г, максимальное – 6,19 мг/г у сорта Зустрич, предшественник пар. В стеблях и колосьях наибольшее содержание хлорофилла отмечалось у сорта Одесская 200 и составило величину

ну 0,92 мг/г и 1,36 мг/г соответственно, а наименьшее – в стеблях у сорта Казачий атаман (0,32 мг/г), в колосьях – у сорта Писанка (0,30 мг/г).

Таблица – 10 Динамика относительного содержания хлорофилла (а+в) в растениях посевов озимой пшеницы, 2013г., мг/г

№ поля	Сорт	Предшественник	Орган	Фазы развития			
				кущение	трубкование	колошение	налив зерна
1	Полевик	Горох	лист	4,57	5,63	4,27	3,12
			стебель		0,68	0,61	0,64
			колос			1,08	0,36
			растение	4,57	3,16	1,30	0,88
2	Казачий атаман	Горох	лист	3,91	3,78	3,21	3,26
			стебель		0,35	0,32	0,82
			колос			0,76	0,31
			растение	3,91	2,12	0,85	0,78
3	Багира	Пар	лист	4,86	4,63	5,80	0,82
			стебель		0,43	0,72	0,28
			колос			1,25	0,22
			растение	4,86	2,27	1,64	0,32
4	Одесская 200	Соя	лист	5,26	4,31	5,58	3,06
			стебель		0,54	0,92	0,76
			колос			1,36	0,19
			растение	5,26	2,62	2,35	0,64
5	Одесская 200	Пар	лист	4,81	4,71	5,24	4,56
			стебель		0,49	0,65	0,96
			колос			1,07	0,44
			растение	4,81	2,36	1,51	1,13
6	Зустріч	Пар	лист	5,01	4,31	6,19	2,56
			стебель		0,43	0,76	0,90
			колос			1,04	0,43
			растение	5,01	2,17	1,84	0,83
7	Писанка	Соя	лист	3,58	3,09	3,08	1,07
			стебель		0,28	0,72	0,32
			колос			0,30	0,12
			растение	3,58	1,63	0,99	0,26
8	Виктория одесская	Пар	лист	4,79	3,90	4,59	1,53
			стебель		0,31	0,56	0,45
			колос			0,60	0,18
			растение	4,79	1,84	1,21	0,41
СРЕДНЕЕ				4,60	2,27	1,46	0,66

На XI этапе органогенеза максимальные значения содержания хлорофилла было в органах растений на поле №5 (Одесская 200) и составило величины в побеге – 1,13 мг/г, в листьях – 4,56 мг/г, в стеблях – 0,96 мг/г, в колосьях – 0,44 мг/г. Минимальное содержание зеленых пигментов в побегах, стеблях и колосьях отмечалось у сорта Писанка (поле №7) – 0,26, 0,32 и 0,12 мг/г соответственно, а в листьях у сорта Багира – 0,82 мг/г.

Таким образом, относительное содержание хлорофилла в растениях озимой пшеницы в среднем за 2013 год составило величины 4,60, 2,27, 1,46 и 0,66 мг/г в фазы весеннее кущение, трубкование, колошение и налив зерна соответственно.

В условиях 2014 года в период кущения количество хлорофилла в единице биомассы изменялось в пределах от 3,58 мг/г (сорт Пилипенко, предшественник горох) до 5,61 мг/г (сорт Писанка, предшественник озимый рапс) (таблица 11). На VII этапе органогенеза наибольшие значения относительного содержания хлорофилла в растениях отмечалось на поле № 2, где возделывался сорт Скарбница на предшественнике пар, и составило величину 3,67 мг/г. Минимальные величины относительного содержания хлорофилла для листьев, стеблей, колосьев и всего растения наблюдалось на восьмом поле, где возделывался сорт Пилипенко на предшественнике горох – 3,67, 0,50, 0,97 и 1,22 мг/г соответственно. В фазу колошения максимальные значения относительного содержания хлорофилла отмечались у сорта Одесская 200 на предшественнике горох и составляли величины 3,18 мг/г в растении, 4,11 мг/г в листьях и 1,00 в стеблях. Наименьшее значение этого показателя в растениях наблюдалось на поле №4 у сорта Пилипенко, который возделывался по предшественнику горох, в листьях – 2,76 мг/г, стеблях – 0,30 мг/г. Наибольшие значения относительного содержания хлорофилла в фазу налива зерна для всего растения и листьев отмечалось у сорта Скарбница на предшественнике пар и составило величины 1,75 и 6,20 мг/г соответственно. Для стеблей и колосьев у сорта Одесская 200 – 1,27 и 1,70 мг/г (поля №4 и №7). Наименьшие величины этого показателя отмечались на восьмом поле, в рас-

тениях – 0,48 мг/г, в листьях – 2,12 мг/г, в стеблях – 0,28 мг/г и в колосьях – 0,48 мг/г.

Таким образом, относительное содержание хлорофилла в растениях озимой пшеницы в среднем за 2014 год составило величины 4,84, 1,59, 2,67 и 1,29 мг/г в фазы весеннее кущение, трубкование, колошение и налива зерна, что в среднем за вегетацию на 15,6% больше, чем в 2013 году. Полученные результаты свидетельствуют о том, что большое влияние на синтез зеленых пигментов оказывают условия выращивания.

Существует несколько показателей, связанных с хлорофиллом, характеризующих фотосинтетический аппарат растений: относительное содержание зеленых пигментов в единице биомассы – мг/г, в единице площади ассимиляционной поверхности – мг/дм², а так же валовое их количество на 1 квадратном метре посева – г/м² (таблицы 12, 13, 14). Анализ представленных данных говорит о том, что все значения этих показателей меняются не только в зависимости от выбранного поля и даты отбора, но и сам характер их динамик во время роста и развития растений озимой пшеницы неодинаков.

Считается (Шуркина А.И., 2007), что вегетационный индекс NDVI должен быть связан с содержанием в растениях хлорофилла из-за того, что в его формуле присутствует величина коэффициента отражения посева в красной области спектра электромагнитных волн, в которой находится один из максимумов поглощения зеленых пигментов. Действительно, как уже отмечалось, исследователями Японии (Kodani E., et. all., 2002) была установлена связь NDVI с сезонными изменениями содержания хлорофилла в листьях деревьев. К сожалению, этот анализ был проведен по наблюдениям только одного объекта (буковая роща) и без учета влияния различных условий выращивания на полученные результаты. С практической точки зрения, такие исследования важны и необходимы, так как они позволят более детально раскрыть некоторые механизмы взаимосвязи данных дистанционного зондирования Земли из космоса с продукционным процессом сельскохозяйственных культур.

Таблица – 11 Динамика относительного содержания хлорофилла (a+b) в растениях посевов озимой пшеницы, 2014г., мг/г

№ поля	Сорт	Предшественник	Орган	Дата отбора			
				09.04	30.04	21.05	04.06
1	Писанка	Озимый рапс	лист	5,61	8,28	3,45	5,68
			стебель		1,17	0,64	1,26
			колос		1,67		0,95
			растение	5,61	2,97	1,86	1,65
2	Скарбница	Пар	лист	4,92	7,78	3,58	6,20
			стебель		0,96	0,67	1,14
			колос		1,35		0,89
			растение	4,92	3,67	1,85	1,75
3	Одесская 200	Горох	лист	3,93	7,46	3,05	4,90
			стебель		1,15	1,00	0,89
			колос		1,60		0,61
			растение	3,93	2,74	1,59	1,26
4	Одесская 200	Горох	лист	4,35	8,80	4,11	5,43
			стебель		1,45	0,45	1,27
			колос		2,06		0,64
			растение	4,35	3,11	1,07	1,09
5	Одесская 200	Горох	лист	5,55	8,16	4,11	5,10
			стебель		1,36	0,54	0,95
			колос		1,81		0,66
			растение	5,55	3,18	2,27	1,22
6	Одесская 200	Горох	лист	5,03	8,27	3,15	4,21
			стебель		1,52	0,49	0,76
			колос		1,52		0,56
			растение	5,03	3,05	1,53	1,10
7	Одесская 200	Многолетние травы	лист	5,40	4,31	2,85	3,85
			стебель		1,24	0,43	0,73
			колос		1,78		1,70
			растение	5,40	2,01	1,33	1,33
8	Пилипенко	Горох	лист	3,58	3,67	2,76	2,12
			стебель		0,50	0,30	0,28
			колос		0,97		0,48
			растение	3,58	1,22	1,48	0,48
9	Скарбница	Пар	лист	5,31	8,56	3,60	4,80
			стебель		1,08	0,42	0,99
			колос		1,47		0,76
			растение	5,31	2,57	1,50	1,42
10	Украинка одесская	Озимая пшеница	лист	4,76	6,30	2,83	4,14
			стебель		0,86	0,32	0,90
			колос		1,46		0,58
			растение	4,76	2,15	1,43	1,05
СРЕДНЕЕ				4,84	2,67	1,24	1,24

Таблица 12 – Хлорофилловые показатели, характеризующие фотосинтетический аппарат растений озимой пшеницы и их посевов, 2012г.

№ поля	Сорт, предшественник	Дата отбора			
		09.04	30.04	21.05	04.06
<i>Количество хлорофилла в растениях на единице площади посева (г/м²)</i>					
1	Украинка од., горох	0,19	0,40	0,64	0,69
2	Скарбница, горох	0,16	0,22	0,98	0,54
3	Багира, соя	0,15	0,31	0,94	0,33
4	Писанка, пар	0,20	0,53	1,04	1,00
5	Виктория одесская, пар	0,21	0,28	0,84	0,87
6	Украинка одесская, пар	0,21	0,36	1,44	1,08
7	Зустрич, горох	0,17	0,16	0,55	0,29
<i>Количество хлорофилла в единице площади растения (мг/дм²)</i>					
1	Украинка од., горох	1,46	1,40	1,40	1,62
2	Скарбница, горох	1,85	1,07	1,77	1,11
3	Багира, соя	1,34	0,98	2,26	0,62
4	Писанка, пар	1,51	1,85	1,94	2,02
5	Виктория одесская, пар	1,66	1,25	1,78	1,77
6	Украинка одесская, пар	1,63	1,20	2,59	1,86
7	Зустрич, горох	1,31	0,95	1,26	0,73
<i>Количество хлорофилла в единице биомассы растений (мг/г)</i>					
1	Украинка од., горох	4,55	2,16	1,23	0,68
2	Скарбница, горох	3,73	1,43	1,44	0,61
3	Багира, соя	3,45	1,13	1,66	0,33
4	Писанка, пар	4,95	1,02	1,54	0,78
5	Виктория одесская, пар	4,98	2,19	1,79	1,00
6	Украинка одесская, пар	4,82	1,61	1,98	0,89
7	Зустрич, горох	3,45	1,10	1,05	0,34

Нами был проведен анализ корреляционной связи между хлорофилловыми показателями растений и посевов озимой пшеницы и их NDVI для набора полей при разных технологических (сорт, предшественник, удобрения) и погодных (2012, 2013 и 2014гг) условиях выращивания. Полученные результаты свидетельствуют о том, что такая взаимосвязь неоднозначна как по показателям и объектам, так и по годам.

Таблица 13 – Хлорофилловые показатели, характеризующие фотосинтетический аппарат растений озимой пшеницы и их посевов, 2013г.

№ поля	Сорт	Предшественник	Дата отбора			
			09.04	30.04	21.05	04.06
<i>Количество хлорофилла в растениях на единице площади посева (г/м²)</i>						
1	Полевик	горох	0,60	0,93	0,89	0,62
2	Казачий атаман	горох	0,19	0,26	0,36	0,33
3	Багира	пар	1,68	1,15	2,23	0,50
4	Одесская 200	соя	0,41	0,56	1,17	0,46
5	Одесская 200	пар	1,01	0,96	2,05	1,23
6	Зустріч	пар	1,34	1,17	2,01	0,97
7	Писанка	соя	0,37	0,31	0,45	0,15
8	Виктория од.	пар	1,69	0,95	1,20	0,38
<i>Количество хлорофилла в единице площади растения (мг/дм²)</i>						
1	Полевик	горох	2,51	2,75	2,02	1,75
2	Казачий атаман	горох	2,00	1,84	1,66	2,07
3	Багира	пар	2,83	1,90	2,71	0,68
4	Одесская 200	соя	2,47	2,06	3,37	1,88
5	Одесская 200	пар	2,31	2,11	2,94	2,43
6	Зустріч	пар	2,28	1,84	2,58	1,96
7	Писанка	соя	1,92	1,58	1,93	0,74
8	Виктория од.	пар	2,51	2,75	2,02	1,75
<i>Количество хлорофилла в единице биомассы растений (мг/г)</i>						
1	Полевик	горох	4,58	3,16	1,30	0,88
2	Казачий атаман	горох	3,91	2,12	0,85	0,78
3	Багира	пар	4,86	2,27	1,64	0,32
4	Одесская 200	соя	5,26	2,62	2,35	0,65
5	Одесская 200	пар	4,81	2,36	1,51	1,13
6	Зустріч	пар	5,01	2,17	1,84	0,83
7	Писанка	соя	3,59	1,63	0,99	0,26
8	Виктория од.	пар	4,79	1,84	1,21	0,41

Таблица 14 – Хлорофилловые показатели, характеризующие фотосинтетический аппарат растений озимой пшеницы и их посевов, 2014г.

№ поля	Сорт	Предшественник	Дата отбора			
			09.04	09.04	09.04	09.04
<i>Количество хлорофилла в растениях на единице площади посева (г/м²)</i>						
1	Писанка	оз. рапс	0,29	0,42	1,82	1,78
2	Скарбница	пар	0,37	0,34	2,97	1,77
3	Одесская 200	горох	0,30	0,51	1,75	1,37
4	Одесская 200	горох	0,30	0,62	2,48	1,83
5	Одесская 200	горох	0,37	0,37	1,88	1,16
6	Одесская 200	горох	0,35	0,44	3,06	1,74
7	Одесская 200	мнгл. травы	0,36	0,23	1,25	1,21
8	Пилипенко	горох	0,15	0,16	0,43	0,25
9	Скарбница	пар	0,35	0,37	1,87	1,68
10	Украинка од.	оз. пшеница	0,18	0,15	1,22	1,02
<i>Количество хлорофилла в единице площади растения (мг/дм²)</i>						
1	Писанка	оз. рапс	2,09	1,29	2,67	3,11
2	Скарбница	пар	2,69	1,39	3,59	2,78
3	Одесская 200	горох	2,08	1,38	2,61	2,04
4	Одесская 200	горох	1,98	1,76	3,31	2,53
5	Одесская 200	горох	2,60	1,39	2,92	1,87
6	Одесская 200	горох	2,45	1,08	3,48	1,97
7	Одесская 200	мнгл. травы	2,55	1,13	1,98	2,61
8	Пилипенко	горох	1,81	1,13	1,27	0,79
9	Скарбница	пар	2,46	1,16	2,41	2,27
10	Украинка од.	оз. пшеница	2,30	1,18	2,23	2,09
<i>Количество хлорофилла в единице биомассы растений (мг/г)</i>						
1	Писанка	оз. рапс	5,61	1,86	2,97	1,65
2	Скарбница	пар	4,92	1,85	3,67	1,75
3	Одесская 200	горох	3,93	1,59	2,74	1,26
4	Одесская 200	горох	4,35	1,07	3,11	1,59
5	Одесская 200	горох	5,55	2,27	3,18	1,22
6	Одесская 200	горох	5,03	1,53	3,05	1,10
7	Одесская 200	мнгл. травы	5,40	1,33	2,01	1,33
8	Пилипенко	горох	3,58	1,48	1,22	0,48
9	Скарбница	пар	5,31	1,50	2,57	1,42
10	Украинка од.	оз. пшеница	4,76	1,43	2,15	1,05

На рисунке 18 представлены коэффициенты корреляции между валовым содержанием хлорофилла в растениях на единице площади посевов озимой пшеницы и их NDVI.

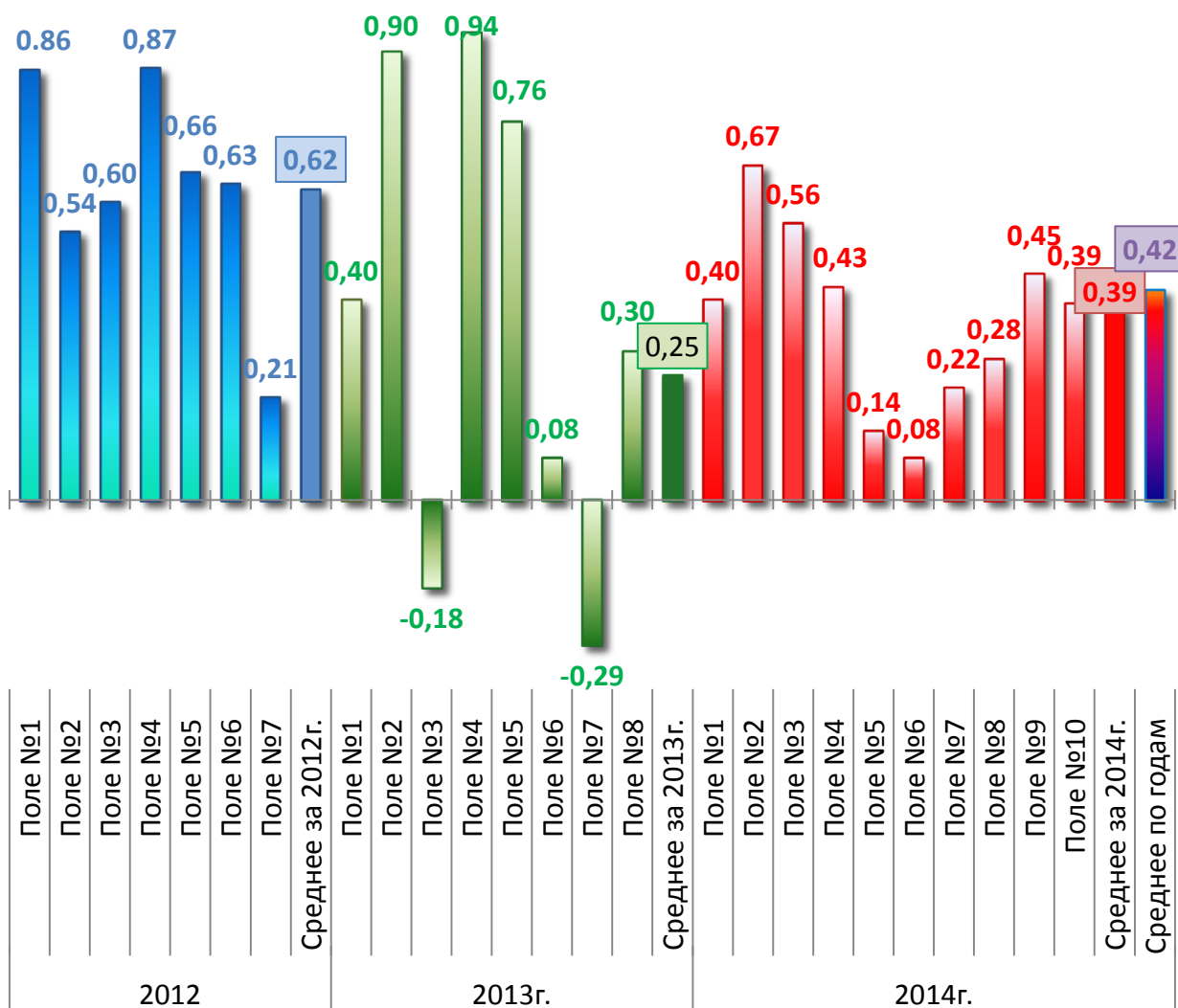


Рисунок 18 – Коэффициенты корреляции между количеством хлорофилла на квадратном метре посева озимой пшеницы ($\text{г}/\text{м}^2$) и его NDVI

Анализ полученных данных показал, что в условиях 2012 года коэффициент корреляции между количеством хлорофилла на квадратном метре посева озимой пшеницы и его NDVI составил величину 0,62. Минимальное значение было на седьмом поле – 0,21, максимальное отмечалось на четвертом поле – 0,87. В 2013 году для полей № 2, 4 и 5 этот показатель был на уровне 0,76-0,94. В то же время, у поля №6 он был близок к нулю (0,08), а у полей № 3 и 7 – его значение характеризовалось отрицательной величиной (-

0,18 и -0,29 соответственно). В 2014 году максимальное значение коэффициента корреляции между валовым содержанием хлорофилла посева и его NDVI составляло значение всего 0,67 (поле №2). Больше 0,5 этот показатель еще был только у одного поля – №3. Следует отметить, что величина R_{corr} в среднем за годы проведения исследований составила величину 0,42.

Таким образом, взаимосвязь между количеством хлорофилла на единице площади посева озимой пшеницы и его NDVI в среднем очень слаба и оценивается величиной коэффициента корреляции равным 0,42, а по отдельным полям крайне нестабильна, не зависимо от условий выращивания. Связь между относительным содержанием хлорофилла в единице площади ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы и NDVI их посевов в среднем по полям и за годы наших исследований полностью отсутствует, коэффициент корреляции составляет величину -0,20 (рисунок 19).

Тем не менее, как в благоприятном 2014, так и проблемном по увлажнению и температурному режиму во время вегетации растений 2013 году, и засушливом 2012 году некоторые поля характеризовались довольно высокой корреляционной связью по рассматриваемым показателям, которая, кроме того, характеризовалась разнонаправленностью. Так в 2012г. у поля №4 коэффициент корреляции составил величину 0,97, а у полей 2 и 7 – 0,65 и -0,79, у оставшихся – значения этого показателя были в пределах от -0,08 до 0,22. В 2013 году у полей 1 и 2 коэффициенты корреляции были равны 0,60 и 0,65 со знаком «-», то у полей 4 и 5 – 0,69 и 0,74 со знаком «+». У остальных полей коэффициенты корреляции между вегетационным индексом и содержанием зеленых пигментов в единице площади фотосинтетической поверхности были так же и положительными, и отрицательными, но при этом меньше 0,50.

я между относительным содержанием хлорофилла в растениях озимой пшеницы (мг/дм^2) и NDVI их посевов характеризуется меньшей нестабильностью величин их коэффициентов корреляции, чем в 2013 году. Только у полей 1, 2, 3 и 4 этот показатель находился в пределах -0,17...+0,17, а у остальных – все коэффициенты корреляции были отрицательными и их зна-

чения изменялись в пределах от -0,48 до -0,72. Тем не менее, средний по всем полям R_{corr} в 2014 году был довольно низок – -0,40.

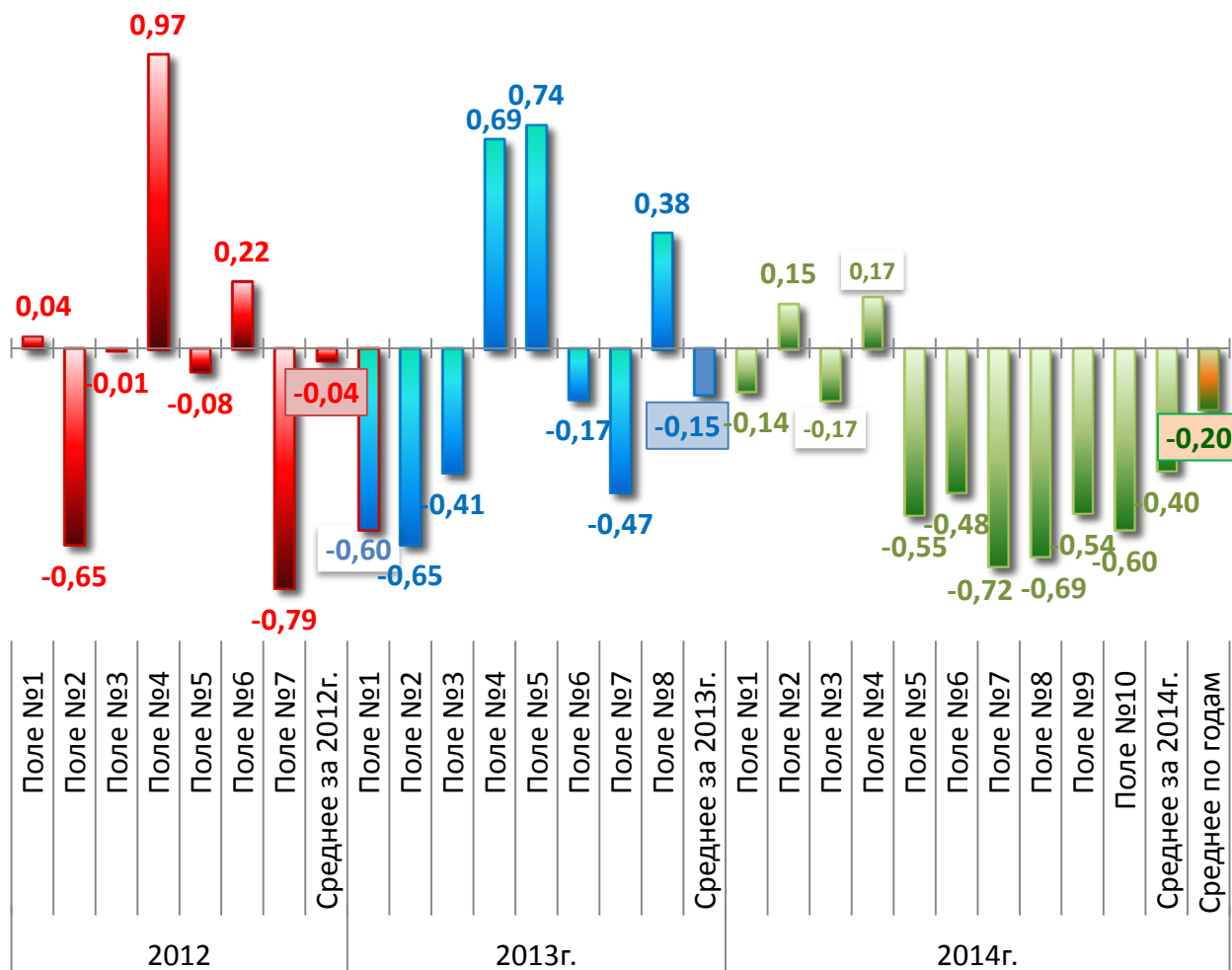


Рисунок 19 – Коэффициенты корреляции между относительным содержанием хлорофилла в единице площади ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы (мг/дм^2) и NDVI их посевов

Таким образом, взаимосвязь содержания хлорофилла в единице площади ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы и вегетационного индекса NDVI их посевов в среднем по вариантам и годам практически отсутствует (коэффициент корреляции равен -0,20). По отдельным полям такая связь либо отсутствует вовсе, либо еще более нестабильна, чем в случае с валовым количеством зеленых пигментов на квадратном метре ценоза.

Нами был проведен анализ взаимосвязи NDVI посевов озимой пшеницы и таким показателем как содержание хлорофилла в единице биомассы растений (Yeroshenko F.V., Storchak I.G., 2014; Ерошенко Ф.В., Сторчак И.Г., 2014), который наряду с валовым количеством зеленых пигментов на квад-

ратном метре посева, чаще всего используется для характеристики размеров фотосинтетического аппарата (рисунок 20).

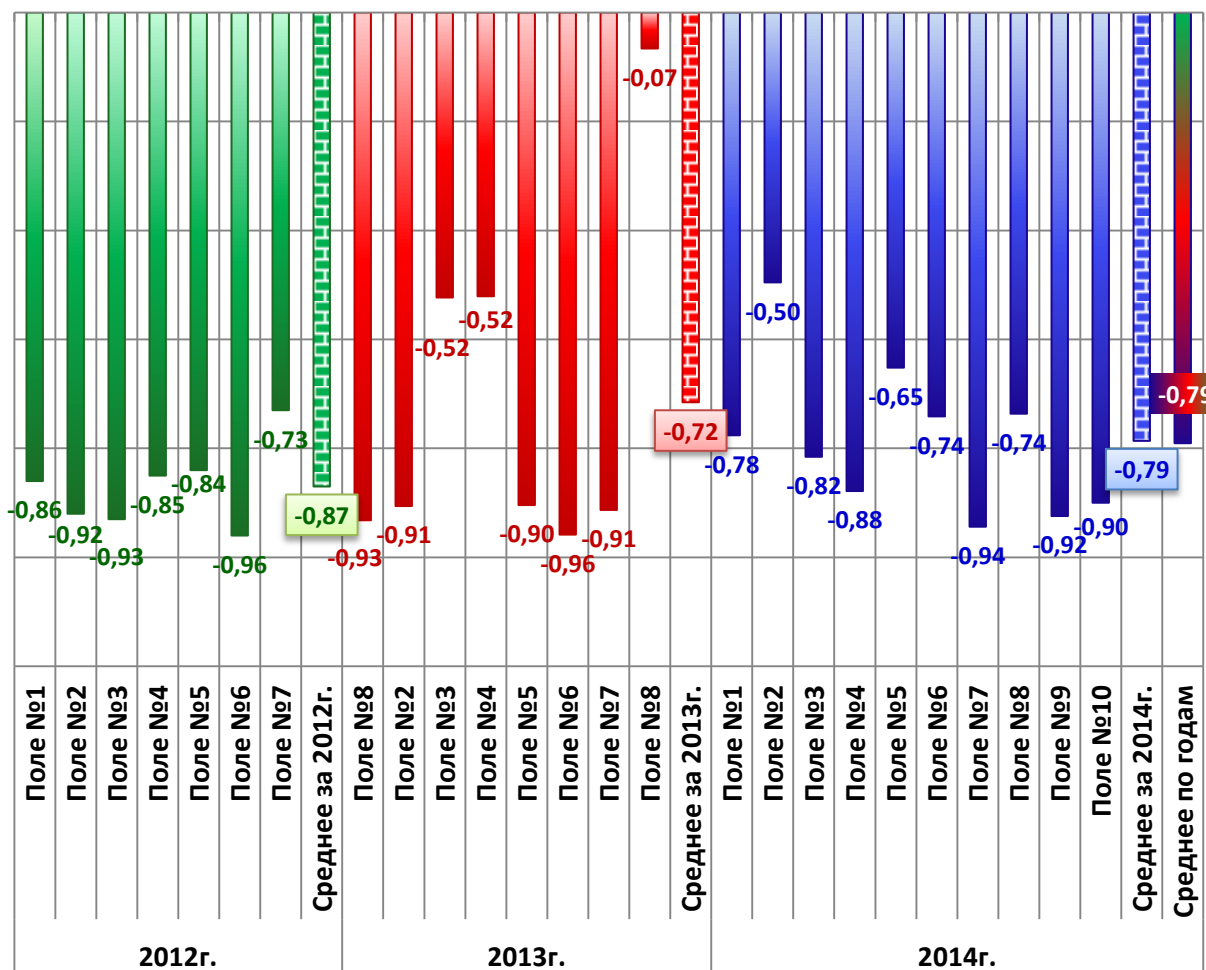


Рисунок 20 – Коэффициенты корреляции между относительным содержанием хлорофилла в единице биомассы растений озимой пшеницы (мг/г) и NDVI их посевов

Анализ полученных данных показал, что коэффициент корреляции между вегетационными индексами и относительным содержанием хлорофилла в мг/г в среднем по всем изученным полям за годы исследований составляет величину -0,79. Это говорит о достаточно высокой степени сопряжения NDVI с количеством фотосинтетических пигментов в органах растений озимой пшеницы.

В условиях 2012 года минимальное значение такого коэффициента корреляции отмечалось на поле №7 и составило величину -0,73, максимальное -0,96 было на шестом поле. В 2013 году большинство обследованных

нами посевов характеризовались очень высокими значениями рассматриваемого коэффициента корреляции. Так у полей 1, 2, 5, 6 и 7 его значение было больше 0,90 со знаком минус. У 3-го и 4-го – он составлял величину -0,52 и лишь у поля 8 R_{corr} был очень низкий – -0,07. Как отмечалось в предыдущем разделе, в 2013 году посевы озимой пшеницы были частично поражены вирусом желтой карликовостью ячменя, особенно поля №7 и №8. Если у поля №7 изменение пигментации растений вследствие действия болезни в большей степени отразилось на коэффициенте корреляции между NDVI и площадью ассимиляционной поверхностью, то у поля №8 – вегетационного индекса и относительным содержанием хлорофилла (мг/г).

В 2014 году средний коэффициент корреляции между количеством зеленых пигментов в единице биомассы растений озимой пшеницы и NDVI их посевов был достаточно высоким и составлял величину -0,79. Следует отметить, что все поля в рассматриваемом году характеризовались высокими R_{corr} , величины которых были больше 0,65 со знаком минус, за исключением поля №2, у которого этот показатель составлял значение -0,50.

Таким образом, существует тесная и достаточно стабильная взаимосвязь между количеством хлорофилла в единице биомассы растений озимой пшеницы и NDVI их посевов, которая оценивается коэффициентом корреляции равным -0,79. При ухудшении условий выращивания этот показатель уменьшается.

Отрицательные значения полученных нами коэффициентов корреляции объясняются тем, что максимальное количество хлорофилла в растениях озимой пшеницы отмечается в начальные периоды роста и развития, а далее наблюдается так называемое «ростовое разбавление», которое сопровождается уменьшением количества зеленых пигментов в единице биомассы, при этом NDVI посевов возрастает.

Анализ коэффициентов корреляции между хлорофилловыми показателями растений озимой пшеницы и вегетационными индексами их посевов по этапам органогенеза за годы исследования позволяет сделать вывод о том,

что взаимосвязь между этими характеристиками если и проявляется, то в начальный период роста и развития, но значительно в меньшей степени, чем в случае с площадью ассимиляционной поверхности и NDVI (таблица 15). При улучшении условий выращивания коэффициенты корреляции между рассматриваемыми показателями увеличиваются. Следует отметить, что в этом случае так же проявляется довольно тесная взаимосвязь между хлорофилловыми показателями растений озимой пшеницы и NDVI их посевов в период налива зерна ($R_{corr.}$ находятся в пределах 0,67-0,83).

Таблица 15 – Коэффициенты корреляции между хлорофилловыми показателями растений озимой пшеницы и NDVI их посевов по фазам роста и развития

Количество хлорофилла	Дата отбора				
	09.04	30.04	21.05	04.06	среднее
2012 год					
Валовое, г/м ²	0,61	-0,69	0,26	-0,81	-0,16
Относительное, мг/дм ²	0,42	-0,37	0,40	-0,88	-0,11
Относительное, мг/г	0,47	0,22	0,58	-0,73	0,13
2013 год					
Валовое, г/м ²	0,64	0,08	-0,03	0,10	0,20
Относительное, мг/дм ²	0,09	-0,38	-0,12	0,15	-0,07
Относительное, мг/г	0,14	-0,46	0,14	-0,03	-0,05
2014 год					
Валовое, г/м ²	0,71	0,49	0,29	0,67	0,54
Относительное, мг/дм ²	0,57	0,35	0,34	0,82	0,52
Относительное, мг/г	0,47	0,10	0,49	0,83	0,47
Среднее по годам					
Валовое, г/м ²	0,52	-0,04	0,17	0,01	0,19
Относительное, мг/дм ²	0,36	-0,13	0,21	0,03	0,11
Относительное, мг/г	0,36	-0,05	0,40	0,02	0,18

Таким образом, наиболее тесная и стабильная взаимосвязь между хлорофилловыми показателями растений озимой пшеницы и вегетационным индексом их посевов наблюдается в случае с относительным содержанием зеленых пигментов в единице биомассы, коэффициент корреляции составляет величину -0,89. С улучшением условий выращивания такая взаимосвязь снижается.

Построенные нами регрессионные модели зависимости NDVI посевов от содержания хлорофилла в органах растений озимой пшеницы наглядно демонстрируют влияние внешних факторов на взаимосвязь между этими оптико-биологическими характеристиками (рисунок 21).

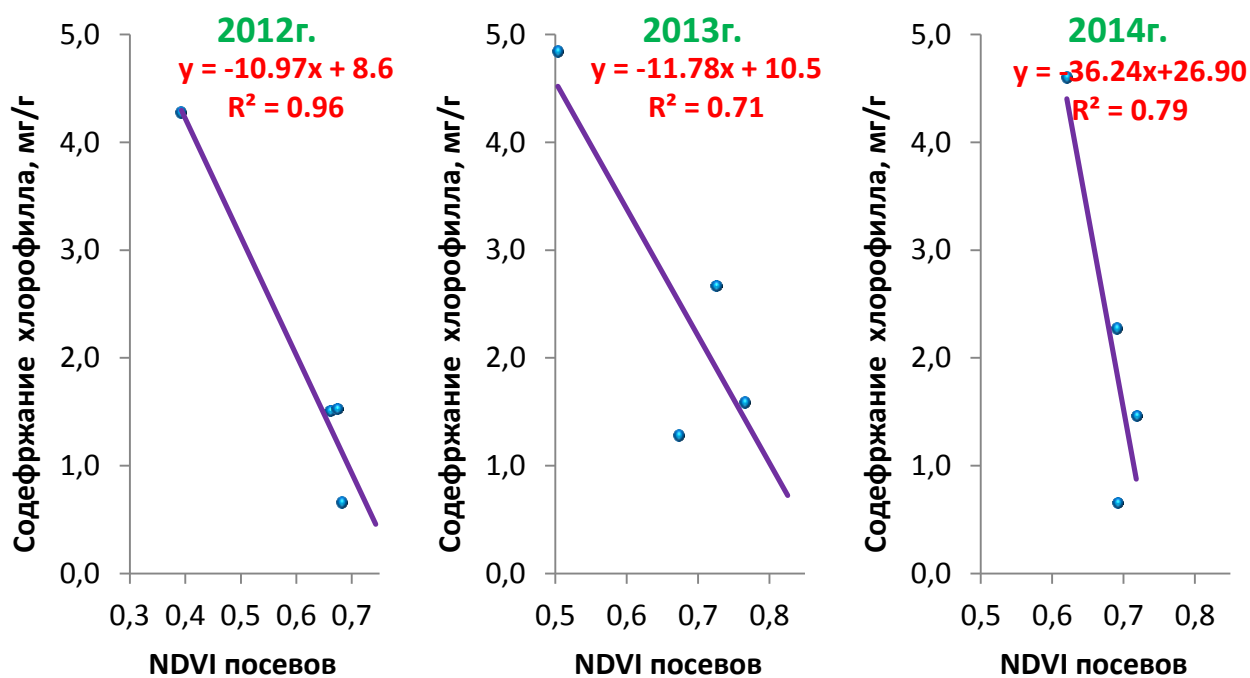


Рисунок 21 – Регрессионные модели зависимости NDVI посевов от количества хлорофилла в органах растений озимой пшеницы

Анализ полученных данных показал, что если в 2012 году множитель и свободный член уравнения регрессии были соответственно равны -10,97 и 8,61, в 2013 -11,78 и 10,46, то в 2014 году они составляли величины равные -36,24 и 26,90.

3.4. Фотосинтетические потенциалы и продуктивность посевов озимой пшеницы

Результаты наших исследований показали (Глава 4, п.1), что между вегетационным индексом NDVI и продуктивностью посевов озимой пшеницы не существует явно выраженной взаимосвязи, но она есть, и довольно тесная, с площадью фотосинтезирующей поверхности, а так же с количеством хлорофилла в растениях. Оба этих показателя дают представление только лишь о размерах ассимиляционного аппарата посева и не отражают его сортовые, технологические и онтогенетические особенности, которые необходимо учитывать при характеристике фотосинтетической продуктивности растений. Такие особенности находят отражение в оптико-биологических свойствах посевов, в том числе и в NDVI, которые зависят от высоты растений, стеблестоя, площади ассимиляционной поверхности, содержания хлорофилла, ориентации листьев, продолжительности функционирования фотосинтетического аппарата и т.д.. Наглядно такое влияние демонстрируют данные, представленные в работе Ф.В.Ерошенко (2010), полученные при изучении радиационного режима посевов озимой пшеницы высокорослых и низкорослых сортов (рисунок 22).

Автором показано, что низкорослые сорта формируют посев с такими оптико-биологическими свойствами, которые способствуют равномерному распределению проходящей солнечной радиация по ярусам растений и, кроме того, они лучше усваивают ФАР (почти на 10%), чем высокорослые формы.

Следовательно, при использовании NDVI как одной из характеристик фотосинтетической продуктивности растений необходимо учитывать указанные факторы. Наиболее простым и доступным показателем, в определенной степени отражающим сортовые, технологические и онтогенетические особенности посева является его биомасса.

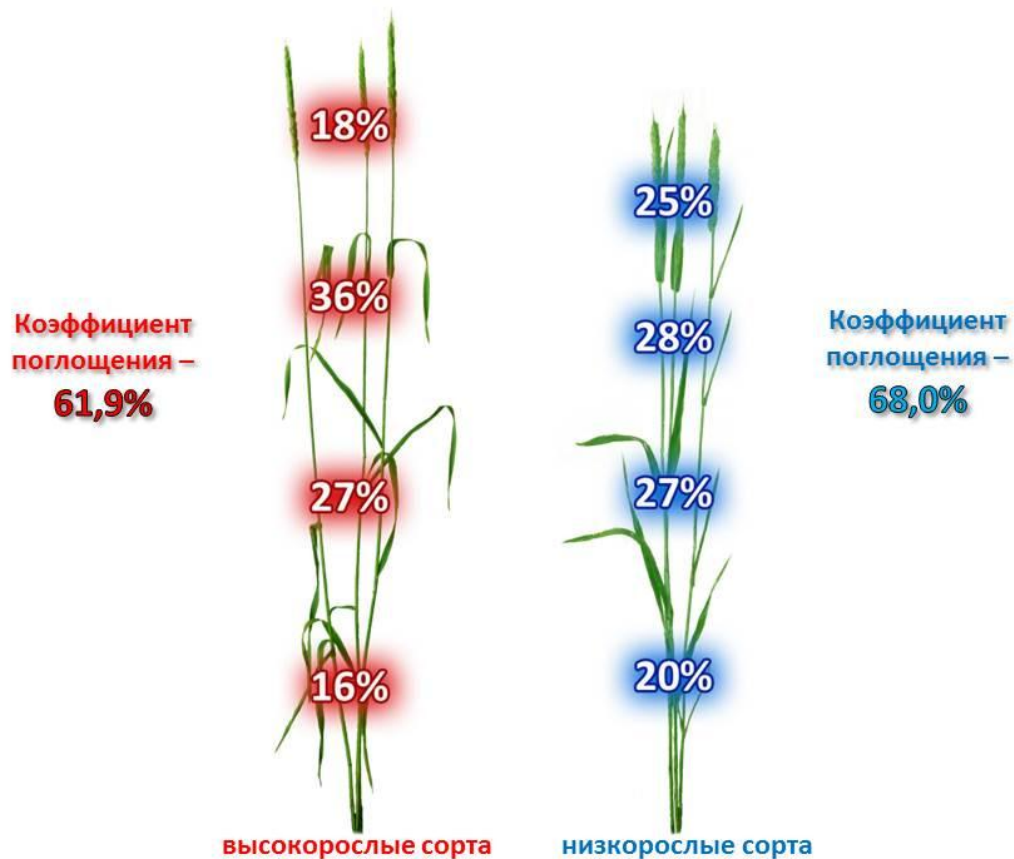


Рисунок 22 – Распределение солнечной радиации в посевах озимой пшеницы высокорослых и низкорослых сортов (Ерошенко Ф.В., 2010)

NDVI посева можно сравнить с оптической плотностью спиртовой или ацетоновой (в зависимости от метода экстракции) вытяжки хлорофилла из навески фотосинтезирующего органа растения, которая после расчетов по определенной формуле становится относительным содержанием зеленых пигментов. Оба эти показателя являются некой оптической характеристикой, и как показано нами ранее обладают достаточно тесной взаимосвязью. Литературные данные свидетельствуют о том, что наиболее тесная корреляция между продуктивностью сельскохозяйственных культур и показателями фотосинтетической продуктивности наблюдается с величиной, которая рассчитывается как сумма произведений оптической плотности спиртовой или ацетоновой вытяжки хлорофилла из навески растения (относительное содержание зеленых пигментов в мг/г) на биомассу с квадратного метра посева за весь период вегетации растений. Полученный таким образом показатель является *хлорофилловым фотосинтетическим потенциалом* (ХФСП):

$$\text{ХФСП} = \sum_{i=1}^n \frac{(\text{Chl}_i + \text{Chl}_{i+1})}{2} \times (d_{i+1} - d_i)$$

i – номер отбора образцов;

Chl_i – количество хлорофилла в растениях на квадратном метре посева, которое рассчитывается как произведение относительного содержания хлорофилла (мг/г биомассы) на биомассу (г/м² посева);

d_i – дата отбора образцов.

Нами был проведен анализ взаимосвязи NDVI, учитывающий биомассу посева, с фотосинтетическими показателями растений озимой пшеницы. Но если вегетационный индекс умножить на массу, то размерность нового показателя будет содержать множитель г/м², что не вполне корректно, так как NDVI – безразмерная величина. Поэтому нами предлагается использовать так называемый *коэффициент поверхностной плотности посева (coefficient of surface density of crops)* – K_{sdc} , который рассчитывается по формуле:

$$K_{sdc} = \frac{M}{5000}$$

M – биомасса посева на квадратном метре (г/м²);

5000 – максимально возможная биомасса посева озимой пшеницы (г/м²).

После анализа многолетних результатов исследований отдела физиологии растений ФГБНУ Ставропольский НИИСХ (отчеты НИР), где объектом были посевы озимой пшеницы с вариациями сортов, предшественников, минеральных удобрений, почвенного плодородия и влагообеспеченности, а также почвенно-климатических зон выращивания, мы пришли к выводу, что эта культура не формирует посев биомассой, больше 5000 г/м².

Коэффициенты корреляции вегетационного индекса умноженного на коэффициент поверхностной плотности посева с ассимиляционной площадью и относительным содержанием хлорофилла представлены в таблице 16.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование такого NDVI значительно повышает взаимосвязь его с размерами фотосинтетической поверхности. В условиях 2012 году такое повышение составило 15,2 %, в 2013 году – 17,7%, а в 2014 году – 83,3%. Для относительного содержания хлорофилла в растениях наблюдается такая же закономерность. Так если в среднем за годы исследований коэффициент корреляции между количеством зеленых пигментов в единице биомассы растений и NDVI их посевов составлял -0,79, то при использовании K_{sdc} -0,90.

Следовательно, NDVI с достаточно высокой степенью достоверности отражает размеры фотосинтетического аппарата растений озимой пшеницы. Использование коэффициента поверхностной плотности посева увеличивает степень сопряжения этих характеристик. На основании рассмотренных закономерностей, используя вегетационный индекс, по аналогии с хлорофилловым и поверхностным фотопотенциалами, нами был разработан показатель, отражающий величину и продолжительность функционирования ассимиляционного аппарата посевов, хотя и опосредованно через взаимосвязь NDVI с фотосинтетическими показателями (Yeroshenko F.V., Storchak I.G., 2014; Ерошенко Ф.В., Сторчак И.Г., 2014).

Новый показатель мы назвали **вегетационный фотосинтетический потенциал (ВФСП), или Vegetative Photosynthetic Potential (VPSP)**. Он рассчитывается по следующей формуле:

$$VPSP = \sum_{i=1}^n \frac{(NDVI_i \cdot K_{sdc\ i} + NDVI_{i+1} \cdot K_{sdc\ i+1})}{2} \cdot (d_{i+1} - d_i),$$

где $VPSP$ – вегетационный фотосинтетический потенциал;

$NDVI$ – NDVI посева;

K_{sdc} – коэффициент поверхностной плотности посева;

d – дата отбора;

i – порядковый номер отбора.

Таблица 16 – Коэффициенты корреляции между фотосинтетическими показателями растений озимой пшеницы и NDVI их посевов

№ поля	Сорт	Предшественник	Площади ассимиляционной поверхности (м ² /м ²) с		Относительного содержания хлорофилла (мг/г) с	
			NDVI	NDVI с учетом K_{sdc}	NDVI	NDVI с учетом K_{sdc}
2012						
1	Украинка од.	горох	0,90	0,77	-0,86	-0,95
2	Скарбница	горох	0,72	0,90	-0,92	-0,95
3	Багира	соя	0,97	0,87	-0,93	-0,91
4	Писанка	пар	0,86	0,87	-0,85	-0,98
5	Виктория од.	пар	0,75	0,82	-0,84	-0,94
6	Украинка од.	пар	0,79	0,70	-0,96	-0,95
7	Зустріч	горох	0,52	0,87	-0,73	-0,97
Среднее			0,79	0,83	-0,87	-0,95
2013 год						
1	Полевик	горох	0,84	0,99	-0,93	-0,93
2	Казачий атаман	горох	0,92	0,96	-0,91	-0,94
3	Багира	пар	0,80	0,97	-0,52	-0,83
4	Одесская 200	соя	0,95	0,89	-0,52	-0,76
5	Одесская 200	пар	0,79	0,89	-0,90	-0,87
6	Зустріч	пар	0,21	0,51	-0,96	-0,83
7	Писанка	соя	0,53	0,79	-0,91	-0,95
8	Виктория од.	пар	0,42	0,40	-0,07	-0,52
Среднее			0,68	0,80	-0,72	-0,83
2014 год						
1	Писанка	оз. рапс	0,66	0,98	-0,78	-0,99
2	Скарбница	пар	0,73	0,99	-0,50	-0,97
3	Одесская 200	горох	0,73	0,99	-0,82	-0,94
4	Одесская 200	горох	0,56	0,99	-0,88	-0,93
5	Одесская 200	горох	0,27	0,99	-0,65	-0,91
6	Одесская 200	горох	0,30	0,99	-0,74	-0,87
7	Одесская 200	мнгл. травы	0,43	0,97	-0,94	-0,97
8	Пилипенко	горох	0,39	0,99	-0,74	-0,83
9	Скарбница	пар	0,63	0,99	-0,92	-0,96
10	Украинка од.	оз. пшеница	0,48	0,99	-0,90	-0,98
Среднее			0,54	0,98	-0,79	-0,93

С математической точки зрения VPSP представляет собой площадь фигуры, расположенной над временной осью (от начала вегетации до созревания), ограниченной сверху динамикой NDVI с учетом поверхностной плотности посева. Другими словами – это интеграл функции, описывающей изменения вегетационного индекса, умноженного на K_{sdc} , за период роста и развития растений озимой пшеницы.

Так как из всех существующих показателей фотосинтетической продуктивности, наиболее точно отражают формирование урожая те, которые характеризуют не только размеры ассимиляционного аппарата ценоза, но и время его активного функционирования (Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А., 2000). Поэтому нами были рассчитаны поверхностные, хлорофилловые и вегетационные фотосинтетические потенциалы изученных полей озимой пшеницы во все годы исследований и проведен анализ их взаимосвязи с зерновой продуктивностью (таблица 17). Полученные результаты свидетельствуют о том, что в условиях 2013 года сложилась классическая картина взаимосвязи поверхностного и хлорофиллового фотопотенциалов с урожайностью озимой пшеницы. Так если коэффициент корреляции зерновой продуктивности с ПФСП в этом году составлял величину 0,61, то с ХФСП – 0,92.

Исследователи отмечают (Тарчевский, Андрианова, Хотулев, Дуденко, Ерошенко), что хлорофилловый фотопотенциал более точно отражает продукционный процесс, чем поверхностный. Это происходит потому, что ПФСП учитывает только площадь, на которую падает солнечная радиация, но количество поглощенной ФАР, эффективность её усвоения, преобразования и запасания в виде стабильных связей химических высокоэнергетических соединений (АТФ и НАДФН) зависит от количества пигментов и их структурной организации в хлоропластах. Поэтому связь между продуктивностью и фотопотенциалом, рассчитанным по содержанию хлорофилла в растениях выше, чем по площади ассимиляционной поверхности.

Таблица 17 – Урожайность, фотопотенциалы посевов озимой пшеницы и коэффициенты корреляции между ними

№ поля	Сорт	Предшественник	Урожай зерна, ц/га	ПФСП, (м ² /м ²)·сутки	ХФСР, (г/м ²)·сутки	ВФСР, NDVI·сутки
2012 год						
1	Ксения	оз. рапс	29,41	2,14	28,97	8,87
2	Скарбница	пар	35,65	2,2	32,56	10,51
3	Украинка од.	оз.пшеница	35,47	2,21	31,32	10,34
4	Селянка од.	горох	37,02	2,39	45,52	10,01
5	Багира	пар	34,76	2,11	34,9	11,09
6	Березит	оз. рапс	39,14	2,54	51,32	11,58
7	Украинка од.	мн.травы	33,75	1,82	19,63	10,35
Среднее			35,03	2,20	34,89	10,39
Коэффициент корреляции с урожаем зерна				0,64	0,72	0,81
2013 год						
1	Полевик	горох	34,1	1,19	52,1	19,1
2	Казачий атаман	горох	25,1	0,86	19,5	8,6
3	Багира	пар	64,5	1,99	89,5	37,8
4	Одесская 200	соя	32,3	1,06	44,6	13,4
5	Одесская 200	пар	68,5	1,01	88,3	28,2
6	Зустріч	пар	49,1	1,13	90,0	32,0
7	Писанка	соя	28,4	0,40	20,9	10,2
8	Виктория од.	пар	53,0	1,53	65,3	28,5
Среднее			43,6	1,15	58,8	22,3
Коэффициент корреляции с урожаем зерна				0,61	0,92	0,90
2014 год						
1	Писанка	оз. рапс	48,8	2,87	68,8	17,7
2	Скарбница	пар	51,2	3,08	92,2	17,3
3	Одесская 200	горох	67,6	3,05	65,1	20,4
4	Одесская 200	горох	67,7	3,23	87,4	22,0
5	Одесская 200	горох	59,0	2,72	63,4	16,5
6	Одесская 200	горох	55,7	3,78	95,4	20,8
7	Одесская 200	мн.травы	39,2	2,38	47,5	15,5
8	Пилипенко	горох	36,0	1,42	16,5	6,6
9	Скарбница	пар	61,0	3,22	68,4	23,5
10	Украинка од.	оз.пшеница	50,1	2,00	41,3	14,4
Среднее			53,6	2,77	64,6	17,5
Коэффициент корреляции с урожаем зерна				0,70	0,63	0,81

НСР₀₅ для 2012г. – 2,6 ц/га, 2013г. – 2,7 ц/га, для 2014г. – 3,6 ц/га

Условия 2014 года, как уже отмечалось, были благоприятными для роста и развития озимой пшеницы, без аномальных проявлений водного и температурного режимов, что позволило сформировать хорошо развитые посевы с достаточно большой площадью ассимиляционной поверхности, при этом активность процессов ассимиляции не оказывала сильного влияния на продукционный процесс. Иными словами, формирование урожая в 2014 году шло по экстенсивному пути, что и отразилось на коэффициентах корреляции зерновой продуктивности с поверхностными и хлорофилловыми фотосинтетическими потенциалами.

Следует отметить, что взаимосвязь урожайности озимой пшеницы с предложенным нами вегетационным фотосинтетическим потенциалом в 2013 году оценивалась коэффициентом корреляции равным 0,90. В 2014 году R_{corr} между зерновой продуктивностью и ВФСП был значительно больше, чем с поверхностным и хлорофилловым фотопотенциалами и составил величину 0,81.

Нами были построены регрессионные зависимости продуктивности посевов озимой пшеницы от фотопотенциала, рассчитанного по вегетационным индексам NDVI (рисунок 23). Полученные данные свидетельствуют не только о тесной взаимосвязи между этими показателями, но и о достаточно высокой степени достоверности полученных моделей, которые описываются следующими уравнениями:

$$\text{для 2012 года} \quad y = 2,88x + 5,15$$

$$\text{для 2013 года} \quad y = 13,84x + 136,10$$

$$\text{для 2014 года} \quad y = 18,31x + 216,61$$

Коэффициенты аппроксимации полученных моделей равны 0,66; 0,81 и 0,67 для 2012, 2013г. и 2014г. соответственно. Хотя коэффициенты и свободные члены в уравнениях регрессии для разных годов несколько различаются, что говорит о влиянии условий произрастания на характер взаимосвязи между рассматриваемыми величинами, но построенная регрессия по данным всех лет исследований характеризуется высокой достоверностью.

Таким образом, предложенный нами новый показатель фотосинтетической продуктивности растений, который рассчитывается на основе данных дистанционного зондирования Земли, с высокой степенью достоверности характеризует формирование урожая. Так в среднем за годы исследований коэффициент корреляции между зерновой продуктивностью и вегетационным фотосинтетическим потенциалом посевов озимой пшеницы равен 0,84, а коэффициент аппроксимации для регрессионной модели взаимосвязи этих показателей составил величину 0,66.

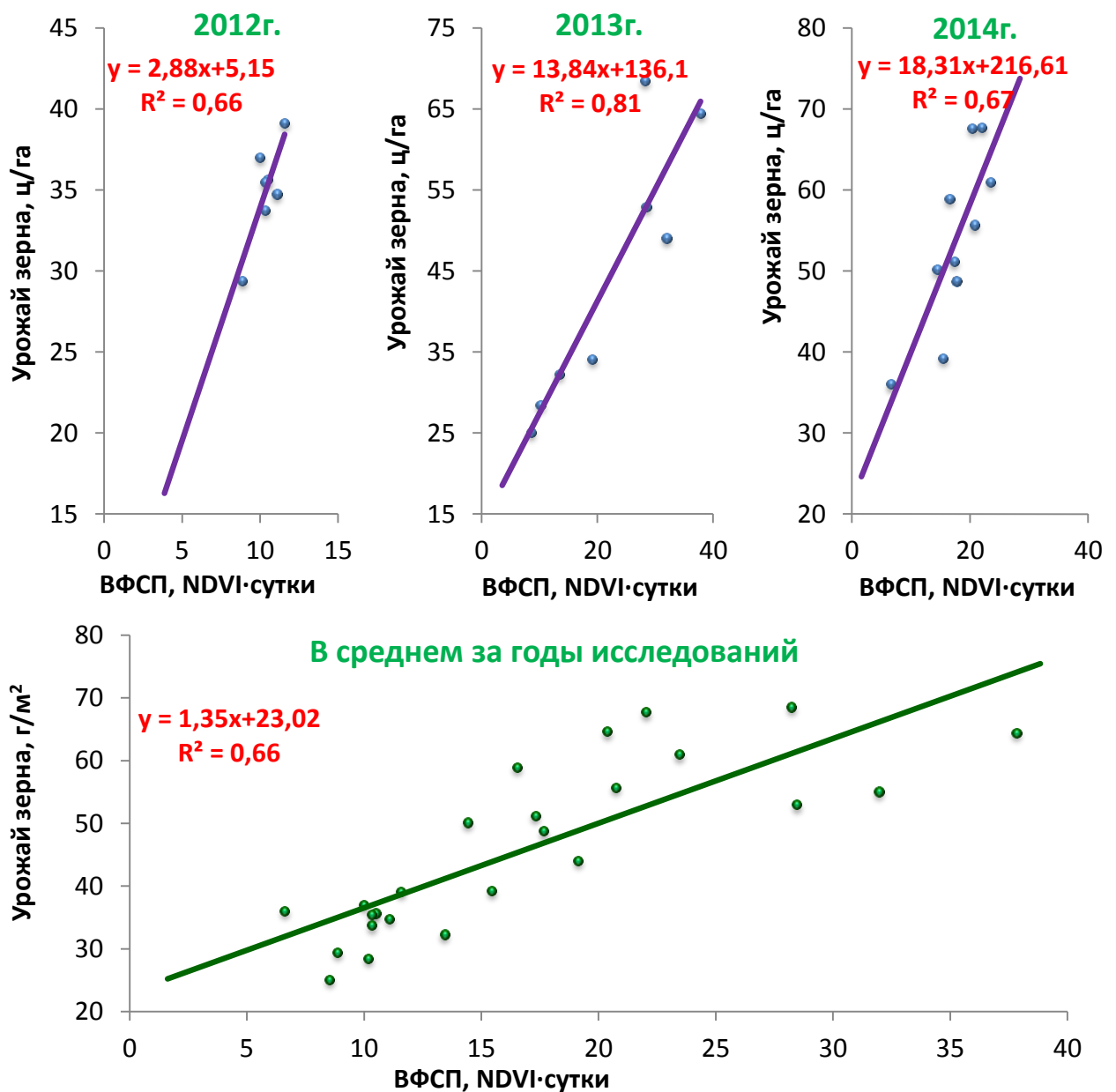


Рисунок 23 – Регрессионные модели зависимости урожая зерна от вегетационного фотосинтетического потенциала (ВФСП) посевов озимой пшеницы

Нами были посчитаны коэффициенты корреляции между урожаем зерна на посевах озимой пшеницы для всех производственных полей ФГБНУ Ставропольский НИИСХ со следующими показателями динамика NDVI:

- средний NDVI за период возобновление весенней вегетации-полная спелость;
- максимальный NDVI за период возобновление весенней вегетации-полная спелость;
- суммарный NDVI за период возобновление весенней вегетации - полная спелость;
- суммарный NDVI за период возобновление весенней вегетации-колошение.

Проведенный анализ показал, что для отдельных полей коэффициент корреляции для $NDVI_{max}$ в 2012 г. составил величину 0,52, в 2013 она была равной 0,25, а в 2014 – 0,57 (рисунок 24).

В среднем же за годы исследований коэффициент корреляции между максимальным NDVI за период от возобновления весенней вегетации до полной спелости и урожаем зерна был равен 0,28. Для общепринятого показателя, характеризующего динамику вегетационного индекса – средний NDVI за весенне-летний период ($NDVI_{aver.}$), нами получены следующие величины коэффициентов корреляции с зерновой продуктивностью: 0,09 для 2012г., 0,17 – 2013г. и 0,70 – 2014г. Средняя за годы проведения исследований величина этого показателя составила 0,26.

Следует отметить, что хотя взаимосвязь суммарного NDVI за весенне-летний период (S_1+S_2) с урожаем зерна отдельных полей озимой пшеницы в 2014 году оценивалась коэффициентом корреляции равным 0,66, то в 2012 и 2013гг. она практически отсутствовала (коэффициент корреляции равен 0,13 и -0,01 соответственно). Средние значения этого показателя за трехлетний период – 0,26.

Максимальное значение коэффициента корреляции между зерновой продуктивностью озимой пшеницы и суммарным NDVI за период от возоб-

новления весенней вегетации до колошения отмечалось, как и с другими характеристиками динамики вегетационного индекса, в 2014г. и составило величину 0,71. В 2012г. этот показатель равнялся 0,42, а в 2013г. – 0,04. Среднее его значение за 2012-2014гг. было 0,36.

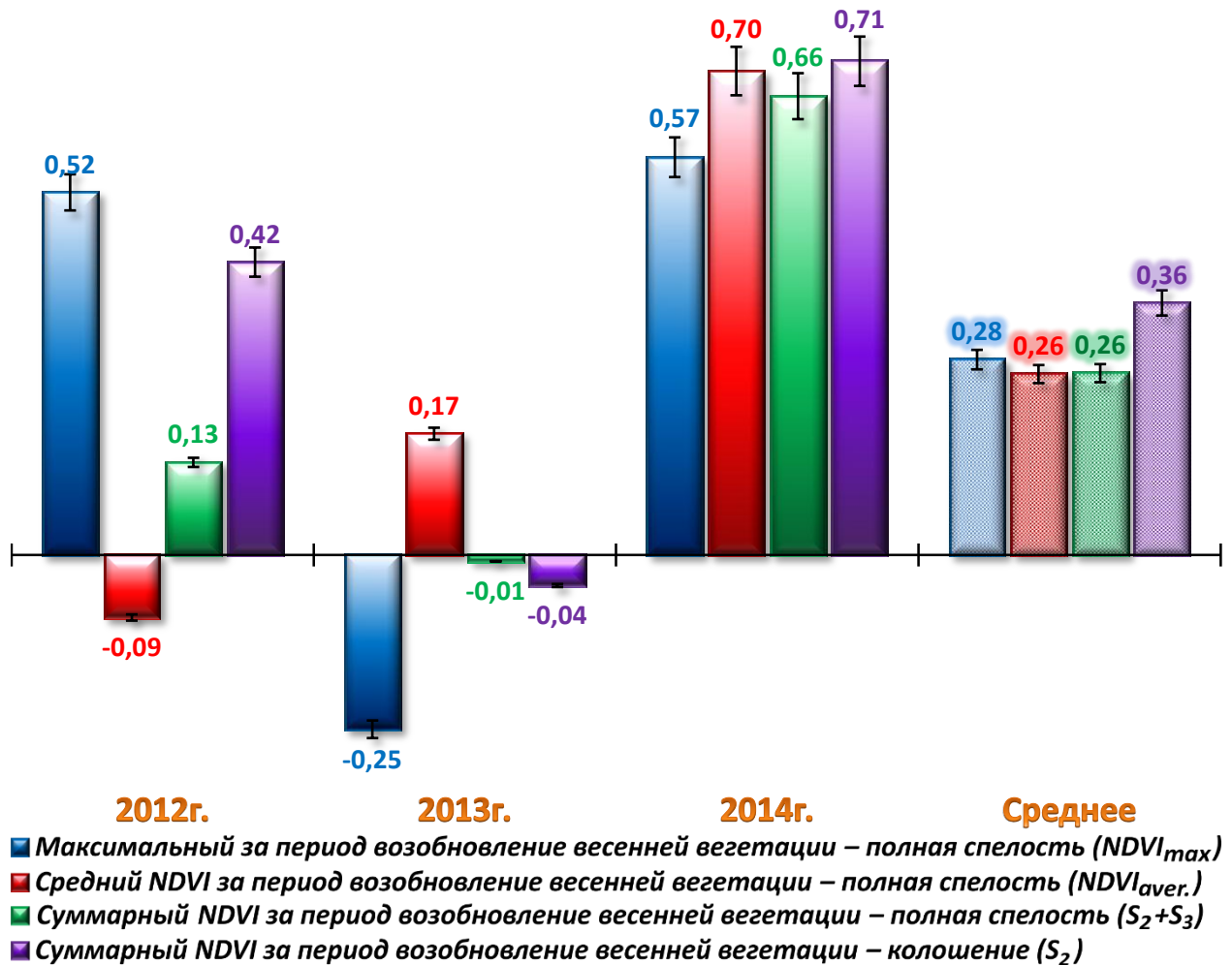


Рисунок 24 – Коэффициенты корреляции между урожаем зерна посевов озимой пшеницы и характеристиками динамики NDVI.

В 2014 году коэффициенты корреляции между зерновой продуктивностью посевов озимой пшеницы и характеристиками динамики их NDVI были довольно высокими, в то время как в 2012 и 2013 годах низкими, а в некоторых случаях даже отрицательными. Условия 2014 года, по сравнению с 2012 и 2013гг, были наиболее благоприятными для роста и развития сельскохозяйственных культур с отсутствием экстремальных погодных явлений в вегета-

тивно-генеративный период. Из-за этого, возможно, формирование урожая озимой пшеницы проходило в большей степени по экстенсивному пути, когда интенсивность фотосинтетических реакций не лимитировалась отрицательным воздействием внешних факторов. Поэтому высокопродуктивными были более мощно развитые растения, а не с высокой активностью обменных и синтетических процессов. Как следствие, посевы таких растений имеют высокие значения показателей их оптико-биологических характеристик, что, с нашей точки зрения, объясняет полученные результаты.

Таким образом, полученные нами результаты свидетельствуют о том, что существующая тесная взаимосвязь между продуктивностью озимой пшеницы и характеристиками динамики NDVI для таких административных единиц как район, почвенно-климатическая зона и край в целом, для отдельных полей если и проявляется, то нестабильно, а зачастую она низка или вовсе отсутствует.

3.5. Содержание азота в растениях озимой пшеницы и NDVI их посевов

Литературные данные свидетельствуют о том, что существует взаимосвязь между содержанием азота и хлорофилла в растениях сельскохозяйственных культур (Хотулев В.Я., 1985; Андриянова Ю.Е., Тарчевский И.А., 2000; Rama Rao N. et al., 2008; Zhao D. et al., 2005; Schlerf M. et al., 2010; Saleem M.F. et al., 2010). В работе Хотулева В.Я. (1985) было показано, что эти два показателя в онтогенезе изменяются параллельно. Объясняется такая закономерность тем, что, во-первых, азот входит в состав зеленых пигментов, а, во-вторых, усвоение этого элемента минерального питания происходит при непосредственном участии фотосинтеза. Растение с развитым ассимиляционным аппаратом способно усвоить большее количество не только азота, но и других макро- и микроэлементов. С другой стороны, при интенсивном питании растительного организма происходит активный его рост.

Содержание азота – важный показатель физиологического состояния посевов озимой пшеницы. Его количество в растениях определяет не только величину будущего урожая, но и качество зерна. Принцип растительной и листовой диагностики минерального питания заключается в том, что на основании содержания азота в органах растений, и некоторых других показателей, даются рекомендации по азотным подкормкам, что позволяет оптимизировать питание озимой пшеницы в течение вегетации (Прокудин Е.А., и др., 1991; Кулинцев В.В. и др., 2013; Дуденко Н.В., Ерошенко Ф.В., 2013; Кулинцев В.В. и др., 2014). Так же по количеству NO_3 в листьях в колосшение можно прогнозировать содержание сырой клейковины в зерне озимой пшеницы будущего урожая. Для этого используют коэффициенты пересчета, которые отличаются для некоторых групп генотипов (например, высокорослые и низкорослые).

Таким образом, содержание азота в растениях является важным показателем для составления рекомендаций по уходным мероприятиям за посевами озимой пшеницы. Поэтому разработка методов, позволяющих объективно и оперативно получать такую информацию, является чрезвычайно важным и актуальным направлением научных изысканий.

Результаты наших исследований показали тесную взаимосвязь между количеством хлорофилла в растениях озимой пшеницы и NDVI их посевов. На рисунке 25 представлены коэффициенты корреляции между содержанием азота и зеленых пигментов в растительных образцах.

Нами получены результаты аналогичные литературным, которые свидетельствуют о тесной взаимосвязи между этими показателями. В наших опытах не зависимо от погодных условий коэффициент корреляции между содержанием хлорофилла и азота в растениях озимой пшеницы был на уровне 0,93. В 2012 году минимальное значение R_{corr} было 0,78, а максимальное 0,99. В 2013 году диапазон изменений этого показателя был несколько шире, чем в 2014 году (0,76-0,97 и 0,83-0,99 соответственно). С нашей точки зрения, это может быть связано с проявлением изменений пиг-

ментации растений из-за частичного поражения растений вирусом желтой карликовости ячменя в 2013 году.

Мы проанализировали взаимосвязь содержания азота в растениях озимой пшеницы с NDVI их посевов (таблица 18). За годы исследований нами получен довольно высокий коэффициент корреляции между этими показателями. Так по средним данным он составил величину равную -0,89 в 2012 году и -0,82 в 2013 и 2014 годах. Даже в 2013 году отсутствие такой взаимосвязи на поле № 10 ($R_{\text{corr.}}=0,18$) не повлияло на конечный результат.

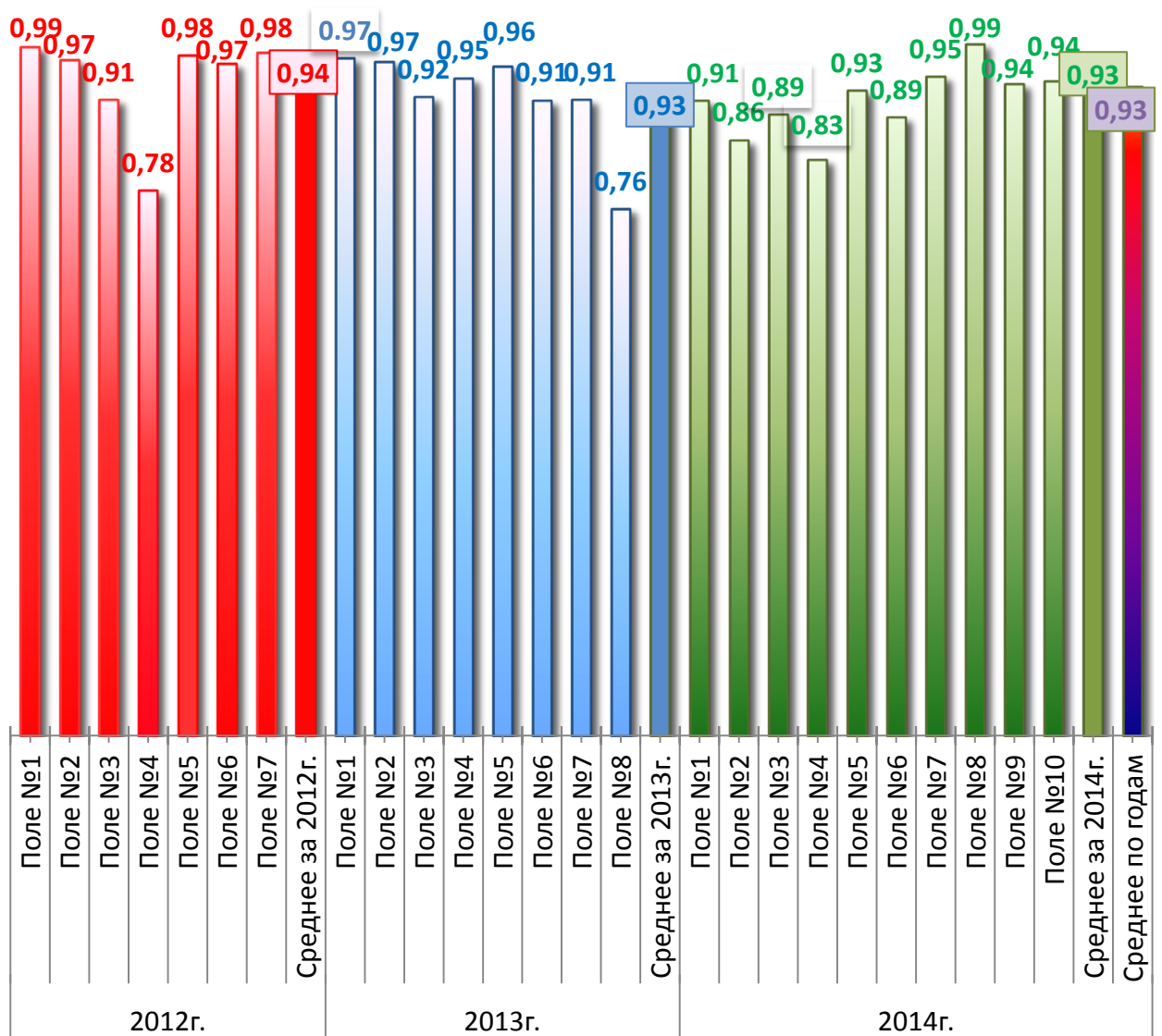


Рисунок 25 – Коэффициенты корреляции между содержанием азота и количества хлорофилла в растениях озимой пшеницы

Таблица 18 – Динамика относительного содержания азота в растениях озимой пшеницы и коэффициенты корреляции с NDVI их посевов

№ поля	Дата отбора				R _{corr.}	
	09.04	30.04	21.05	04.06	NDVI	NDVI с учетом K_{sdc}
2012 год						
1	3,95	2,38	1,75	0,96	-0,90	-0,91
2	3,78	2,24	1,67	0,86	-0,88	-0,95
3	4,01	2,59	1,83	0,98	-0,97	-0,99
4	3,58	2,79	1,76	1,12	-0,83	-0,87
5	3,67	2,16	1,89	0,93	-0,85	-0,85
6	4,16	2,45	1,97	1,45	-0,92	-0,95
7	3,76	2,24	1,85	1,15	-0,91	-0,93
Среднее	3,84	2,41	1,79	1,06	-0,89	-0,92
2013 год						
1	2,77	2,46	0,92	0,82	-0,83	-0,88
2	3,00	2,24	0,71	0,93	-0,84	-0,99
3	2,88	2,33	1,02	0,49	-0,80	-0,94
4	3,89	2,71	1,57	1,14	-0,73	-0,91
5	3,32	2,36	1,20	1,06	-0,98	-0,94
6	3,15	2,29	1,07	0,90	-0,86	-0,91
7	2,67	2,06	0,72	0,77	-0,74	-0,99
8	2,96	2,95	0,86	0,92	0,18	-0,47
Среднее	3,08	2,42	1,01	0,88	-0,82	-0,93
2014 год						
1	3,78	1,95	1,48	0,92	-0,72	-0,90
2	3,98	1,91	1,80	0,99	-0,74	-0,73
3	3,47	1,45	1,34	0,86	-0,92	-0,84
4	4,40	1,53	1,52	0,99	-0,91	-0,85
5	3,69	2,03	1,53	0,97	-0,57	-0,88
6	4,01	1,86	1,45	0,70	-0,59	-0,91
7	4,05	1,74	1,37	0,65	-0,81	-0,82
8	3,69	1,41	0,90	0,46	-0,76	-0,88
9	3,99	1,59	1,21	1,00	-0,93	-0,85
10	3,56	1,60	1,07	0,68	-0,85	-0,83
Среднее	3,86	1,71	1,37	0,82	-0,82	-0,86

В предыдущих разделах нами было показано, что использование коэффициента поверхностной плотности посева существенно улучшает взаимосвязь NDVI с фотосинтетическими показателями растений озимой пшеницы.

Такая же ситуация складывается и с количеством азота в растительных образцах. В условиях 2012 года коэффициент корреляции между содержанием NO_3 и $\text{NDVI} \cdot K_{\text{cadc}}$ составил -0,92. В 2013 году значение этого показателя было 0,93 со знаком минус, что на 13,4% больше, чем в случае без учета коэффициента поверхностной плотности посева. В 2014 году коэффициент корреляции между содержанием азота в растениях озимой пшеницы и вегетационным индексом, умноженным на K_{cadc} , был на -0,04 выше, чем использование только NDVI. Следует отметить, что в рассматриваемом году такая же закономерность отмечалась при изучении взаимосвязи количества зеленых пигментов в растениях озимой пшеницы с NDVI их посевов. Это еще раз подтверждает высокую степень сопряжения таких характеристик физиологического состояния растений как содержание в них хлорофилла и азота.

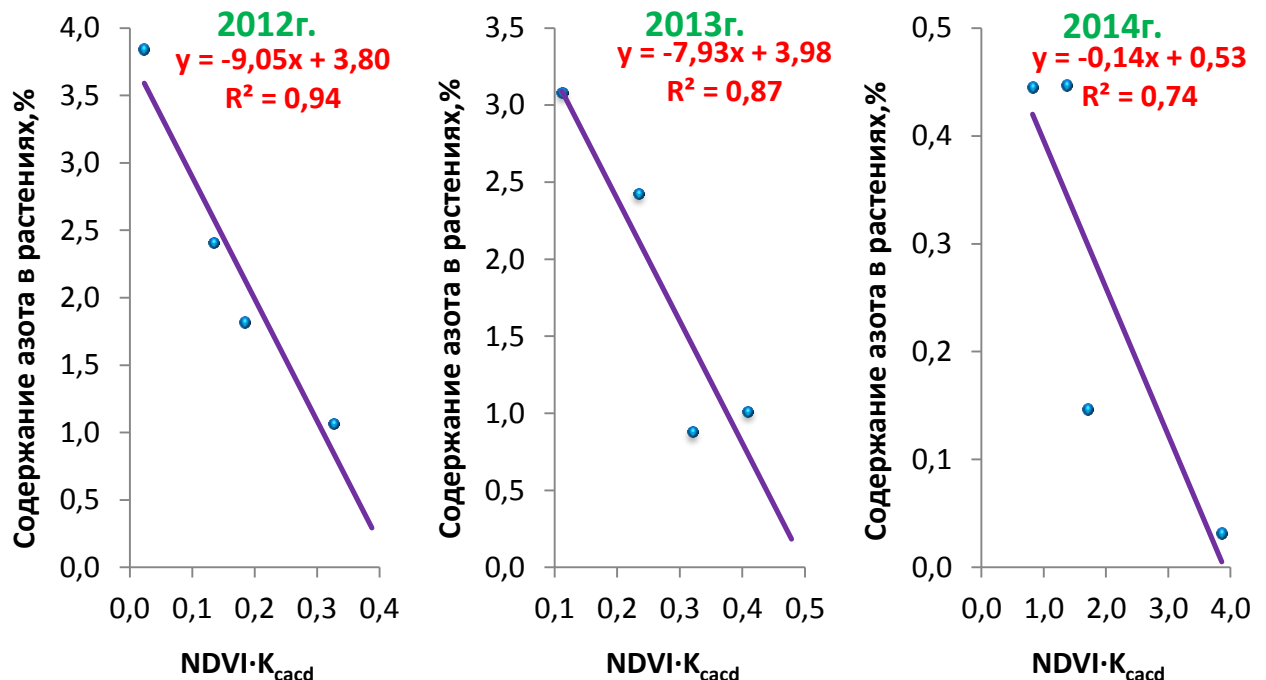


Рисунок 26 – Регрессионные модели зависимости содержания азота в растениях озимой пшеницы от NDVI их посевов

Нами были построены регрессионные модели зависимости содержания азота в растениях озимой пшеницы и величиной вегетационного индекса их

посевов (рисунок 26). Полученные модели характеризуются высокой достоверностью не зависимо от условий выращивания. В 2012 году коэффициент аппроксимации был равен 0,94, а в 2013 и в 2014 годах R^2 – 0,86 и 0,74 соответственно. Тем не менее, некоторые различия коэффициентов и свободных членов в уравнениях регрессии говорит о влиянии погодных условий на характер взаимосвязи между рассматриваемыми показателями.

Таким образом, существует тесная взаимосвязь между содержанием азота в растениях озимой пшеницы и NDVI их посевов, которая оценивается коэффициентом корреляции равным -0,84. При использовании вегетационного индекса, учитывающего коэффициент поверхностной плотности посева такая взаимосвязь усиливается. К сожалению, в наших опытах не удалось установить стабильной связи количества сырой клейковины в зерне с содержанием азота в растениях и NDVI их посевов на VIII этапе органогенеза (таблицы 19, 20 и 21).

Таблица 19 – Коэффициенты корреляции содержания сырой клейковины в зерне озимой пшеницы с количеством азота в растениях и NDVI в колосе, 2012г.

№ поля	Сорт	Предшественник	Сырая клейковина в зерне, %	Количество азота в растениях, %	NDVI	NDVI с учетом K_{sdc}
2012						
1	Ксения	оз.рапс	22,45	1,75	0,66	0,14
2	Скарбница	пар	21,78	1,67	0,70	0,19
3	Украинка од.	оз.пшеница	22,56	1,02	0,71	0,18
4	Селянка од.	горох	21,63	1,09	0,66	0,18
5	Багира	пар	23,57	1,86	0,72	0,22
6	Березит	оз.рапс	22,17	1,97	0,66	0,22
7	Украинка од.	мнгл.травы	21,87	1,85	0,61	0,18
Среднее			22,29	1,61	0,67	0,18
$R_{corr.}$ с количеством сырой клейковины				0,25	0,60	0,30

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что значения коэффициентов корреляции между содержанием сырой клейковины в зерне и

NDVI в колошение низки и разнонаправленны. Тем не менее, в 2013 году связь между количеством азота и качеством зерна была довольно тесной, но в 2014 году она практически отсутствовала. Полученные результаты, с нашей точки зрения, связаны с тем, что в качестве объектов исследований использовались посевы различных генотипов, которые обладают сортовыми особенностями формирования качества зерна, что, вероятно, и нашло отражение в коэффициентах корреляции между изученными показателями.

Таблица 20 – Коэффициенты корреляции содержания сырой клейковины в зерне озимой пшеницы с количеством азота в растениях и NDVI в колошение, 2013г.

№ поля	Сорт	Предшественник	Сырая клейковина в зерне, %	Количество азота в растениях, %	NDVI	NDVI с учетом K_{sdc}
2013 год						
1	Полевик	горох	17,8	0,92	0,73	0,36
2	Казачий атаман	горох	16,4	0,71	0,68	0,17
3	Багира	пар	21,1	1,02	0,72	0,70
4	Одесская 200	соя	26,7	1,57	0,71	0,25
5	Одесская 200	пар	23,6	1,20	0,66	0,52
6	Зустрич	пар	23,0	1,07	0,77	0,61
7	Писанка	соя	21,9	0,72	0,75	0,19
8	Виктория од.	пар	21,2	0,86	0,72	0,47
Среднее			21,5	1,01	0,72	0,41
$R_{corr.}$ с количеством сырой клейковины				0,81	0,13	0,20

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что данные дистанционного зондирования Земли можно использовать как объективный показатель состояния посевов озимой пшеницы при анализе характеристик, полученных в рамках проведения почвенно-растительной диагностики минерального питания для разработки рекомендаций по применению азотных подкормок (формы, сроки и дозы).

Таблица 21 – Коэффициенты корреляции содержания сырой клейковины в зерне озимой пшеницы с количеством азота в растениях и NDVI в колосении, 2014г.

№ поля	Сорт	Предшественник	Сырая клейковина в зерне, %	Количество азота в растениях, %	NDVI	NDVI с учетом K_{sdc}
2014 год						
1	Писанка	оз. рапс	22,4	1,48	0,73	0,45
2	Скарбница	пар	20,8	1,80	0,74	0,50
3	Одесская 200	горох	19,0	1,34	0,80	0,49
4	Одесская 200	горох	24,0	1,52	0,74	0,52
5	Одесская 200	горох	25,2	1,53	0,72	0,43
6	Одесская 200	горох	17,6	1,45	0,66	0,50
7	Одесская 200	мнгл.травы	10,0	1,37	0,74	0,42
8	Пилипенко	горох	18,6	0,90	0,54	0,17
9	Скарбница	пар	18,8	1,21	0,81	0,59
10	Украинка од.	оз.пшеница	17,6	1,07	0,78	0,41
Среднее			19,4	1,37	0,73	0,45
$R_{corr.}$ с количеством сырой клейковины				0,35	-0,01	0,16

Вегетационный индекс NDVI, равно как и любой другой показатель, в отдельности не может быть использован в качестве критерия необходимости, а тем более установления дозы применения минеральных удобрений (Ерошенко Ф.В., 2014). Например, содержание азота в растениях – очень важный показатель, без которого нельзя дать научно-обоснованные рекомендации по применению подкормок этого элемента минерального питания. Тем не менее, он указывает лишь на достаточность или недостаточность этого элемента для оптимального роста и развития озимой пшеницы. Но без знания количества азота в метровом слое почвы невозможно дать заключение по дозе применяемых удобрений, так как избыток этого элемента может привести даже к более негативным для растения последствиям, чем его недостаток. С другой стороны, усвоение азота возможно только при достаточной влагообеспеченности посевов. Кроме того, корректировку подкормок следует проводить с

учетом сортовых особенностей, предшественников и других элементов технологии возделывания, а так же фазы развития растений.

ГЛАВА 4

ОЦЕНКА ПРОДУКТИВНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

4.1. Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае

Быстрое развитие спутниковых технологий в последние десятилетия открыло много новых возможностей для оперативного и объективного мониторинга посевов сельскохозяйственных культур как на уровне страны или таких субъектов федерации, как край, область, район, так и отдельных хозяйств, полей и даже точек (Лупян Е.А. и др., 2009; Савин И.Ю. и др., 2011).

Используя специфичность динамики NDVI озимых культур, в Институте космических исследований РАН разработан метод, позволяющий выделить площади, занимаемые ими, и получить усредненные значения вегетационного индекса для каждого района и края в целом (Бурцев М.А., и др. 2006; Толпин В.А., и др. 2011). Мы использовали эти данные для характеристики вегетации озимой пшеницы Ставропольского края. Такой подход, с нашей точки зрения, вполне допустим по следующим соображениям.

В крае из озимых культур возделываются: пшеница, ячмень, тритикале, рожь и рапс. По данным Министерства сельского хозяйства Ставропольского края в 2012 году на озимую пшеницу приходилось 92,3% от посевных площадей по всем озимым (рисунок 27). Озимый рапс занимает всего 1,6% посевной площади, что значительно ниже допустимой ошибки опыта. Тритикале и рожь на Ставрополье практически не возделываются. Наибольшую площадь среди не пшеничных посевов занимает ячмень – 5,9%. Ячмень и пшеница культуры со схожими физиологическими особенностями роста и развития, а условия их выращивания одинаково отражаются на конечной продук-

ции. В связи с этим, нами был проведен анализ взаимосвязи урожайности озимой пшеницы и озимого ячменя по всем районам Ставропольского края.

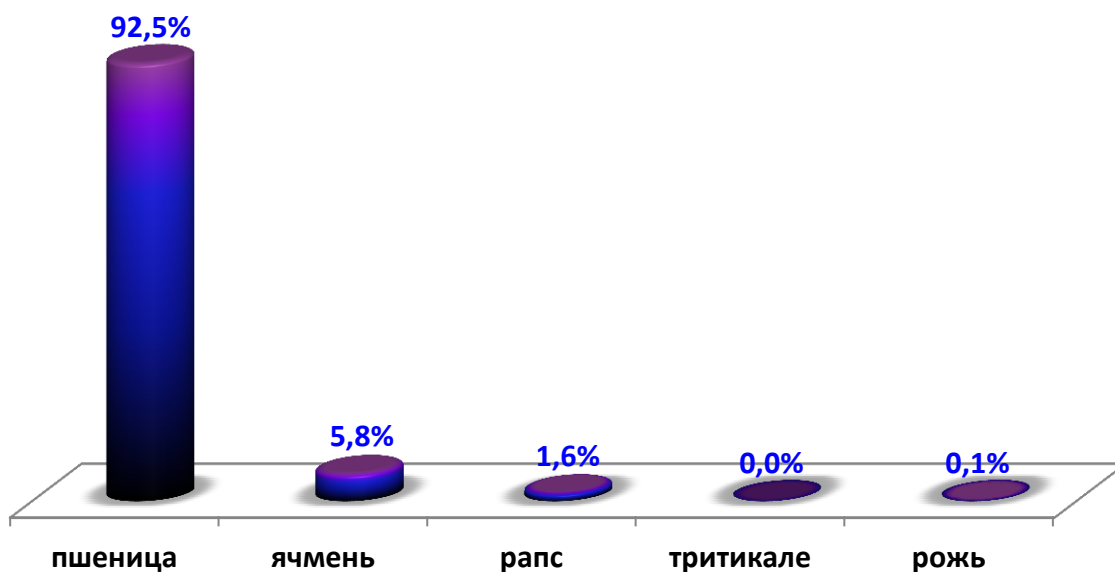


Рисунок 27 – Структура посевных площадей озимых культур в Ставропольском крае в 2012г. (общая площадь – 1688,9 тыс. га)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что между урожаем зерна этих культур существует тесная взаимосвязь. Так коэффициент корреляции в среднем по всем районам края за период с 2003 по 2013гг. составляет величину равную 0,8 (рисунок 28). Следует отметить, что этот показатель ни в одном из районов не был менее 0,5. Только в Труновском, Красногвардейском и Благодарненском районах коэффициенты корреляции составили величины 0,52, 0,55 и 0,58 соответственно, и это минимальные значения. В Курском, Туркменском и Буденновском районах связь урожая зерна озимой пшеницы и озимого ячменя выражается коэффициентами корреляции равными 0,90, 0,91 и 0,94. Полученные результаты, возможно, связаны с хозяйственными и климатическими особенностями предприятий отдельных районов.

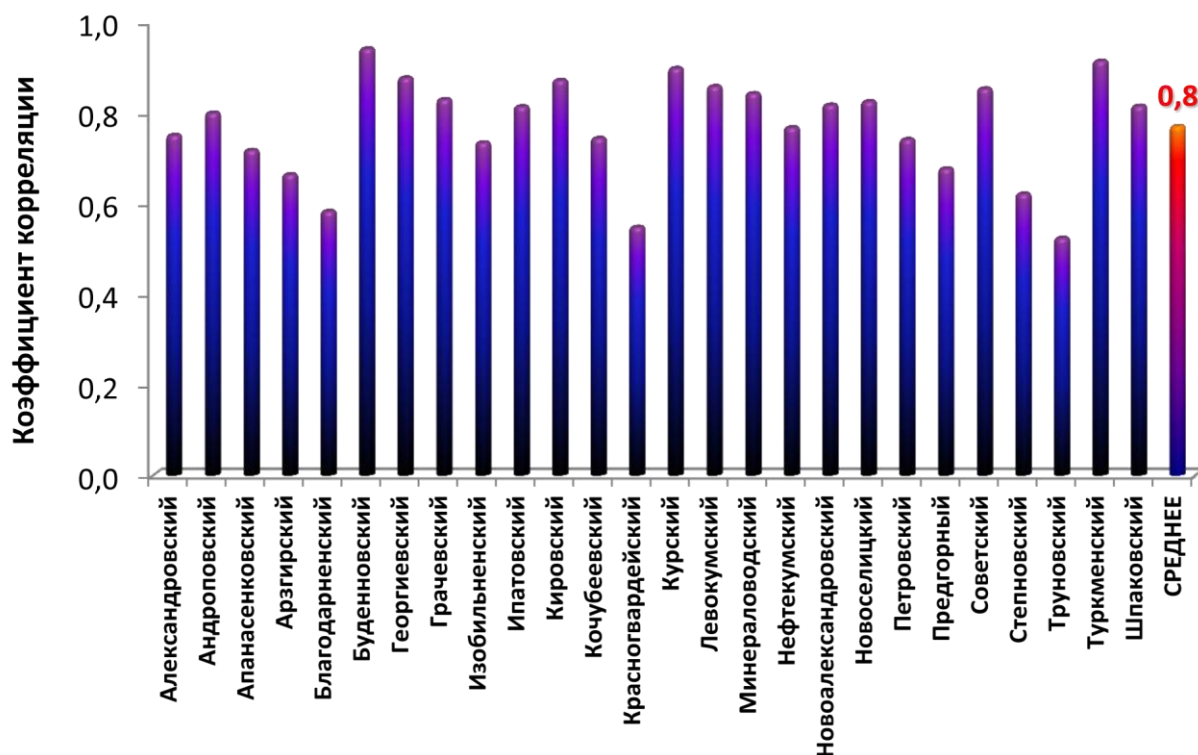


Рисунок 28 – Взаимосвязь между урожаем озимой пшеницы и озимого ячменя по районам Ставропольского края (за 2003-2013гг.)

Таким образом, проведенный нами анализ позволяет сделать вывод о том, что данные сервиса «Вега» по озимым культурам могут быть использованы для характеристики хода вегетации озимой пшеницы в Ставропольском крае.

Большой научный интерес представляют исследования по изучению взаимосвязи данных космического мониторинга посевов сельскохозяйственных культур и их урожайностью (Gutiérrez-Rodríguez M. et al., 2004; Mandal U.K. et al., 2007; Wall et al., 2007; Galvão L.S. et al., 2009; Cicek H. et al., 2010; Saleem M.F. et al., 2010). Спутниковые данные применимы к прогнозированию урожайности ввиду их повторяемости (Manjunath et al., 2002; Prasad et al., 2006; Becker-Reshef et al., 2010; Куссуль Н.Н. и др., 2008; Савин и др., 2010). Прогноз урожайности осуществляется различными методами, среди которых визуальная оценка состояния полей, статистическая обработка, поиск по году аналогу, модели роста и регрессионные подходы (Pinter et al., 1981; Doraiswamy, Cook, 1995; Chipanshi et al., 1999; Maselli, Rembold, 2001; Wall et al., 2007; Ерошенко Ф.В., Чередниченко И.Г., 2013).

Нами была построена динамика NDVI посевов озимой пшеницы для Ставропольского края по усредненным значениям за период 2003-2014 гг. (рисунок 29).

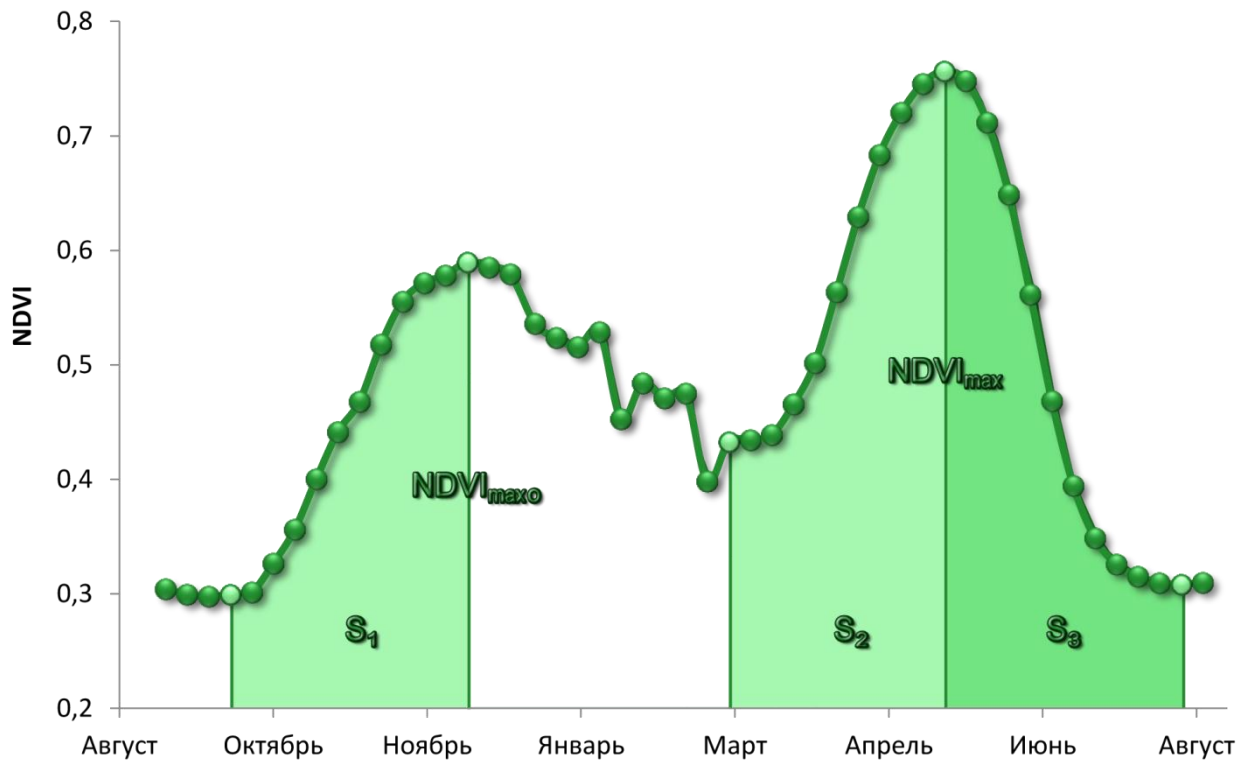


Рисунок 29 – Динамика NDVI озимой пшеницы Ставропольского края, 2003-2014гг. (S_1 – суммарный NDVI за период всходы – конец осенней вегетации; S_2 – суммарный NDVI за период возобновление весенней вегетации - колошение; S_3 – суммарный NDVI за период колошение – полная спелость, $NDVI_{max}$ – максимальное значение NDVI в период возобновление весенней вегетации – полная спелость)

Рост вегетационного индекса в осенний период продолжается вплоть до наступления отрицательных значений температуры воздуха. Это обусловлено развитием посевов в период осенней вегетации, когда наблюдается не только увеличение высоты посева, но и площади его проективного покрытия за счет, как непосредственного увеличения органов растений, так и из-за появления дополнительных побегов кущения.

В период с декабря по март наблюдается снижение значений NDVI, связанные с одной стороны с отмиранием части растительной массы из-за действия отрицательных температур, а с другой – наличием снежного покро-

ва. Неравномерности снижения NDVI в этот период, с нашей точки зрения, могут быть обусловлены оттепелями.

С возобновлением весенней вегетации начинается активное развитие посевов, отражением чего является увеличение их NDVI. Максимальное значение этого показателя отмечается в начале фазы колошения (VIII этап органогенеза). Далее наблюдается снижение этого показателя, что, на наш взгляд, связано с существенно меньшим количеством хлорофилла в появившихся колосьях по сравнению с листьями, и они при этом составляют значительную часть проективного покрытия посева. После колошения (цветение, формирование и налив зерна) при уменьшении площади ассимиляционной поверхности, а, следовательно, и отраженной IR, и уменьшении содержания хлорофилла в растениях, возрастает вклад в NDVI увеличивающегося при этом R, что находит отражение в уменьшении значений этого показателя в генеративный период растений озимой пшеницы.

Таким образом, динамика вегетационного индекса NDVI отражает процессы роста и развития растений озимой пшеницы, что может быть использовано при оценке их физиологического состояния.

Для характеристики изменений вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы в онтогенезе, с нашей точки зрения, могут быть использованы следующие показатели:

1. суммарный NDVI за период всходы – прекращение осенней вегетации (S_1);
2. средний NDVI за период всходы – прекращение весенней вегетации ($NDVI_{aver.}$);
3. суммарный NDVI за период колошение – полная спелость (S_3);
4. максимальный NDVI за период всходы – прекращение осенней вегетации ($NDVI_{maxo}$);
5. суммарный NDVI за период возобновление весенней вегетации – колошение (S_2);

6. средний NDVI за период возобновление весенней вегетации – полная спелость ($NDVI_{aver.}$);
7. максимальный за период возобновление весенней вегетации – полная спелость ($NDVI_{max}$).

Суммарные показатели – это площади под соответствующим участком динамики NDVI или интеграл этих участков функции изменений вегетационного индекса во времени. Они могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$S_i = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{NDVI_i + NDVI_{i+1}}{2} (d_{i+1} - d_i)$$

где n – количество измерений;

$NDVI_i$ – NDVI i -го измерения;

d_i – дата i -го измерения.

При анализе взаимосвязи продуктивности сельскохозяйственных культур и данными дистанционного зондирования Земли часто используют средний NDVI (Куссуль Н.Н. и др., 2012). Нами была построена регрессионная зависимость урожая зерна озимой пшеницы Ставропольского края от этого показателя (рисунок 30). Полученная модель характеризуется очень низким значением коэффициента аппроксимации – 0,0004, и поэтому не отражает взаимосвязи анализируемых показателей (Ерошенко Ф.В., Чередниченко И.Г., 2013; Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В., 2014). Это может быть связано из-за того, что в анализ включены значения NDVI в осенне-зимний период. Во-первых, очень часто листовой аппарат растений озимой пшеницы из-за действия отрицательных температур до возобновления весенней вегетации отмирает, а во-вторых, на величину вегетационного индекса оказывает влияние не только неравномерность снежного покрова, но и оттепели.

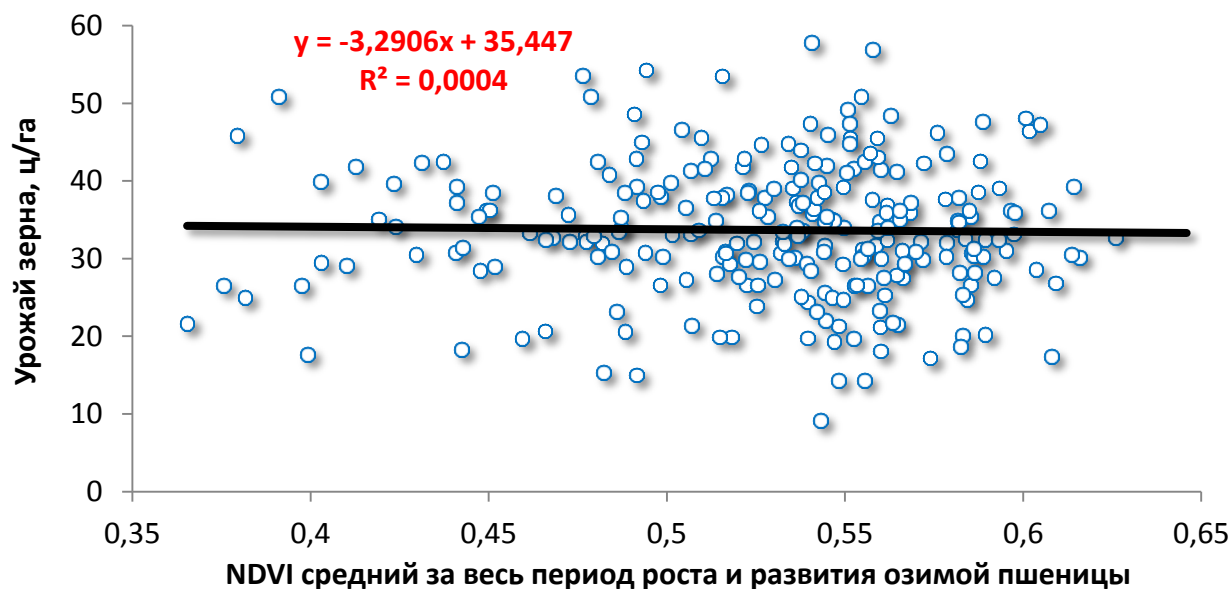


Рисунок 30 – Регрессионная модель зависимости урожая зерна от NDVI среднего за весь период роста и развития озимой пшеницы (точки – все районы Ставропольского края за годы с 2003 по 2014гг.)

Тем не менее, коэффициент корреляции между средним NDVI за весь период роста и развития растений озимой пшеницы с урожаем зерна находится в пределах от 0,31 (Ипатовский район) до 0,92 (Кировский район) в зависимости от района (рисунок 31), а его среднее значение составляет величину 0,64.

Нами установлено, что при использовании в анализе данных изменений вегетационного индекса только за весенне-летний период существенно повышается коэффициент корреляции между урожаем зерна и средним NDVI. Так наименьшее значение этого показателя уже составляет 0,51 (Андроповский район), а наибольшее – 0,94 (Грачевский район). В среднем по всем районам Ставропольского края коэффициент корреляции равен 0,76. В связи с этим, нами была построена регрессионная зависимость урожая зерна озимой пшеницы от среднего NDVI за весенне-летний период по всем районам Ставропольского края за последние 11 лет (рисунок 32)

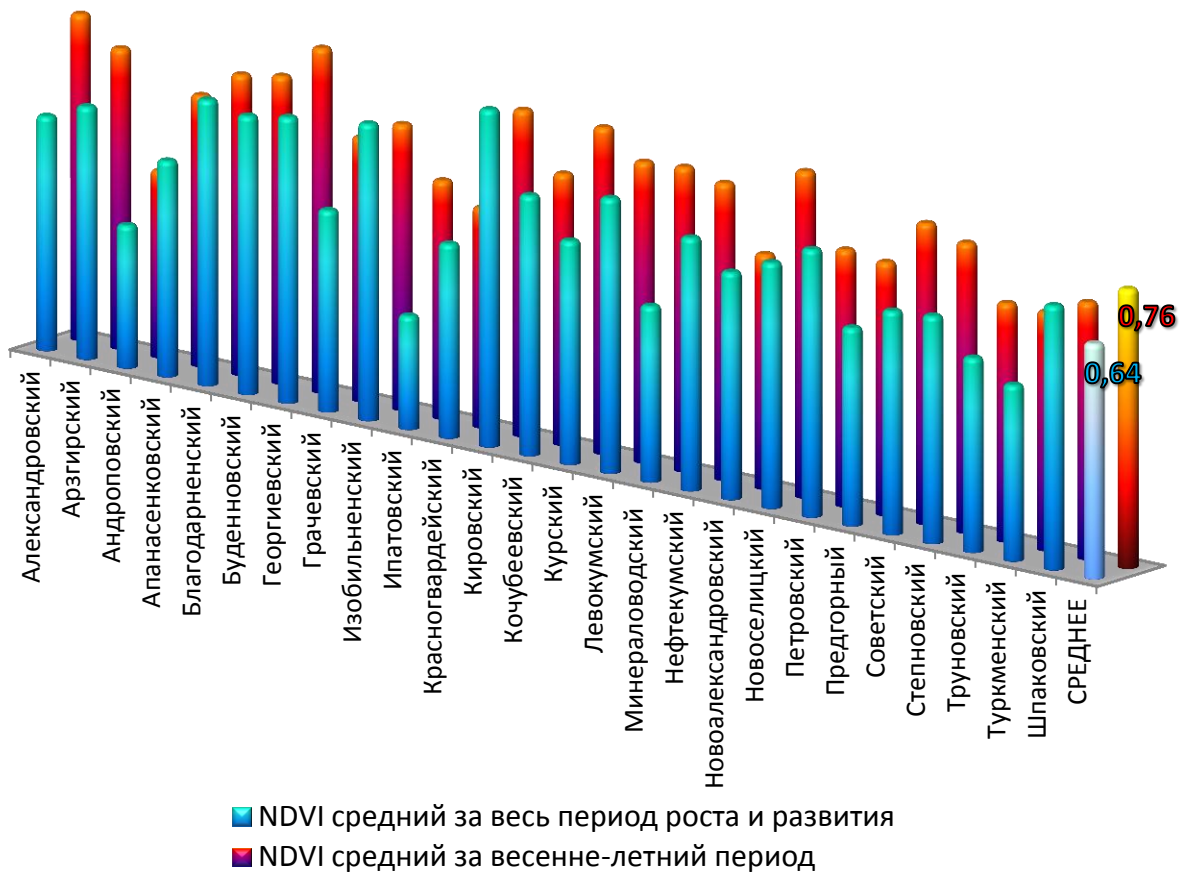


Рисунок 31 – Коэффициенты корреляции между урожаем зерна озимой пшеницы и NDVI по районам Ставропольского края за 2003-2014гг.

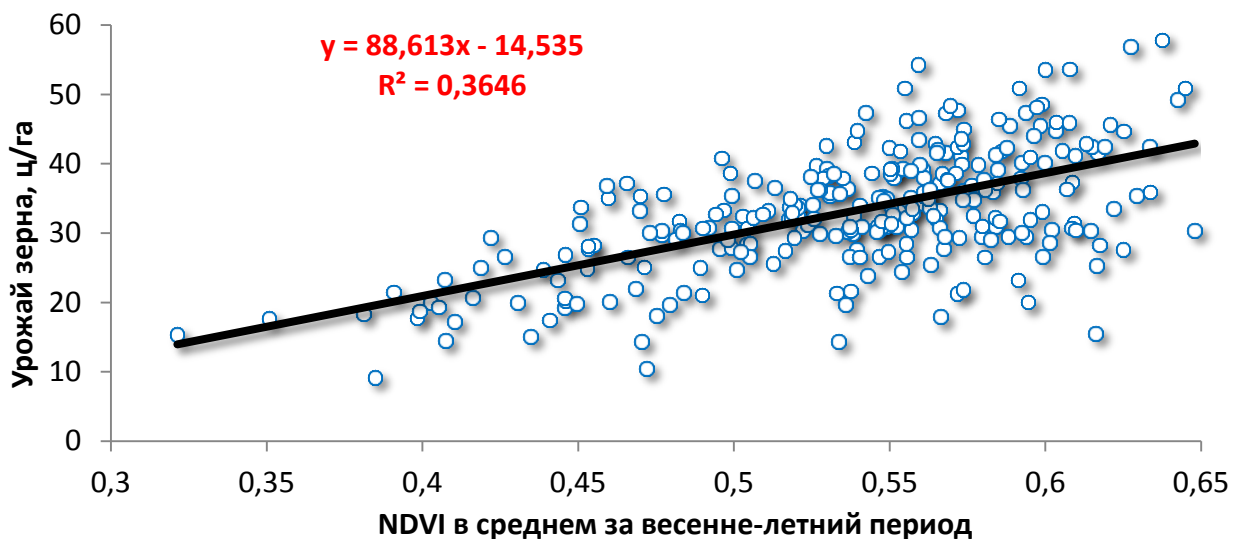


Рисунок 32 – Регрессионная модель зависимости урожая зерна озимой пшеницы от NDVI среднего за весенне-летний период (точки – все районы Ставропольского края за годы с 2003 по 2014гг.)

Полученная таким образом регрессионная модель характеризуется более высоким значением коэффициента аппроксимации ($R^2=0,36$), чем при ис-

пользовании средних значений NDVI за весь период роста и развития озимой пшеницы.

Следовательно, для Ставропольского края регрессионные модели зависимости урожая зерна озимой пшеницы от NDVI среднего за сельскохозяйственный год недостоверны. Использование вегетационного индекса среднего за весенне-летний период позволяет повысить точность таких моделей.

Нами были рассчитаны регрессионные зависимости урожая зерна озимой пшеницы от NDVI среднего за вегетативно-генеративный период для каждого района Ставропольского края (таблица 22). Полученные регрессионные уравнения с достаточно высокой степенью достоверности дают зависимость урожайности от вегетационного индекса. Для Андроповского, Изобильненского, Кировского, Кочубеевского, Курского, Нефтекумского, Новоселицкого, Советского и Шпаковского районов коэффициент аппроксимации составил величину более 0,50, а для Александровского, Арзгирского, Левокумского и Минераловодского – 0,60, а для Георгиевского – 0,82. В среднем по всем районам Ставропольского края $R^2=0,50$.

В нашем анализе у Апанасенковского, Красногвардейского и Предгорного районов коэффициент аппроксимации полученных моделей был менее 0,30, тем не менее, коэффициенты корреляции между урожаем зерна озимой пшеницы и NDVI среднего за весенне-летний период у них составляют величины равные 0,74, 0,60 и 0,69 соответственно. Полученные результаты, с нашей точки зрения, обусловлены влиянием почвенно-климатических условий на характер взаимосвязи продуктивности и данных дистанционного зондирования Земли. Такие выводы согласуются с литературными данными (Куссуль Н.Н. и др., 2012).

Таблица 22 – Характеристики регрессионной зависимости урожая зерна озимой пшеница от NDVI за вегетативно-генеративный период по районам Ставропольского края. Y – урожай зерна посевов озимой пшеницы; X – средний за весенне-летний период NDVI посевов озимой пшеницы (2003-2014гг.)

№ п/п	Район Ставропольского края	Уравнение регрессии	Достоверность регрессии
1	Александровский	$y = 130,21x - 39,63$	$R^2 = 0,64$
2	Андроповский	$y = 89,00x - 20,64$	$R^2 = 0,60$
3	Апанасенковский	$y = 58,16x - 0,93$	$R^2 = 0,23$
4	Арзгирский	$y = 106,90x - 24,89$	$R^2 = 0,67$
5	Благодарненский	$y = 78,08x - 8,42$	$R^2 = 0,40$
6	Буденновский	$y = 105,47x - 19,23$	$R^2 = 0,46$
7	Георгиевский	$y = 145,94x - 44,69$	$R^2 = 0,82$
8	Грачевский	$y = 107,55x - 28,87$	$R^2 = 0,42$
9	Изобильненский	$y = 130,48x - 35,80$	$R^2 = 0,60$
10	Ипатовский	$y = 84,81x - 12,31$	$R^2 = 0,36$
11	Кировский	$y = 103,96x - 23,17$	$R^2 = 0,53$
12	Кочубеевский	$y = 151,23x - 38,31$	$R^2 = 0,60$
13	Красногвардейский	$y = 19,70x + 30,32$	$R^2 = 0,01$
14	Курский	$y = 95,00x - 19,01$	$R^2 = 0,58$
15	Левокумский	$y = 131,11x - 29,99$	$R^2 = 0,66$
16	Минераловодский	$y = 160,41x - 62,19$	$R^2 = 0,68$
17	Нефтекумский	$y = 103,89x - 21,89$	$R^2 = 0,51$
18	Новоалександровский	$y = 108,01x - 13,75$	$R^2 = 0,42$
19	Новоселицкий	$y = 118,96x - 24,68$	$R^2 = 0,52$
20	Петровский	$y = 82,36x - 12,25$	$R^2 = 0,36$
21	Предгорный	$y = 58,92x - 5,16$	$R^2 = 0,28$
22	Советский	$y = 103,99x - 14,37$	$R^2 = 0,51$
23	Степновский	$y = 91,84x - 16,00$	$R^2 = 0,48$
24	Труновский	$y = 101,52x - 15,96$	$R^2 = 0,40$
25	Туркменский	$y = 90,61x - 15,08$	$R^2 = 0,38$
26	Шпаковский	$y = 86,63x - 21,19$	$R^2 = 0,54$

Таким образом, для районов Ставропольского края существует тесная взаимосвязь между урожаем зерна озимой пшеницы и NDVI, которая оцени-

вается средним коэффициентом корреляции равным 0,76. Большое влияние на такую взаимосвязь оказывают почвенно-климатические условия.

4.2. Почвенно-климатические зоны Ставропольского края и регрессионные модели зависимости урожайности озимой пшеницы от NDVI

В Ставропольском крае 4 почвенно-климатические зоны: крайне засушливая, засушливая, неустойчивого увлажнения и достаточного увлажнения. По данным сервиса «ВЕГА» и с учетом посевных площадей озимой пшеницы в каждом районе, нами были рассчитаны динамики значений NDVI по всем почвенно-климатическим зонам Ставропольского края за период с 2003 по 2014гг., среднемноголетние которых представлены на рисунке 33 (Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В., 2014). Полученные результаты свидетельствуют о том, что онтогенетические изменения NDVI посевов озимой пшеницы характеризуются особенностями, которые зависят от зоны возделывания. Из рисунка видно, что с улучшением условий выращивания увеличиваются значения вегетационного индекса, как во время осенней вегетации, так и в репродуктивный период. В то же время, начиная с момента весеннего возобновления вегетации и до конца фазы трубкования, наблюдается выравнивание по почвенно-климатическим зонам значений NDVI. Полученные результаты могут быть обусловлены тем, что лучшие условия влагообеспечения почвы перед посевом III и IV зоны (Приложение 2) способствуют более интенсивному формированию биомассы в осенний период, а, следовательно, увеличению площади ассимиляционной поверхности. Это преимущество сохраняется и при возобновлении весенней вегетации. Дальнейшее развитие растений озимой пшеницы во всех почвенно-климатических зонах, включая крайне засушливую и засушливую, происходит на фоне относительно благоприятного водного режима, так как в этот период еще не израсходованы запасы влаги, накопленные посевами за зимний период. При этом температура воздуха в I и II зонах выше, чем в зонах достаточного и неустойчивого

увлажнения (III и IV). Такие условия способствуют более интенсивному развитию посевов и, как следствие, выравниванию значений NDVI по почвенно-климатическим зонам края в весенний период.

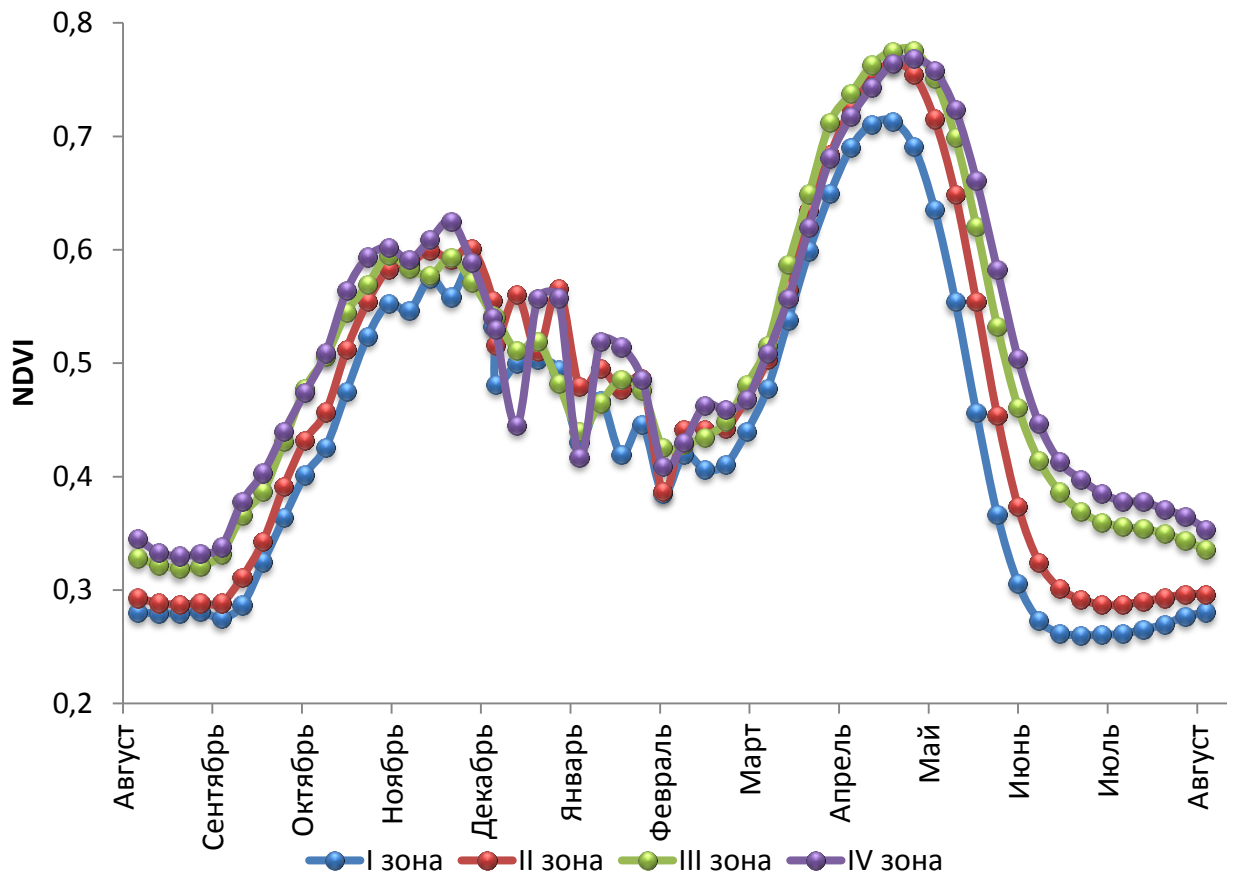


Рисунок 33 – Среднеголетние динамики NDVI посевов озимой пшеницы в различных почвенно-климатических зонах Ставропольского края, 2002-2014гг.

В конце фазы трубкования и перед началом колошения наблюдается рост температуры воздуха, а так же значительное снижение запасов продуктивной влаги в почве из-за интенсивного расхода на транспирацию и испарение, при этом в крайне засушливых районах края отмечается недостаточное их восполнение за счет выпадающих осадков. В связи с этим происходит дифференциация посевов по высоте и мощности их развития в зависимости от условий выращивания. Поэтому в точке максимума NDVI наблюдается явно выраженные различия значений этого показателя во II, III и IV зонах Ставропольского края по сравнению с I. Более высокое значение вегетационного индекса в этот период в зоне неустойчивого увлажнения, по сравнению

с зоной достаточного увлажнения, можно объяснить лучшим температурным режимом.

Генеративный период характеризуется четкой дифференциацией значений NDVI по почвенно-климатическим зонам, которая обусловлена погодными условиями.

Таким образом, онтогенетические изменения вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы каждой почвенно-климатической зоны Ставропольского края определяются условиями их выращивания.

Нами были построены регрессионные модели зависимости урожая зерна озимой пшеницы от NDVI среднего за вегетативно-генеративный период для каждой почвенно-климатической зоны Ставропольского края (рисунок 34). Полученные таким способом модели характеризуются хорошими показателями достоверности. Так коэффициенты аппроксимации для них находятся в пределах 0,62-0,85, а коэффициенты корреляции – 0,78-0,92 в зависимости от почвенно-климатической зоны края. Следует отметить, что полученная в нашем анализе корреляционная взаимосвязь урожайности озимой пшеницы с вегетационным индексом NDVI усиливается с улучшением условий выращивания. Это, возможно, связано с тем, что действие неблагоприятных факторов окружающей среды не позволяет в достаточной степени реализовать посевам потенциал продуктивности, связанный с сортовыми и технологическими особенностями в таких условиях.

На основании полученных результатов, нами была построена регрессионная зависимость урожая зерна озимой пшеницы для всего Ставропольского края, рассчитанная по данным почвенно-климатических зон. Такая модель характеризуется значительно лучшей достоверностью, чем рассчитанная по NDVI посевов озимой пшеницы отдельных районов края. Так коэффициент аппроксимации полученной модели составил величину равную 0,62, а коэффициент корреляции – 0,79.

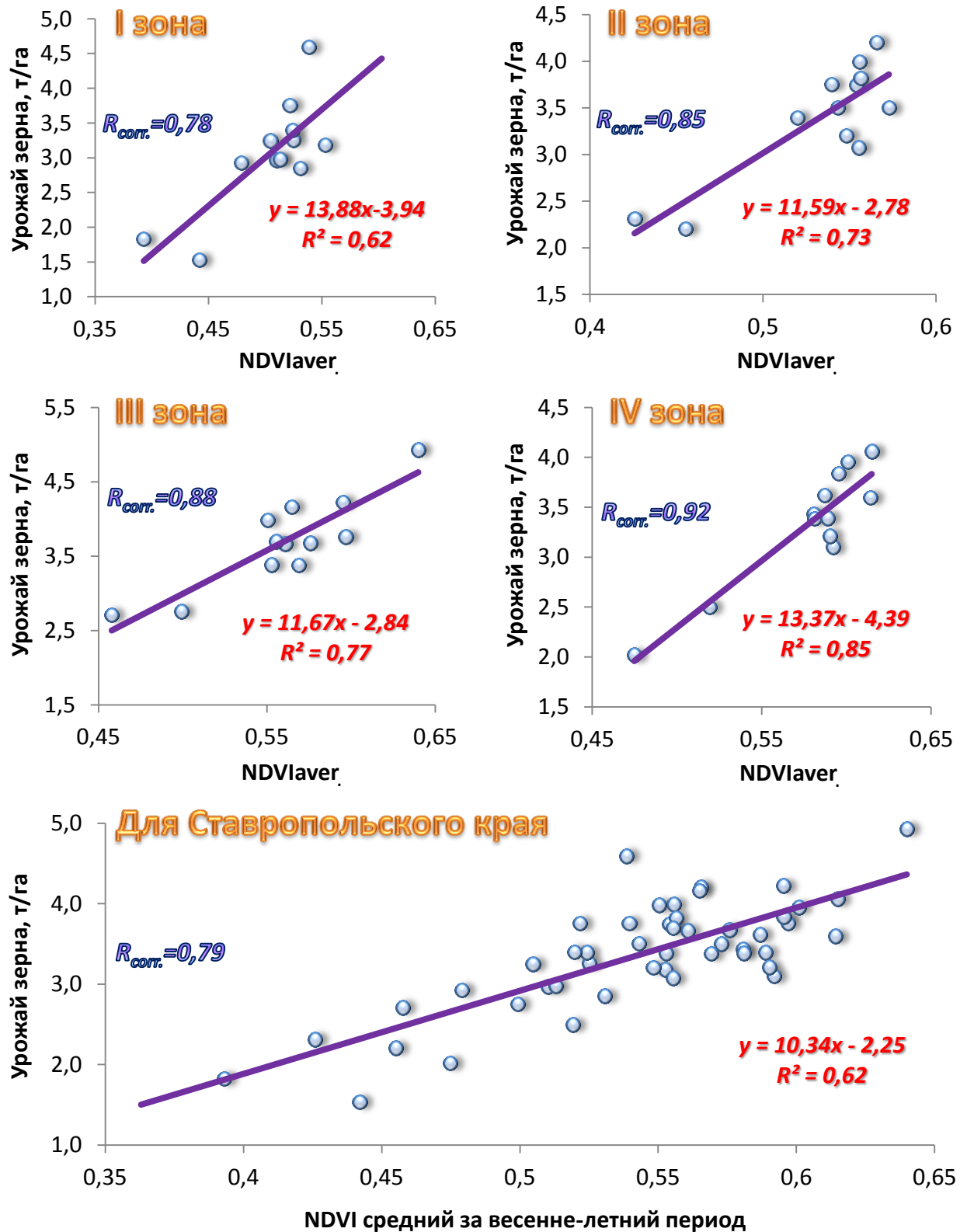


Рисунок 34 – Регрессионные модели зависимости урожая зерна от NDVI среднего за вегетативно-генеративный период по почвенно-климатическим зонам и для всего Ставропольского края (2003-2014гг.)

Таким образом, использование данных, рассчитанных для почвенно-климатических зон Ставропольского края, позволяет построить регрессион-

ную модель зависимости урожая зерна озимой пшеницы от вегетационного индекса NDVI среднего за весенне-летний период с достаточно высокой точностью ($R_{\text{corr.}}=0,79$, $R^2=0,62$).

4.3. Использование различных характеристик динамики NDVI озимой пшеницы для оценки её продуктивности в Ставропольском крае

Как уже отмечалось, динамика NDVI посевов озимой пшеницы описывается функцией с двумя максимумами – перед уходом в зиму и в начале фазы колошения (рисунок 4). Поэтому для характеристики онтогенетических изменений вегетационного индекса за время роста и развития растений можно использовать такие параметры как S_1 , $NDVI_{\text{aver.}}$, S_2 , $NDVI_{\text{max0}}$, S_3 , S_2+S_3 , $NDVI_{\text{max}}$, $NDVI_{\text{aver.}}$. Нами были рассчитаны эти параметры для каждого района Ставропольского края за период с 2003 по 2014гг. и определены коэффициенты корреляции между ними и урожаем зерна озимой пшеницы (рисунок 35).

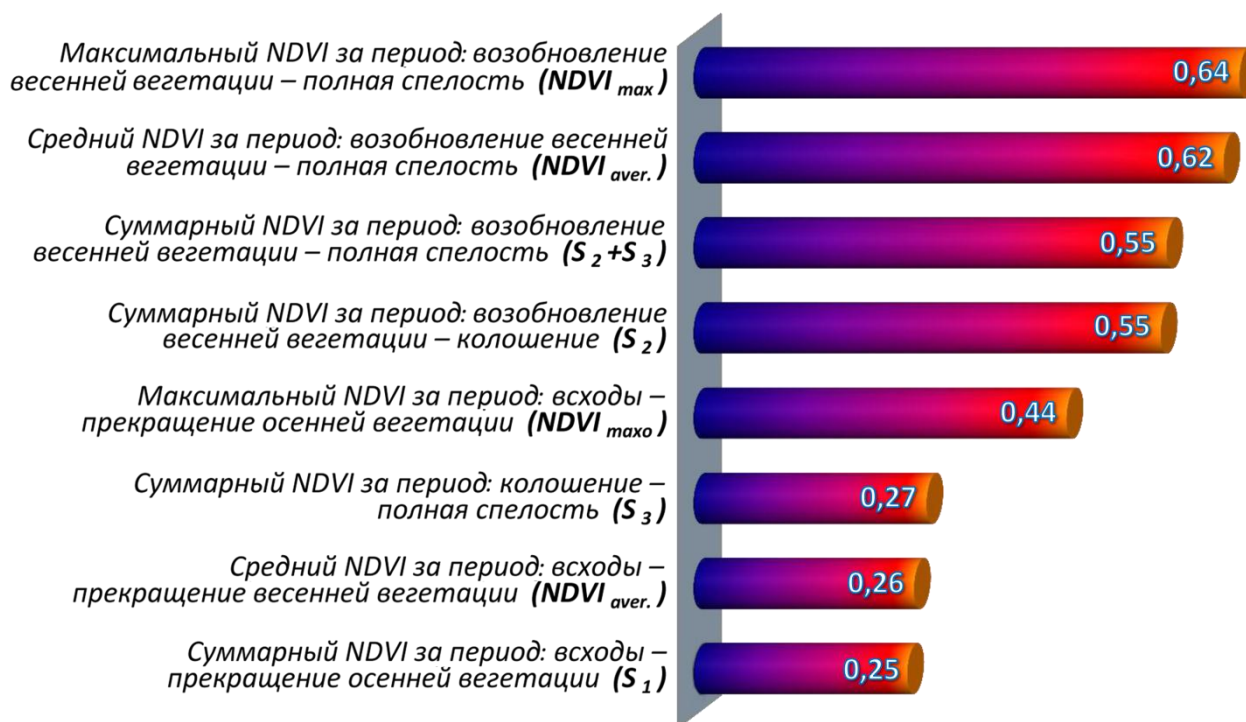


Рисунок 35 – Коэффициенты корреляции параметров динамики NDVI с урожаем зерна озимой пшеницы по всем районам Ставропольского края за период с 2003 по 2014гг.

Анализ полученных данных показал, что для условий Ставропольского края продуктивность озимой пшеницы наиболее тесно корреляционно связана с максимальным значением NDVI в период от начала возобновления весенней вегетации до полной спелости ($R_{\text{corr.}}=0,64$). Общепринятый показатель NDVI средний за этот же период характеризуется несколько меньшим значением коэффициента корреляции с урожаем ($R_{\text{corr.}}=0,62$). Следует отметить, что взаимосвязь продуктивности с суммарными значениями NDVI за периоды от начала возобновления весенней вегетации до колошения и от начала весенней вегетации до полной спелости оценивается величиной коэффициента корреляции равной 0,55. Взаимосвязь урожая зерна с остальными характеристиками динамики NDVI озимой пшеницы существенно ниже 0,5. Так коэффициенты корреляции между продуктивностью озимой пшеницы и суммарными NDVI за осенний и генеративный период, а так же со средним NDVI за период от всходов до прекращения осенней вегетации находится в пределах 0,25-0,27.

Нами были построены карты распределения по территории Ставропольского края среднемноголетней урожайности и различных показателей, характеризующих динамику NDVI озимой пшеницы по каждому району (рисунк 36). Полного совпадения ни с одной из характеристик изменений вегетационного индекса в процессе роста и развития растений с зерновой продуктивностью нами не отмечено. Тем не менее, практически у всех рассмотренных показателей высокие их значения отмечены на территории Советского, Минераловодского, Георгиевского, Кочубеевского, Красногвардейского и Новоалександровского районов, а низкие – Арзгирского, Левокумского, Нефтекумского и Апанасенковского. В целом же по краю уменьшение значений всех рассмотренных показателей происходит с северо-запада на юго-восток.

Следует отметить, что для таких показателей как максимальный и суммарный NDVI за период от начала весенней вегетации до полной спелости

наблюдается наибольшее визуальное совпадение с распределением по территории края среднемноголетних урожаев зерна озимой пшеницы.

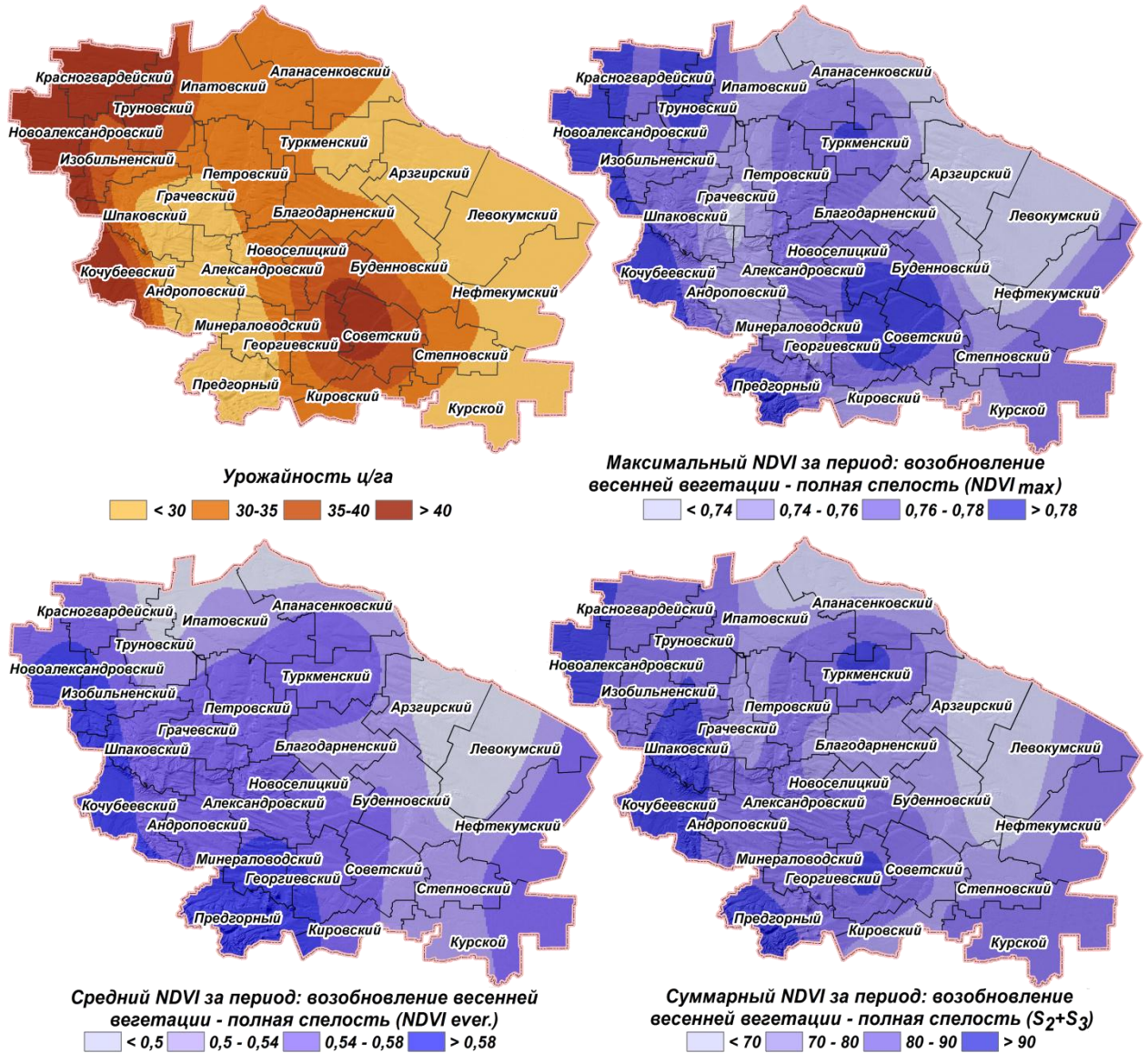


Рисунок 36 – Распределение по территории Ставропольского края среднемноголетнего значения урожая зерна и характеристик динамики NDVI озимой пшеницы (2003-2014гг.)

Таким образом, для условий Ставропольского края существует взаимосвязь урожая зерна озимой пшеницы с характеристиками динамики NDVI. Наиболее тесно она проявляется с максимальным и средним значением вегетационного индекса за период от возобновления весенней вегетации до полной спелости, для которых коэффициент корреляции оценивается величиной равной 0,64 и 0,62 соответственно.

Так как результаты наших исследований показали, что коэффициент корреляции продуктивности озимой пшеницы с максимальным значением NDVI за весенне-летний период даже несколько выше, чем со средней его величиной, которая является общепринятой для таких целей, то мы построили регрессионные модели с использованием $NDVI_{max}$ (рисунок 37). Полученные результаты свидетельствуют о том, что для каждой почвенно-климатической зоны существует тесная взаимосвязь между урожаем зерна и максимальным значением NDVI озимой пшеницы. Коэффициенты аппроксимации у таких моделей составляют величины равные 0,73, 0,59, 0,56 и 0,61, а коэффициенты корреляции – 0,85, 0,77, 0,75 и 0,78 для I, II, III и IV почвенно-климатической зоны Ставропольского края соответственно.

Анализ полученных данных показал, что для максимального NDVI за весенне-летний период, в отличие от его среднего значения, коэффициент корреляции уменьшается с улучшением условий выращивания, исключение составляет IV зона. Такую закономерность можно объяснить тем, что в засушливых и крайне засушливых условиях наиболее урожайными являются посевы, сформировавшие наиболее мощную зеленую биомассу с высоким значением NDVI к репродуктивному периоду, так как в таких условиях выращивания реутилизация – важнейший фактор продуктивности, в отличие от условий с достаточным увлажнением, где превалирует корневая функция растений при формировании урожая.

Регрессионная зависимость урожайности озимой пшеницы от максимального NDVI, построенная по данным почвенно-климатических зон Ставропольского края за период с 2003 по 2014 годы, характеризуется достаточно высокой степенью достоверности – $R^2=0,67$, $R_{corr.}=0,82$. Следует отметить, точность такой модели выше, чем построенной по данным NDVI среднего за весенне-летний период.

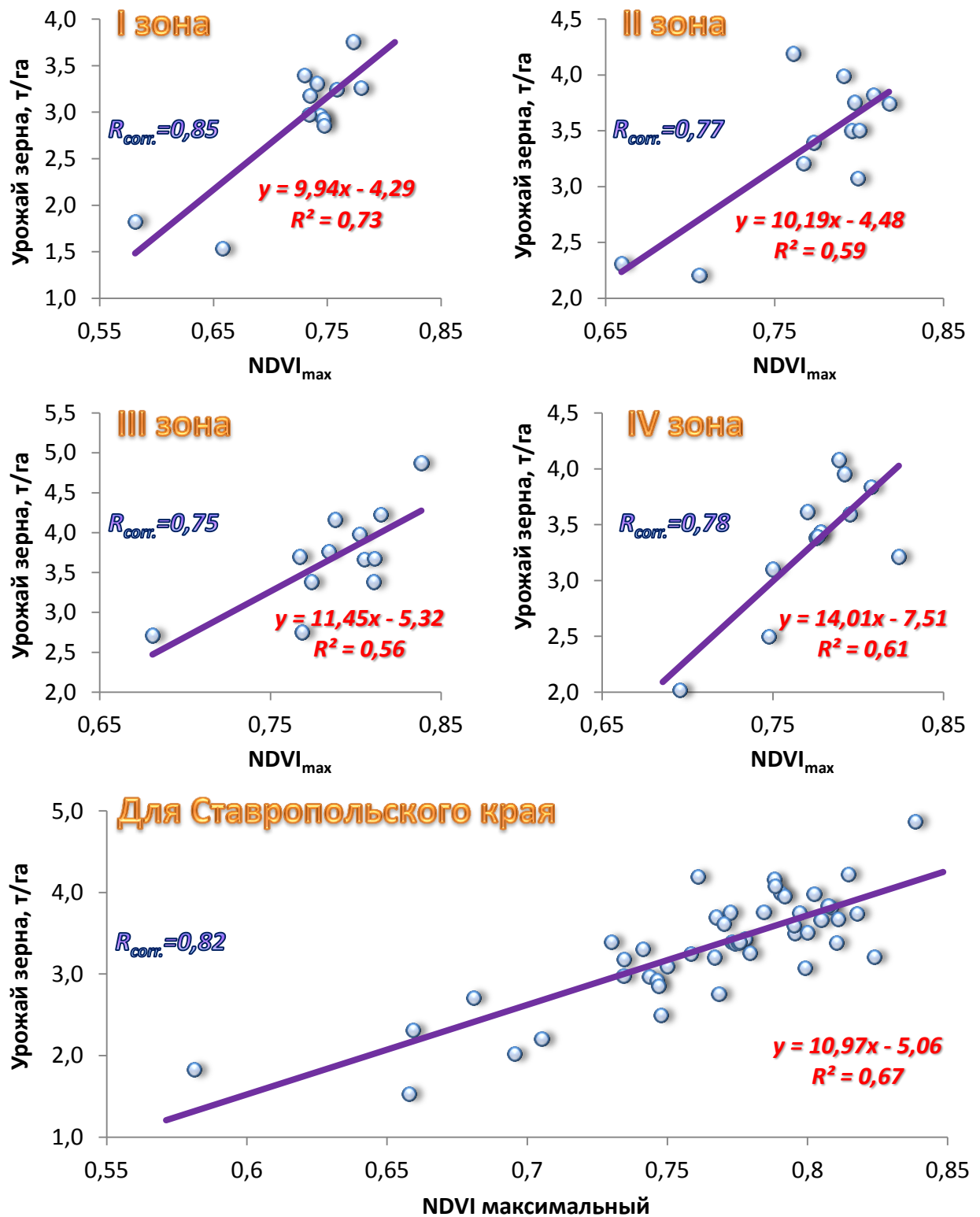


Рисунок 37 – Регрессионные модели зависимости урожая зерна от NDVI максимального за вегетативно-генеративный период по почвенно-климатическим зонам и для всего Ставропольского края (2003-2014гг.)

Преимущество регрессионной модели зависимости продуктивности озимой пшеницы от максимального значения NDVI заключается в том, что с

определенной степенью достоверности прогноз урожая зерна можно давать уже в период колошения озимой пшеницы.

Таким образом, для условий Ставропольского края связь продуктивности озимой пшеницы с максимальным NDVI за весенне-летний период характеризуется более высокой степенью достоверности по сравнению со средним его значением, при этом появляется возможность более ранних прогнозов.

Следовательно, для условий Ставропольского края существует тесная взаимосвязь между урожаем зерна озимой пшеницы и данными дистанционного зондирования Земли. Для построения регрессионных моделей зависимости продуктивности этой культуры можно использовать такие характеристики динамики вегетационного индекса NDVI как его среднее ($NDVI_{aver.}$) и максимальное ($NDVI_{max.}$) значения за весенне-летний период, при условии, что будут использованы данные для почвенно-климатических зон Ставропольского края. Точность прогнозов по таким моделям оценивается коэффициентами корреляции и аппроксимации равными $R_{corr.}=0,79$, $R^2=0,62$ и $R_{corr.}=0,82$, $R^2=0,67$ для $NDVI_{aver.}$ и $NDVI_{max.}$ соответственно. Результаты наших исследований показали, что наиболее перспективным из рассмотренных показателей для этих целей является максимальный NDVI за весенне-летний период благодаря высокой точности прогноза и более ранним временем его составления (колошение).

ГЛАВА 5

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ЗЕРНА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

5.1. Экономическая эффективность выращивания озимой пшеницы в производственных условиях

Нами была рассчитана экономическая эффективность выращивания озимой пшеницы в производственных условиях на примере полей Ставропольского НИИСХ (таблица 23). Технология обычная для зоны возделывания.

Анализ полученных данных показал, что в 2012 году наибольшая рентабельность отмечена при выращивании озимой пшеницы сорта Селянка одесская по предшественнику горох – 63,7%, а наименьшая – сорт Березит, предшественник рапс (8,5%). Следует отметить, что каких либо закономерностей экономической эффективности, связанных с предшественником в 2012 году не выявлено.

Характерным для 2013 года были высокие значения рентабельности и чистого дохода при возделывании озимой пшеницы на предшественнике пар (97,9-168,3% и 26,6-41,7 тыс.руб/га соответственно). Наименьшие показатели эффективности в этом году получены у посева сорта Казачий атаман на предшественнике горох.

В 2014 году наиболее экономически выгодным было выращивание озимой пшеницы на предшественниках пар и горох. У этих посевов рентабельность была на уровне 66,0-110,5%, а чистый доход – 26,1-37,2 тыс.руб/га, за исключением сорта Пилипенко на предшественнике горох, у которого эти показатели были равны 9,0% и 11,4 тыс.руб/га соответственно.

Рентабельность возделывания озимой пшеницы в условиях 2013 года были наибольшей, по сравнению с остальными годами исследований. В среднем по полям она составляла 79%, тогда как в 2012 и 2014 годах – 31,5 и

68,3 % соответственно. Следует отметить, что максимальный чистый доход получен в 2014 году, что связано с более высокой урожайностью.

Таблица 23 – Экономическая эффективность выращивания озимой пшеницы в производственных условиях (Ставропольский НИИСХ)

№	S, га	Сорт	Предшественник	Рентабельность, %	Общие затраты, тыс.руб/га	Чистый доход с 1 га, тыс.руб.
2012г.						
1	40,0	Ксения	оз.рапс	12,9	12,6	8,9
2	75,0	Скарбница	пар	31,5	12,6	12,1
3	25,9	Украинка одесская	оз. пшеница	24,1	13,4	11,3
4	23,0	Селянка одесская	горох	63,7	12,6	17,7
5	60,0	Багира	пар	61,3	12,8	17,6
6	30,0	Березит	оз. рапс	8,5	12,6	8,1
7	88,0	Украинка одесская	мн. травы	24,1	13,3	11,3
2013г.						
1	10,0	Полевик	горох	39,6	14,0	14,8
2	10,0	Казачий атаман	горох	3,8	13,8	7,8
3	25,0	Багира	пар	154,1	14,5	38,6
4	8,9	Одесская 200	соя	36,0	13,6	13,8
5	12,6	Одесская 200	пар	168,3	14,6	41,7
6	65,0	Зустріч	пар	97,9	14,2	26,6
7	63,0	Писанка	соя	20,1	13,5	10,7
8	35,0	Скарбница	пар	112,4	14,3	29,6
2014г.						
1	68,7	Писанка	рапс	63,6	17	23,5
2	25,0	Скарбница	пар	78,9	16,3	26,1
3	5,6	Одесская 200	горох	109,8	18,4	37,2
4	11,2	Одесская 200	горох	99,8	19,4	36,3
5	5,1	Одесская 200	горох	75,4	19,2	29,5
6	8,4	Одесская 200	горох	66,0	19,2	26,9
7	18,5	Одесская 200	мн.травы	16,8	19,2	13,7
8	47,5	Пилипенко	горох	9,0	18,9	11,4
9	63,5	Скарбница	пар	110,5	16,6	33,7
10	43,3	Украинка од.	оз.пшеница	52,9	20,03	24,3

Большой как теоретический, так и практический интерес представляет анализ связи экономической эффективности возделывания озимой пшеницы с показателями фотосинтетической продуктивности. Наши исследования по-

казали, что между поверхностными, хлорофилловыми, а так же вегетационными потенциалами посевов и рентабельностью, чистым доходом существует довольно тесная корреляционная связь (таблица 24).

Таблица 24 – **Коэффициенты корреляции между фотосинтетическими потенциалами посевов озимой пшеницы и показателями экономической эффективности возделывания**

Годы исследований	Показатель экономической эффективности	Коэффициент корреляции с		
		ПФСП	ХФСП	ВФСП
2013г.	рентабельность	0,64	0,91	0,90
	чистый доход	0,64	0,91	0,90
2014г.	рентабельность	0,73	0,67	0,85
	чистый доход	0,71	0,65	0,83
Среднее за годы исследований	рентабельность	0,68	0,79	0,88
	чистый доход	0,67	0,78	0,87

Следовательно, повышение фотосинтетической функции растений озимой пшеницы способствует увеличению экономической эффективности производства зерна этой культуры.

5.2. Экономическая эффективность использования данных дистанционного зондирования Земли при возделывании озимой пшеницы.

Экономическая эффективность использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса при возделывании озимой пшеницы определяется двумя составляющими: прогнозирование урожайности и диагностика минерального питания.

Прогноз урожайности сельскохозяйственной культуры, в частности озимой пшеницы, в пределах административно-территориальных субъектов способствует оптимизации уборочных мероприятий (склады, техника, трудовые ресурсы, логистика и т.д.), а также дает возможность финансового пла-

нирования. Эту составляющую можно оценить только при глубоком и всестороннем анализе большого количества показателей и взаимосвязей. Тем не менее, она велика, так как зависит от размеров территории, для которой дается прогноз (район, почвенно-климатическая зона, край).

Повышение качества диагностики минерального питания посевов (корректировка содержания азота в растениях, оценка их физиологического состояния, нивелирование неоднородности посева, уточнение рекомендаций по дозам применяемых удобрений в спорных случаях и т.д.) позволяет повысить эффективность подкормок. Оценить экономику этого фактора можно по прибавке урожая зерна и по улучшению его качества при применении ранневесенних и поздних азотных подкормок.

Таблица 25 – Экономическая эффективность производства зерна озимой пшеницы при использовании азотных подкормок

Вариант	Урожай зерна, ц/га	Рентабельность, %	Общие затраты, тыс. руб/га	Чистый доход с 1 га, тыс. руб.
Контроль	42,1	30,6	16,5	15,2
Ранневесенняя подкормка (N ₃₀)	48,0	47,5	18,8	18,7
Поздняя некорневая подкормка (N ₃₀)	45,3	46,5	17,6	20,0

По данным Ставропольского НИИСХ (отчеты отдела физиологии растений и лаборатории агропочвоведения) применение ранневесенней азотной подкормки в дозе 34,6 кг/га по д.в. (100 кг/га аммиачной селитры) позволяет повысить урожайность озимой пшеницы на 4-8 ц/га, а поздней некорневой в дозе 30 кг/га по д.в. (65 кг/га карбамида) – на 2-4 ц/га с увеличением содержания клейковины в зерне на 2-5%. Эти данные легли в основу анализа экономической эффективности использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса при проведении диагностики минерального питания посевов озимой пшеницы.

Применение азотных подкормок способствует улучшению экономических показателей производства зерна озимой пшеницы (таблица 25).

Таким образом, дистанционное зондирования Земли из космоса позволяют прогнозировать урожайность озимой пшеницы на таких административных территориях как район, почвенно-климатическая зона и край в целом, что, несомненно, даёт положительный экономический эффект от оптимизации уборочных мероприятий и финансового планирования. Использование вегетационного индекса NDVI позволяет качественно проводить диагностику минерального питания посевов озимой пшеницы и давать более эффективные рекомендации по дозам, срокам и формам азотных подкормок. Применение ранневесенних и поздних азотных подкормок позволяет повысить рентабельности производства зерна на 55,2 и 23,0%, и увеличить прибыль с 1 га на 33,5 и 25,7 % соответственно, по сравнению с обычной технологией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основные закономерности теории фотосинтетической продуктивности растений применимы к производственным посевам озимой пшеницы Ставропольского края. В среднем за годы исследований связь урожайности этой культуры с поверхностным и хлорофилловым фотосинтетическими потенциалами оценивается коэффициентами корреляции равными 0,65 и 0,76 соответственно.
2. Для озимой пшеницы характерна связь фотосинтетических потенциалов посевов с рентабельностью и чистым доходом. Улучшение фотосинтетических характеристик посевов способствует повышению экономической эффективности производства зерна озимой пшеницы.
3. Существует взаимосвязь между изменениями в онтогенезе размерами площади ассимиляционной поверхности и динамикой вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы (коэффициент корреляции в среднем за годы исследований составил 0,67). С улучшением условий выращивания R_{corr} снижается.
4. Наиболее тесная и стабильная взаимосвязь между хлорофилловыми показателями растений озимой пшеницы и вегетационным индексом их посевов наблюдается в случае с относительным содержанием зеленых пигментов в единице биомассы, коэффициент корреляции составляет величину -0,79. С улучшением условий выращивания такая взаимосвязь снижается.
5. Предложенный нами новый показатель фотосинтетической продуктивности растений, который рассчитывается на основе данных дистанционного зондирования Земли, с высокой степенью достоверности характеризует формирование урожая. В среднем за годы исследований коэффициент корреляции между зерновой продуктивностью и вегетационным фотосинтетическим потенциалом посевов озимой пшеницы был равен 0,84, а коэффициент аппроксимации для регрессионной модели взаимосвязи этих показателей составил величину 0,66.

6. Существует тесная взаимосвязь между содержанием азота в растениях озимой пшеницы и NDVI их посевов, которая оценивается коэффициентом корреляции равным $-0,84$. При использовании вегетационного индекса, учитывающего коэффициент поверхностной плотности посева, такая взаимосвязь усиливается.
7. Для Ставропольского края существует тесная взаимосвязь между урожаем зерна озимой пшеницы и вегетационным индексом NDVI, которая оценивается коэффициентом корреляции равным $0,76$ (в среднем по всем районам). Большое влияние на такую взаимосвязь оказывают почвенно-климатические условия выращивания.
8. Точность регрессионной модели зависимости урожая зерна озимой пшеницы от вегетационного индекса NDVI для Ставропольского края повышается при использовании данных дистанционного зондирования Земли рассчитанных для почвенно-климатических зон ($R_{\text{corr.}}=0,79$, $R^2=0,62$).
9. Использование максимального значения вегетационного индекса ($NDVI_{\text{max}}$) не только повышает точность прогноза урожайности озимой пшеницы для Ставропольского края ($R_{\text{corr.}}=0,82$, $R^2=0,67$), но и позволяет составлять его в более ранние сроки (в период колошения).

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Для повышения объективности и оперативности оценки физиологического состояния посевов и контроля процесса формирования урожая растениями озимой пшеницы в производственных условиях необходимо использовать данные дистанционного зондирования Земли (вегетационный индекс NDVI). Перспективным в этом отношении является вегетационный фотосинтетический потенциал, который характеризует размер и продолжительность функционирования ассимиляционного аппарата растений.
2. Для прогноза урожайности озимой пшеницы в Ставропольском крае необходимо использовать такие характеристики динамики вегетационного индекса NDVI как среднее или максимальное его значение за весенне-летний период. Максимальный NDVI является предпочтительней из-за более высокой точности прогноза и более раннего времени его составления (колошение).

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрианова Ю.Е. Хлорофилл и продуктивность растений / Ю.Е.Андрианова, И.А.Тарчевский // М.: Наука. - 2000.
2. Балашов В.В. Реакция сортов озимой пшеницы на засуху в подзоне светло-каштановых почв волгоградской области / В.В.Балашов, А.К.Агафонов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2011. – № 3. – С. 3-7.
3. Барталев С.А. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние им перспективы развития) / С.А.Барталев, Д.В.Ершов, Г.Н. Коровин, Р.В Котельников, Е.А.Лулян, В.Е Щетинский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2008. - Т. 5. - № 2. - С. 419-429.
4. Бархатова О.А. Влияние некорневых подкормок на процессы фотосинтеза озимой пшеницы / О.А.Бархатова, Ф.В.Ерошенко, И.В.Нешин // Агрехимический вестник. – 2007. – № 5. – С. 16-17.
5. Брыксин В.М. Оценка урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и модели биопродуктивности / В.М.Брыксин, А.В.Евтюшкин // Интерэкспо Гео-Сибирь. - 2005. - Т. 5. - С. 218-222.
6. Брыксин В.М. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности / В.М.Брыксин, А.В.Евтюшкин, Н.В.Рычкова // Известия Алтайского государственного университета. - 2010. - № 1-2. - С. 89-93.
7. Бурцев М.А. Построение архива спутниковых данных для анализа динамики растительности / Бурцев М.А., Мазуров А.А., Нейштад И.А., Прошин А.А.// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2006. – Т.1. - №3. – С.170-174.

8. Варламов В.А. Влияние предшественников и минерального питания на хлебопекарные свойства зерна озимой пшеницы / В.А.Варламов, Е.Н.Варламова // Нива Поволжья. – 2013. – № 27. – С. 14-20.
9. Ведешин Л.А. Космические информационные технологии для решения сельскохозяйственных задач / Л.А.Ведешин, Д.А.Шаповалов, Е.В.Белорусцева // Экологические системы и приборы. – 2011. – № 9. – С. 3-10.
10. Гергокаев Д.А. Влияние минерального питания на качество зерна озимой пшеницы в условиях степной зоны КБР / Д.А.Гергокаев, Л.Ю.Керефова, Х.С.Ташилов // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 12. – С. 67-68.
11. Грабовец А.И. Озимая пшеница / А.И.Грабовец, М.А.Фоменко. – Ростов-на-Дону. – Из-во «Юг», 2007. – 600 с.
12. Громов А.А. Формирование высокопродуктивных агроценозов озимой пшеницы в зависимости от фонов питания и норм высева. / Громов А.А., Щукин В.Б. // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2004. Т. 2. № 2-1. С. 72-74.
13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта / Б.А.Доспехов. – М.: Колос. – 1979. – 416 с.
14. Дубинин М. Вегетационные индексы: Географические информационные системы и дистанционное зондирование / М.Дубинин // Интернет журнал, 2006. <http://gis-lab.info/qa/vi.html> (25.06.2012).
15. Дуденко Н.В. Разработка научно-обоснованных рекомендаций по уходу за посевами озимых культур в различных фазах развития и условиях перезимовки / Н.В.Дуденко, Ф.В.Ерошенко // отчет о НИР. – № 166/13 от 22.07.2013 (Министерство сельского хозяйства РФ)
16. Дуденко Н.В. Хлорофилльные фотосинтетические потенциалы и некоторые другие показатели продукционных процессов у высокорослых и полукарликовых сортов озимой пшеницы / Н.В.Дуденко // диссертация

на соискание ученой степени кандидата биологических наук. – Ставрополь. – 2001.

17. Егоров В.А. Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений / В.А.Егоров, С.А. Барталев, Е.А. Лупян, И.А. Уваров // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. - № 2. - С. 98-109.
18. Ермакова Н.В. Фотосинтетический потенциал озимой твердой, тургидной и мягкой пшеницы в условиях лесостепи ЦЧР / Н.В.Ермакова, В.В.Козлобаев, О.С.Калмыкова // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2008. – №3-4. – С. 18-22.
19. Ерошенко А.А. Влияние условий выращивания на урожай и качество зерна сортов озимой пшеницы / А.А.Ерошенко, Ф.В.Ерошенко // В сборнике: Роль генетических ресурсов и селекционных достижений в обеспечении динамичного развития сельскохозяйственного производства. – Материалы Международной научно-практической конференции. – Орёл: – Изд-во ПФ Картуш, 2009. – С. 96-102.
20. Ерошенко, А.А. Особенности формирования урожая и качества зерна озимой пшеницы в различных зонах Северного Кавказа / А.А.Ерошенко, И.Г.Чередниченко, Ф.В.Ерошенко // Сборник докладов Региональной научно-практической конференции «Научное обеспечение агропромышленного комплекса Юга России» 22 мая 2013 года. I часть. – Майкоп: изд-во «Магарин О.Г.», 2013. – с. 62-67.
21. Ерошенко, А.А. Фотосинтетическая продуктивность посевов озимой пшеницы в условиях Северного Кавказа / А.А.Ерошенко, И.Г.Чередниченко, Ф.В.Ерошенко // Земледелие, №6, 2013. – С. 40-42.
22. Ерошенко Ф.В. Активность фотосинтетического аппарата различных по продуктивности сортов озимой пшеницы / Ф.В.Ерошенко, Л.Н.Петрова, Н.В.Дуденко, И.В.Нешин // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2002. – № 2. – С. 11-14.

23. Ерошенко Ф.В. Оптические свойства растений и оценка их физиологического состояния / Ф.В.Ерошенко // Бюллетень Ставропольского научно-исследовательского института сельского хозяйства. –2014. –№ 6. –С. 84-90.
24. Ерошенко Ф.В. Особенности продукционного процесса озимой пшеницы в различных почвенно-климатических зонах юга России / Ф.В.Ерошенко, А.А.Ерошенко, И.Г.Чередниченко // Бюллетень Ставропольского научно-исследовательского института сельского хозяйства. – 2013. – № 5. – С. 47-57.
25. Ерошенко Ф.В. Особенности фотосинтетической деятельности сортов озимой пшеницы.– Ставрополь. – Сервисшкола – 2006.
26. Ерошенко Ф.В. Радиационный режим посевов высокорослых и короткостебельных сортов озимой пшеницы / Ф.В.Ерошенко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2010. –№ 24. – С. 58-62.
27. Ерошенко Ф.В. Регрессионные модели оценки урожайности озимой пшеницы в Ставропольском крае с использованием NDVI / Ф.В.Ерошенко, И.Г.Чередниченко // Бюллетень Ставропольского научно-исследовательского института сельского хозяйства. – 2013. – № 5. – С. 58-64.
28. Ерошенко Ф.В. Фотосинтетическая деятельность посевов высокорослых и короткостебельных сортов озимой пшеницы в зависимости от уровня азотного питания / Ф.В.Ерошенко // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2010. – Т. 3. – № 27-1. – С. 221-224.
29. Ерошенко Ф.В. Фотосинтетическая продуктивность озимой пшеницы / Ф.В.Ерошенко, Л.Н.Петрова // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2010. № 3. – С. 36-38.
30. Ерошенко Ф.В. Фотосинтетическая продуктивность растений озимой пшеницы высокорослых и низкорослых сортов / Ф.В.Ерошенко // диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук /

ГОУВПО «Воронежский государственный университет». – Воронеж, 2011.

31. Ерошенко Ф.В. Эффективность поздних некорневых азотных подкормок озимой пшеницы / Ф.В.Ерошенко, А.А.Ерошенко, И.Г.Сторчак // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 8. – С. 32-35.
32. Ерошенко Ф.В. NDVI и оптико-биологические свойства посевов озимой пшеницы // Ф.В.Ерошенко, И.Г.Сторчак / Двенадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Институт Космических Исследований РАН, Москва 10-14 ноября 2014г. – С. 357.
33. Ерошенко Ф.В. Влияние элементов технологии возделывания озимой пшеницы на NDVI её посевов // Ф.В.Ерошенко, И.Г.Сторчак / Двенадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Институт Космических Исследований РАН, Москва 10-14 ноября 2014г. – С. 356.
34. Жердецкий И.Н. Площадь листовой поверхности на фоне внекорневых подкормок / И.Н.Жердецкий // Сахарная свекла. – 2010. – № 5. – С. 30-33.
35. Залибекова М.З. О картографии динамических свойств почв Терско-Кумской низменности с применением дистанционных методов / М.З. Залибекова, Д.Б. Асгерова, З.Д. Бийболатова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук – 2011. – Т.13. - №1(6). С.1330-1333.
36. Квасов Н.А. Роль сорта, азотных удобрений и регуляторов роста в интенсивной технологии возделывания озимой пшеницы в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края / Н.А.Квасов, Е.А.Прокудин, Ф.В.Ерошенко, Н.В.Дуденко, В.Я.Хотулев // депонированная рукопись № 199 ВС-91 05.08.1991.
37. Ковтун В.И. Селекция высокоадаптивных сортов озимой мягкой пшеницы и нетрадиционные элементы технологии их возделывания в засуш-

ливых условиях Юга России / В.И.Ковтун. – Ростов-на Дону. – ЗАО Книга. – 2002. – 320 с.

38. Кожоков М.Х. Формирование белка в озимой пшенице при различных уровнях питания // Кожоков М.Х., Жеруков Б.Х., Бесланеев С.М. – Плодородие. - №1. – 2006. – С.17.
39. Кондратьева К.Я. Применение дистанционных методов для оценки состояния сельскохозяйственных культур/ К.Я.Кондратьева, П.П.Федченко // География и природные ресурсы. 1981. №2. С. 100-110
40. Кравцова Н.Е. Влияние комплексных удобрений на минеральное питание озимой пшеницы / Н.Е.Кравцова, Д.В.Божков // Сборник научных трудов Sworld. – 2013. –Т. 51. – № 4. – С. 101-103.
41. Кравченко В.Н. Урожайность и качество зерна зернобобовых культур в зависимости от соотношения доз азота и фосфора в составе допосевного удобрения на черноземе южном Оренбургской области / В.Н.Кравченко, А.И.Тукабаева // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2006. – Т. 2. – № 10-1. – С. 98-99.
42. Кудряшов И.Н. Управление хозяйственными признаками озимой пшеницы с помощью норм высева / И.Н.Кудряшов, Л.А.Беспалова, В.И.Кулик, А.В.Неженец //Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2006. № 1. С. 183-192.
43. Кузнецов К.В. Об использовании спутниковых снимков для распознавания сельскохозяйственных культур в Краснодарском крае / К.В.Кузнецов, Д.А.Липилин // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. - 2012. - № 3 (32). - С. 88-92.
44. Кулик К.Н. Дистанционно-картографическая оценка деградационных процессов в Агрolandшафтах юга России / К.Н. Кулик, Рулев А.С., В.Г. Юферев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса – 2009. – Т.4(16). - С.12-25.
45. Кулинцев В.В. Рекомендации по научно-обоснованному уходу за посевами озимых культур в различных фазах развития и условиях переэ-

- мовки / В.В.Кулинцев, Е.И.Годунова, Ю.И.Паньков, Ф.В.Ерошенко, Н.В.Дуденко // Методические рекомендации. – Ставрополь, 2013.
46. Кулинцев В.В. Система земледелия нового поколения Ставропольского края // Кулинцев В.В., Годунова Е.И., Желнакова Л.И., Удовыдченко В.И., Петрова Л.Н., Дридигер В.К., Антонов С.А., Андрианов Д.Ю., Дзыбов Д.С., Кравцов В.В., Ерошенко Ф.В., Куприченко М.Т., Ковтун В.И., Кузыченко Ю.А., Шустикова Е.П., Хрипунов А.И., Шаповалова Н.Н., Чертов В.Г., Володин А.Б., Комаров Н.М. и др. – Ставрополь, 2013.
47. Кулинцев, В.В. Рекомендации по научному обоснованному уходу за посевами озимой пшеницы для повышения урожайности зерна и его качества // В.В.Кулинцев, Е.И.Годунова, И.В.Нешин, Ф.В.Ерошенко, Н.В.Дуденко А.Н.Орехова, А.А.Ерошенко, В.Н.Черкашин, Г.В.Черкашин, А.Н.Малыхина, Н.Н.Шаповалова, А.И.Хрипунов. – Ставрополь, 2014.
48. Кумаков В.А. Физиологические подходы к селекции растений на продуктивность и засухоустойчивость / В.А.Кумаков // Сельскохозяйственная биология. - 1986. - №6.
49. Куперман, Ф. М. Морфофизиология растений / Ф. М.Куперман // М.: Высшая школа, 1984. – 240 с.
50. Куприченков М.Т. Почвы Ставрополя. / М.Т.Куприченков // Ставрополь. – 2005. – 425 с.
51. Куркаев В.Т. Сельскохозяйственный анализ и основы биохимии / В.Т.Куркаев, С.М.Ерошкина, А.Н.Пономарев. – М., 1977. – 240 с.
52. Курочкина Л.Я. К методике составления мелкомасштабных карт опустынивания / Л.Я.Курочкина, А.Л.Кокарев // Аридные экосистемы – 2007. – Т.13. - №33-34. - С.40-53.
53. Куссуль Н.Н. Регрессионные модели оценки урожайности сельскохозяйственных культур по данным MODIS / Н.Н.Куссуль, А.Н.Кравченко, С.В.Скакун, Т.И.Адаменко, А.Ю.Шелестов, А.В.Колотий, Ю.А.Грипич //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – 2012. - Т.9. - №1. - С.95-107.

54. Лупян Е.А. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») / Е.А.Лупян, И.Ю.Савин, С.А.Барталев, В.А.Толпин, И.В.Балашов, Д.Е.Плотников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т.8. - №1. – С.190-198.
55. Лупян Е.А. Технологии спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России / Лупян Е.А., Барталев С.А., Савин И.Ю. // Аэрокосмический курьер, 2009. - №6. – С.47-49.
56. Лупян Е.А. Технология построения автоматизированных систем сбора, обработки и хранения спутниковых данных: возможности и перспективы / Лупян Е.А., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2004. – Т.1. - С.81-88.
57. Майорова В.И. Контроль состояния сельскохозяйственных полей на основе прогнозирования динамики индекса NDVI по данным космической мультиспектральной и гиперспектральной съемки / В.И.Майорова, А.М.Банников, Д.А.Гришко, И.С.Жаренов, В.В.Леонов, А.Г.Топорков, А.А.Харлан // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. - 2013. - № 7. - С. 199-228.
58. Мартемьянова А.А. Оценка фотосинтетической деятельности многолетних растений в поливидных агрофитоценозах в условиях Иркутского района /А.А. Мартемьянова, Э.Ю. Ракоца, Ш.К. Хуснидинов //Актуальные вопросы развития регионального АПК /Мат. регион. научн.-практич. конф.-Иркутск, 2007.- С. 27-29
59. Мельник А.Ф. Слагаемые успеха при выращивании озимой пшеницы / А.Ф. Мельник, Б.С. Кондрашин, И.В. Алексюткин // Зерновое хозяйство.-№1.-2007.-С. 21-22
60. Милаева Я.И. Сравнительное определение количества пигментов в листьях кукурузы и табака ускоренным методом / Я.И.Милаева,

- И.П.Примаков // Селекция и семеноводство. – Киев. – 1969. – В.12. – С. 69-72.
61. Мокронос А.Т. Фотосинтез. Физиолого-экологические аспекты. / А.Т.Мокронос, В.Ф.Гавриленко, Т.В.Жигалова. // 2-е изд., испр. и доп. -М.: Издательский центр «Академия», 2006. -488 с.
62. Морковкин Г.Г. Динамика состояния почвенного покрова и показателей плодородия почв в лесостепной зоне Алтайского края / Г.Г.Морковкин, Т.В.Байкалова, Н.Б.Максимова, В.И.Овцинов, Е.А.Литвиненко, И.В.Дёмина, В.А.Дёмин / Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 11 (121). – С. 49-54.
63. Муратова Н.Р. Опыт пятилетнего оперативного мониторинга сельскохозяйственных угодий Северного Казахстана с помощью спутниковых данных / Муратова Н.Р., Терехов А.Г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2007. – Т. – 4 №2. – С. 277-283.
64. Нейштад И.А. Методы обработки данных спутниковых наблюдения MODIS для мониторинга пахотных земель диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Институт космических исследований РАН. Москва – 2007.
65. Нешин И.В. Фотосинтетическая деятельность сельскохозяйственных культур в зависимости от условий возделывания / И.В.Нешин, В.И.Ковтун, С.С.Мясоедова, В.И.Жолобов, О.И.Нешиш. // Ставрополь. – 2008. – 316с.
66. Никитишен В.И. Формирование ассимиляционного аппарата и продуктивность фотосинтеза растений в различных условиях минерального питания / В.И.Никитишен, Л.М.Терехова, В.И.Личко // Агрехимия. – 2007. – № 8. – С. 35-43.
67. Ничипорович А.А. Фотосинтез и вопросы повышения продуктивности растений / А.А.Ничипорович // Проблемы фотосинтеза. – М.: Изд-во АН СССР. – 1959. – С. 421-433.

68. Новохатин В.В. ГИС-технологии в оценке и прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур / В.В.Новохатин, И.С.Чубарева // Вестник Тюменского государственного университета. - 2013. - № 4. - С. 168-176.
69. Петров Н.Ю. Фотосинтетическая деятельность и продуктивность сортов озимой пшеницы в зависимости от применяемых биопрепаратов / Н.Ю.Петров, Н.С.Онищенко // Вестник Алтайского государственного университета. - Изд-во Алтайский государственный университет. – 2012. – Т.96. - №10. – С.23-25.
70. Петрова Л.Н. Активность фотосинтетического аппарата различных по продуктивности сортов озимой пшеницы / Л.Н.Петрова, Ф.В.Ерошенко, И.В.Нешин, Н.В.Дуденко // Доклады Россельхозакадемии. 2002. № 2
71. Петрова Л.Н. К определению потребности озимой пшеницы в удобрениях / Петрова Л.Н., Мащенко М.Н., Шустикова Е.П. // В сборнике «Научные достижения – сельскому хозяйству» Материалы отчетной научно-методической конференции Ставропольского НИИСХ. – 1973. – С. 124-132.
72. Петрова Л.Н. Ориентация листьев, структурная организация фотосинтетического аппарата, продуктивность и качество зерна озимой пшеницы / Л.Н.Петрова, Ф.В.Ерошенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2006. № 24. С. 446-454.
73. Петрова Л.Н. Сорты озимой пшеницы и особенности их фотосинтетической деятельности / Л.Н.Петрова, Ф.В.Ерошенко, А.А.Ерошенко // В сборнике: Проблемы экологии и защиты растений в сельском хозяйстве. – Сборник научных статей по материалам 73-й научно-практической конференции. – 2009. – С. 157-164.
74. Петрова Л.Н. Структурная организация фотосинтетического аппарата и качество зерна озимой пшеницы / Л.Н.Петрова, Ф.В.Ерошенко // Поли-

- тематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2006. – № 24. – С. 436-445.
75. Петрова Л.Н. Физиолого-биохимические особенности питания и формирования урожая озимой пшеницы. Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата биол. наук. – Рига, 1971.
76. Пигорев И.Я. Фотосинтетический потенциал озимой пшеницы и его реализация в условиях черноземья России / И.Я.Пигорев // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2008. – Т.3. – №3. – С. 3-6
77. Повх В.И. Космический мониторинг сельскохозяйственных угодий Ростовской области / В.И.Повх, Г.П.Гарбузов, Л.А.Шляхова, // Исследование Земли из космоса, 2006. №3. С. 89-96.
78. Подушин Ю.В. Влияние факторов агротехники на индекс листовой поверхности и содержание хлорофилла в листьях озимой пшеницы / Ю.В.Подушин, М.Ю.Ольховский, Ю.П.Федулов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2009. - № 51. - С. 319-326.
79. Пома Н.Г. Урожайность и качество зерна новых сортов озимого тритикале при весенних подкормках азотом / Н.Г.Пома, Б.П.Лобода, А.В.Сергеев, В.В.Осипов // Агротехнический вестник. – 2009. – № 2. – С. 28-29.
80. Прокудин Е.А. Физиологические основы повышения урожая и качества зерна озимой мягкой и твердой пшеницы / Е.А.Прокудин, Н.А.Квасов, Ф.В.Ерошенко, В.Д.Костин, Н.В.Дуденко, Т.В.Чапцева, В.Я.Хотулев // депонированная рукопись № 200 ВС-91 05.08.1991.
81. Ракоца Э.Ю. Специфика формирования ассимиляционного аппарата растений в поливидных агрофитоценозах / Э.Ю.Ракоца, Т.Г.Кудрявцева, А.А.Мартемьянова // Сельскохозяйственные и прикладные науки в развитии сельского и лесного хозяйства: актуальные вопросы, практика и

обмен опытом: мат-лы междунар. науч.-практ. конф. -Иркутск, 2006. -С. 125-128.

82. Рахимов М.М. Формирование листовой поверхности посевов озимой пшеницы местных и интродуцированных сортов в разных природно-экологических регионах / М.М.Рахимов, М.Б.Ниязмухамедова // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение биологических и медицинских наук. 2011. № 2. С. 51-61.
83. Росс Ю.К. Основы количественной теории яркости растительного покрова / Ю.К.Росс, А.Э.Кууск, Т.А.Нильсон // в сборнике «Фотосинтез и продукционный процесс» под редакцией А.А. Ничипоровича. – Москва. – Наука, 1988. – С. 187-198.
84. Росс Ю.К. Радиационный режим и архитектоника растительного покрова / Ю.К.Росс. - Ленинград: Гидрометеиздат. – 1975. - 344 с.
85. Савин И.Ю. Оперативный спутниковый мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур в России / Савин И.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А. // Геоматика. 2011. - №2. – С.69-76.
86. Савин И.Ю. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы / И.Ю.Савин, С.А.Барталев, Е.А.Лупян, В.А.Толпин, С.А.Хвостиков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2010. - Т.7. - № 3. - С. 275-285.
87. Сельское хозяйство в Ставропольском крае: Статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы статистики по Ставропольскому краю, 2010. – С.123.
88. Сельское хозяйство в Ставропольском крае: Статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы статистики по Ставропольскому краю, 2011. – С.123.
89. Сельское хозяйство в Ставропольском крае: Статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы статистики по Ставропольскому краю, 2012. – С.175.

90. Сельское хозяйство в Ставропольском крае: Статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы статистики по Ставропольскому краю, 2013. – С.176.
91. Сельское хозяйство в Ставропольском крае: Статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы статистики по Ставропольскому краю, 2014. – С.176.
92. Сельское хозяйство Ставрополя за 2001-2009гг.: Статистический сборник / Территориальный орган Федеральной службы статистики по Ставропольскому краю, 2010. – С.261.
93. Сторчак И.Г. Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае / И.Г.Сторчак, Ф.В.Ерошенко // Земледелие. – 2014. – № 7. – С. 12-15.
94. Сторчак И.Г. Оценка урожайности озимой пшеницы в Ставропольском крае с использованием NDVI // И.Г.Сторчак, Ф.В.Ерошенко / Двенадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Институт Космических Исследований РАН, Москва 10-14 ноября 2014г. – С. 387.
95. Сторчак И.Г. Использование NDVI в регрессионных моделях оценки урожайности озимой пшеницы в Ставропольском крае // Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В. – Materialy X mezinarodni vedecko – praktika konference “Veda a vznik – 2013/2014”/ – Dil 30. Biologicke vedy. Zverolekarstvi.:Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – 96 stran. p. 3-7.
96. Тарчевский И.А. 2000. Элиситор-индуцируемые сигнальные системы и их взаимодействие / И.А.Тарчевский // Физиология растений. – 2000. - Т. 47. - С. 321-331.
97. Терехин Э.А. Анализ сезонной динамики вегетационного индекса NDVI и отражательных свойств посевов кукурузы на территории Белгородской области / Э.А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2014. - Т. 11. - № 4. - С. 244–253

98. Терехин Э.А. Использование данных дистанционного зондирования земли и нейротехнологий для совершенствования мониторинга лесных массивов / Э.А. Терехин, Ю.В. Пилипенко, В.И. Пичура, О.А. Чепелев, Д.С. Бреус // *Агроекологичний журнал*. - 2012. - № 4. - С. 41-47.
99. Толпин В.А. Спутниковый сервис «ВЕГА» / В.А.Толпин, И.В.Балашов, Е.А.Лупян, И.Ю.Савин // *Земля из космоса. Наиболее эффективные решения*. №9. – 2011. – С. 32-37.
100. Усанова З.И. Влияние фона минерального питания и микроэлементов на продуктивность озимой пшеницы / З.И.Усанова, В.В.Сайко // В книге: *Инновационные процессы - основа модели стратегического развития АПК в XXI веке*. Тверская государственная сельскохозяйственная академия. – 2011. – С. 92-95.
101. Федулов Ю.П. Содержание и соотношение хлорофиллов в листьях озимой пшеницы в зависимости от агротехнических приемов ее выращивания / Федулов Ю.П., Подушин Ю.В. // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. - 2009. - № 51.- С. 240-253.
102. Хамидуллина Л.А. Влияние введения нитратов в апопласт побега на фотосинтез и транспорт ассимилятов у симпластных и апопластных растений / Л.А.Хамидуллина, Ф.А.Абдрахимов, С.Н.Баташева, Д.А.Фролов, В.И.Чиков // *Физиология растений*. – 2011. – Т. 58. – № 3. – С. 420-426.
103. Хотулев В.Я. Связь содержания хлорофилла с фотосинтетической продуктивностью короткостебельных и длинностебельных сортов озимой пшеницы : автореф. дис... канд. биол. наук / В.Я.Хотулев // Казань. – 1985. – 24 с.
104. Черепанов А.С. Вегетационные индексы / А.С.Черепанов // *Журнал Геоматика*. – 2011. - №2. С.98-102.
105. Чиков В.И. Фотосинтез и транспорт ассимилятов. / В.И.Чиков // М.: Наука. - 1987.

106. Чиков В.И. Эволюция представлений о связи фотосинтеза с продуктивностью растений / В.И.Чиков // Физиология растений. - 2008. - № 1. - Т. 55.
107. Шальнев В.А. Ландшафты Ставропольского края / В.А. Шальнев // Ставрополь. – 1995. – 52 с.
108. Шевырногов А.П. Изучение сезонной динамики сельскохозяйственных посевов на территории хакасии по снимкам TERRA MODIS / А.П.Шевырногов, Т.М.Зоркина, В.М.Жукова, Е.Ю.Жукова, М.В.Жидкая // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. - 2007. № 5. - С. 29-35.
109. Шпаар Д. Возделывание зерновых культур / Д.Шпаар, А.Постников, Г.Крацш, Н.Маковски // М.: Аграрная наука. ИК Родник, 1998. – 334 с.
110. Шукуров Р. Показатели фотосинтетической деятельности и продуктивность пшеницы при внесении расчетных норм минеральных удобрений. / Шукуров Р. // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение биологических и медицинских наук. - 2007. №2. - С.48-54.
111. Шуркина А.И. Исследование современного растительного покрова республики Хакасия на основе интеграции спутниковых и наземных данных / А.И.Шуркина, А.П.Шевырногов, Т.М.Зоркина // Вестник КрасГАУ, - 2007. - №5, - С. 65-71.
112. Яловой А.В. Теоретические и практические основы подготовки почвы и проведения осеннего сева: рекомендации для сельхозпроизводителей Ставропольского края / А.В.Яловой, Н.М.Казьмин, Е.И.Годунова, Л.И.Желнакова, И.В.Нешин, Ю.А.Кузыченко, Л.Н.Титенок, Ф.В.Ерошенко, А.И.Хрипунов, Ч В.Н.еркашин, Н.Н.Шаповалова // Ставрополь. – АГРУС. - 2006. – С.40.
113. Barigah T. Photosynthesis, leaf area and productivity of 5 poplar clones during their establishment year / T.Barigah, B.Saugier, M.Mousseau, J.Guittet, R.Ceulemans // Ann. For. Sci. – V. 51. – №6. – 1994. – p. 613 – 625.

114. Becker-Reshef I. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data / I.Becker-Reshef, E.Vermote, M.Lindeman, C.Justice // Remote Sensing of Environment. – 2010. – 114(6). – P. 1312-1323.
115. Benedict H.M. Nondestructive method for estimating chlorophyll content of leaves / H.M. Benedict, Swidler // Science. – 1961. – Vol.133. – P. – 3469-3472.
116. Chand R. Regional Variations in Agricultural Productivity a District Level Study / R.Chand, S.Garg, L. Pandey. – New Delhi. – ICAR. – 2009. – 126 p.
117. Cheng1 X. Somaclonal variation in winter wheat: frequency, occurrence and inheritance / X.Cheng1, M.Gao1, Z.Liang1, G.Liu1, T.Hu1 // Euphytica. – 1992. – V.64, №1-2. – p. 1-10.
118. Chipanshi A.C. Large-scale simulation of wheat yields in a semi-arid environment using a crop-growth model / A.C.Chipanshi, E.A.Ripley, R.G.Lawford // Agricultural Systems. – 1999. – 59. – P. 57-66.
119. Cicek H. Using vegetation indices from satellite remote sensing to assess corn and soybean response to controlled tile drainage / H.Cicek, M.Sunohara, G.Wilkes, H.McNairn, D.R.Lapen, F.Pick, E.Topp // Agricultural Water Management. – 2010. – T. 98. – № 2. – C. 261-270.
120. Doiron M. Broad-scale satellite normalized difference vegetation index data predict plant biomass and peak date of nitrogen concentration in arctic tundra vegetation / M.Doiron, P.Legagneux, G.Gauthier, E.Lévesque // Applied Vegetation Science. – 2013. – T. 16. – № 2. – C. 343-351.
121. Doraiswamy P.C. Spring wheat yield assessment using NOAA AVHRR data / P.C.Doraiswamy, P.W.Cook// Canadian Journal of Remote Sensing. – 1995. – 21. –P. 43-51.
122. Yeroshenko F.V. NDVI and photosynthetic characteristics of winter wheat crops // F.V.Yeroshenko, I.G.Storchak / Materiály X mezinárodní vědecko - praktická conference «Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2014». -

Díl 26. Biologické vědy. – Praha. Publishing House «Education and Science». – 2014. – P. 31-37.















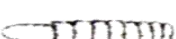




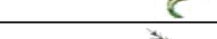
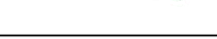



123. Ferwerda J.G. Nitrogen detection with hyperspectral normalized ratio indices across multiple plant species / J.G.Ferwerda, A.K.Skidmore, O.Mutanga // International Journal of Remote Sensing. – 2005. – T. 26. – № 18. – C. 4083-4095.
124. Galvão L.S. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir hyperion data / L.S.Galvão, A.R.Formaggio, F.M.Breunig, D.A.Roberts, I.Numata // Remote Sensing of Environment. – 2009. – T. 113. – № 4. – C. 846-856.
125. Gutiérrez-Rodríguez M. Association between canopy reflectance indices and yield and physiological traits in bread wheat under drought and well-irrigated conditions / M.Gutiérrez-Rodríguez, J.A.Escalante-Estrada, M.T.Rodríguez-González, M.P.Reynolds // Australian Journal of Agricultural Research. – 2004. – T. 55. – № 11. – C. 1139-1147.
126. Joshida S. Physiological aspects of grain yield / S.Joshida // Ann. Rev. of Plant Physiology. – 1972. – v. 23. – P. 437-464.
127. Kodani E. Seasonal patterns of canopy structure, biochemistry and spectral reflectance in a broad-leaved deciduous *Fagus crenata* canopy // E.Kodani, Y.Awaya, K.Tanaka, N.Matsumura / Forest Ecology and Management. – 2002. – T.167. – № 1-3. – C. 233-249.)
128. Leakey A. Photosynthesis, Productivity, and Yield of Maize Are Not Affected by Open-Air Elevation of CO₂ Concentration in the Absence of Drought / A.Leakey, M.UribeLarrea, E.Ainsworth, S.Naidu, A.Rogers, D.Ort, S.Long // Plant Physiol. – 2006. – №140(2). – p. 779–790.
129. Loomis R.S. Agricultural productivity / R.S.Loomis, W.A.Wiliams, A.E.Mail // Ann. Rev. of Plant Physiol. – 1971. – v. 22. – P. 431-453.
130. Mandal U.K. Estimating yield of sorghum using root zone water balance model and spectral characteristics of crop in a dryland alfisol / U.K.Mandal,

U.S.Victor, N.N.Srivastava, K.L.Sharma, V.Ramesh, M.Vanaja, G.R.Korwar, Y.S.Ramakrishna // *Agricultural Water Management*. – 2007. – T. 87. – № 3. – C. 315-327.

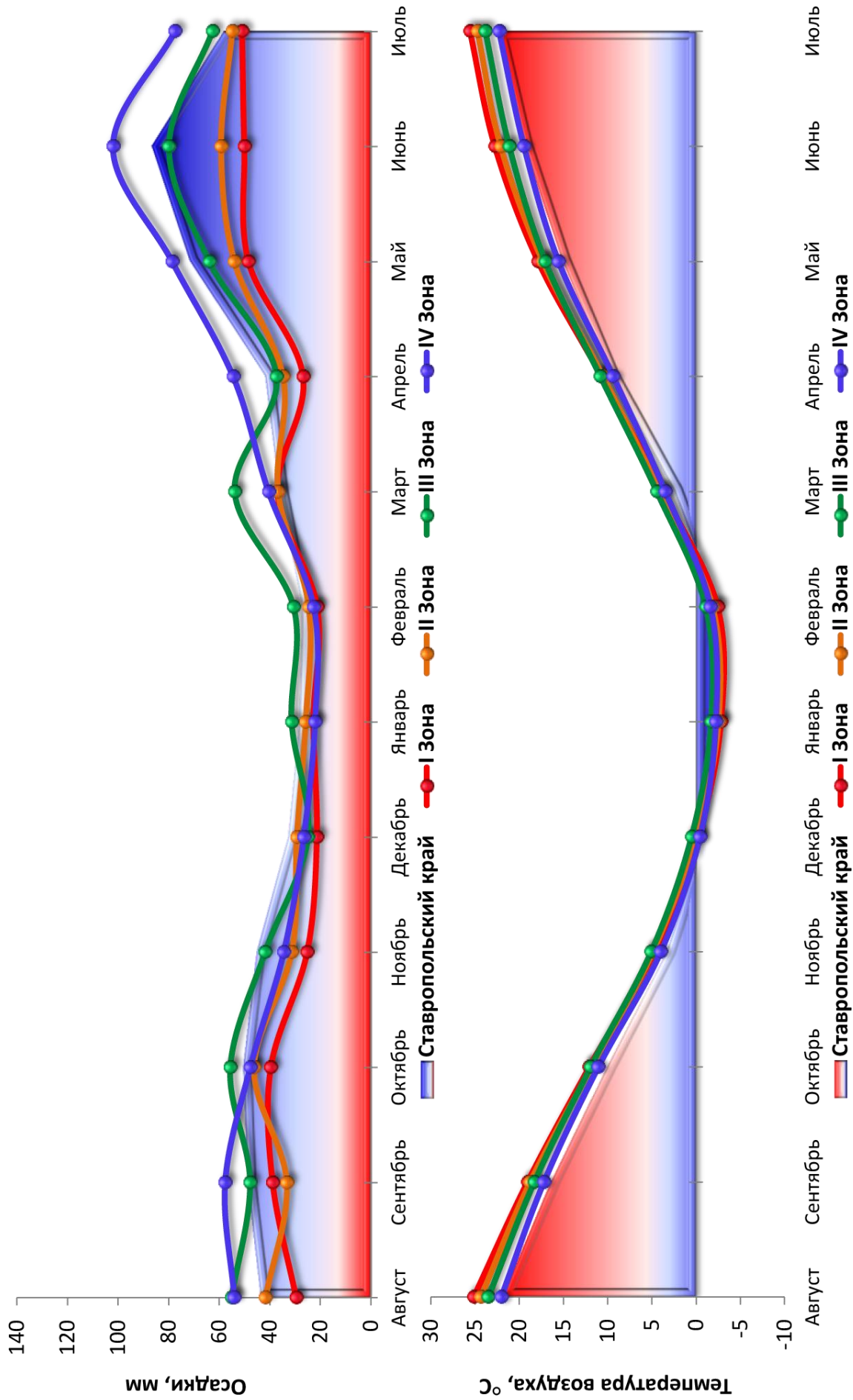
131. Manjunath K.R. Large area operational wheat yield model development and validation based on spectral and meteorological data / K.R.Manjunath, M.B.Potdar, N.L.Purohit // *International Journal of Remote Sensing*. – 2002. – 23. – P. 3023-3038.
132. Maselli F. Analysis of GAC NDVI data for cropland identification and yield forecasting in Mediterranean African countries / Maselli F., Rembold F. // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001. – 67. – P. 593-602.
133. Pinter P.J. Multidate spectral reflectances as predictors of yield in water stressed wheat and barley / P.J.Pinter, R.D.Jackson, S.B.Idso, R.J.Reginato// *International Journal of Remote Sensing*/ – 1981. – 2. – P. 43-48.
134. Prasad A.K. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters / A.K.Prasad, L.Chai, R.P.Singh, M.Kafatos// *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2006. – 8. – P. 26-33.
135. Quinn G. *Experimental Design and Data Analysis for Biologists* / G.Quinn, M.Keough. – 2002. – 527 p.
136. Rama Rao N. Estimation of leaf total chlorophyll and nitrogen concentrations using hyperspectral satellite imagery / N.Rama Rao, P.K.Garg, S.K.Ghosh, V.K.Dadhwal // *The Journal of Agricultural Science*. – 2008. – T. 146. – № 1. – C. 65-75.
137. Rawson H.M. The contribution of stem reserves to grain development in a range of cultivars of different height / H.M.Rawson, L.T.Evans // *Australi. J. of Agr. Research*. – 1971. – v. 22. – №6. – P. 851-863.
138. Raz M. Characterization of wheat growth conditions by visible and nir reflectance / M.Raz, A.Karnieli, D.J.Bonfil // *Progress in Biomedical Optics and Imaging*. – 2002. – T. 4879. – C. 400-409.

139. Reyniers M. Measuring wheat nitrogen status from space and ground-based platform / M.Reyniers, E.Vrindts // *International Journal of Remote Sensing*. – 2006. – T. 27. – № 3. – C. 549-567.
140. Roleda M. Photosynthetic response of *Nodularia spumigena* to UV and photosynthetic active radiation depends on nutrient (N and P) availability / M.Roleda, M.Mohlin, B.Pattanaik, A.Wulff // *FEMS Microbiol Ecol*. – 2008. – №66. – p. 230–242.
141. Rosati A. Estimating Photosynthetic Radiation Use Efficiency Using Incident Light and Photosynthesis of Individual Leave / A.Rosati, T.Dejong. // *Annals of Botany*. – 2003. – №91. – p. 869-877.
142. Sabo M. Photosynthetic productivity of two winter wheat varieties / M.Sabo, T.Teclic, I.Vidovic // *Rostlinná Výroba*, 2002. – №48 (2). – P. 80-86.
143. Saleem M.F. Nitrogen nutrition on leaf chlorophyll, canopy reflectance, grain protein and grain yield of wheat varieties with contrasting grain protein concentration / M.F.Saleem, B.L.Ma, H.Voldeng, T.-C.Wang // *Journal of Plant Nutrition*. – 2010. – T. 33. – № 11. – C. 1681-1695.
144. Schlerf M. Retrieval of chlorophyll and nitrogen in Norway spruce using imaging spectroscopy / M.Schlerf, C.Atzberger, J.Hill, H.Buddenbaum, W.Werner, G.Schüler // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2010. – T. 12. – № 1. – C. 17-26.
145. Wall L. Larocque D., Leger P.M. The early explanatory power of NDVI in crop yield modeling // *International Journal of Remote Sensing*, 2007. – 29. – P. 2211-2225.
146. Zhao D. Selection of optimum reflectance ratios for estimating leaf nitrogen and chlorophyll concentrations of field-grown cotton / D.Zhao, K.R.Reddy, V.G.Kakani, S.Koti, J.J.Read // *Agronomy Journal*. – 2005. – T. 97. – № 1. – C. 89-98.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Фазы Развития растений	Входы		Кущение осеннее, весеннее		Начало вы- хода в трубку	Выход в трубку, стеблевание			Колошение	Цветение	Рост зернов- ки	Налив зерна	Полная сле- лость
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Этапы органогенеза													
													
Средняя продолжи- тельность этапов	160 (осень, зима)				12	4	10	6	5	12	23	8	
Элементы продуктив- ности	Густота посе- ва (шт./м ²)	Козф. куще- ния	Кол-во чле- нков коло- сового стержня	Кол-во ко- лосков в ко- лосе	Кол-во цвет- ков в колосе	Кол-во фер- тильных цветков в ко- лосе	Длина колоса (см)	Количество зёрен в колосе	Масса 1000 зёрен (г) кол- во продуктивных стеблей (шт./м ²)				
	460	3,5	12	18	165	2-4	9-10	30-36	38-40 / 540				
Благоприятные годы	370	1,5	7	12	115	1-2	6-8	24-30	34-38/400				

Приложение 1 - Фазы развития и этапы органогенеза озимой пшеницы(Петрова Л.Н. и др., 2004)



Приложение 2 – Среднемноголетние изменения количества осадков и температуры воздуха в течение сельскохозяйственного года по почвенно-климатическим зонам Ставропольского края

**Результаты математической обработки урожайных данных
(2012-2014гг) (программное обеспечение – AgStat)**

2012г.	Урожай зерна т/га						
Поле 1	2,674129327	2,805257055	2,652345434	2,055468184			
Поле 2	2,83478386	2,784507928	2,782583369	3,363124843			
Поле 3	2,778319531	2,893786123	2,905204609	3,076957736			
Поле 4	3,661302147	3,744270653	3,777102249	3,225924951			
Поле 5	3,565172603	3,456273932	3,47568926	3,763784206			
Поле 6	2,444812075	2,38582865	2,533832105	2,13648717			
Поле 7	3,014088269	2,957017477	3,100752872	2,433141382			
Поле 8	3,622546358	3,510389959	3,526690448	3,389973235			
Поле 9	2,547236462	2,587987526	2,534721085	2,179414927			
Поле 10	3,034548076	3,06283062	2,943398734	3,26082257			
Результаты анализа							
Вариант	Кол-во	Среднее	Дисперсия	Ср.кв.откл.	Ошибка	Точность%	
1	4	2,546799898	0,111853227	0,334444642	0,167222321	6,56597805	
2	4	2,941250086	0,079685524	0,282286257	0,141143128	4,798746109	
3	4	2,913567066	0,015149864	0,123084784	0,061542392	2,11226964	
4	4	3,602149963	0,065283597	0,255506545	0,127753273	3,546583891	
5	4	3,565229893	0,019770907	0,140609056	0,070304528	1,971949339	
6	4	2,375240088	0,029035572	0,17039828	0,08519914	3,586969614	
7	4	2,876250029	0,090756476	0,301258147	0,150629073	5,23699522	
8	4	3,51240015	0,009109609	0,095444269	0,047722135	1,358675957	
9	4	2,462339878	0,036093425	0,189982697	0,094991349	3,857767582	
10	4	3,075399876	0,017877575	0,133707047	0,066853523	2,173815727	
По опыту	40	2,987062693	0,227243468	0,476700604	0,075372986	2,523314476	
Источ.вариаци	Сумма кв.	ст.свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %	
Общее	8,862512589	39				100	
Повторений	0,129673257	3				1,463165879	
Вариантов	7,438658714	9	0,826517642	17,24332619	2,200000048	83,93397522	
Случайное	1,294180512	27	0,04793261			14,60286236	
	Ош.ср.=	0,109467588	Точ.опыта%=	3,664723396	Ош. разности=	0,154349297	
	Кр.Стьюдента=	2,099999905	НСР=	0,324133515			
В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!							

2013г.	Урожай зерна т/га						
Поле 1	3,332544106	3,332610239	3,402626038	3,572219617			
Поле 2	2,548377714	2,583366728	2,486036314	2,422219244			
Поле 3	6,588866845	6,725082101	6,469115387	6,016935667			
Поле 4	3,215679372	3,162383859	3,184026279	3,35791049			
Поле 5	6,729228148	6,580548478	6,841945083	7,248278291			
Поле 6	4,837881036	4,768036861	4,802600954	5,231481149			
Поле 7	2,803780357	2,865393769	2,789992282	2,900833591			
Поле 8	5,276370631	5,144961124	5,335588717	5,443079528			
Результаты анализа							
Вариант	Кол-во	Среднее	Дисперсия	Ср.кв.откл.	Ошибка	Точность%	
1	4	3,409999847	0,012786062	0,113075472	0,056537736	1,657998204	
2	4	2,50999999	0,005045076	0,071028702	0,035514351	1,41491437	
3	4	6,449999809	0,094287999	0,30706352	0,15353176	2,380337477	
4	4	3,230000019	0,007750562	0,088037275	0,044018637	1,362806082	
5	4	6,849999905	0,081960149	0,286286831	0,143143415	2,089684963	
6	4	4,909999847	0,046746444	0,216209263	0,108104631	2,201723814	
7	4	2,840000153	0,002719403	0,052147895	0,026073948	0,918096721	
8	4	5,300000191	0,015444547	0,124276094	0,062138047	1,172415972	
По опыту	32	4,4375	2,557239056	1,599136949	0,282690138	6,370481968	
Источ.вариаци	Сумма кв.	ст.свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %	
Общее	79,27442169	31				100	
Повторений	0,082190871	3				0,103678927	
Вариантов	78,47419739	7	11,2105999	327,8699036	2,5	98,99056244	
Случайное	0,718036592	21	0,034192219			0,905760705	
	Ош.ср.=	0,092455685	Точ.опыта%=	2,083508492	Ош. разности=	0,130362526	
	Кр.Стьюдента=	2,099999905	НСР=	0,273761272			
В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!							

2014г.	Урожай зерна т/га						
Поле 1	4,96802804	5,108321225	5,096814923	4,346835812			
Поле 2	5,217526698	5,195046399	5,136606842	4,930820061			
Поле 3	6,634923817	6,810709842	6,459146569	7,135219771			
Поле 4	6,863386817	6,90582452	6,950203815	6,360584847			
Поле 5	6,000909103	5,875253964	5,948040147	5,775796786			
Поле 6	5,564038145	5,758020504	5,43738895	5,520552401			
Поле 7	3,959231585	3,860634381	4,036527871	3,823606162			
Поле 8	3,592888052	3,521737844	3,662199553	3,623174551			
Поле 9	6,337312585	6,339390308	6,311877016	5,411420092			
Поле 10	4,936885009	4,923858989	4,817180742	5,362075259			
Результаты анализа							
Вариант	Кол-во	Среднее	Дисперсия	Ср.кв.откл.	Ошибка	Точность%	
1	4	4,880000114	0,130384192	0,361087501	0,180543751	3,699666977	
2	4	5,119999886	0,01706944	0,130650073	0,065325037	1,275879622	
3	4	6,760000229	0,083172694	0,288396776	0,144198388	2,133112192	
4	4	6,769999981	0,075754568	0,275235474	0,137617737	2,032758236	
5	4	5,900000095	0,009509768	0,097518042	0,048759021	0,826424062	
6	4	5,570000172	0,018472653	0,135914132	0,067957066	1,220054984	
7	4	3,920000076	0,009311282	0,096494988	0,048247494	1,23080337	
8	4	3,599999905	0,00352713	0,059389651	0,029694825	0,824856281	
9	4	6,099999905	0,210886523	0,459223837	0,229611918	3,764129877	
10	4	5,010000229	0,057967473	0,24076435	0,120382175	2,402837753	
По опыту	40	5,362999916	1,115392923	1,056121588	0,166987479	3,113695383	
Источ.вариации							
Сумма кв.	ст.свободы	Дисперсия	Ффакт	Фтаб095.	Влияние %		
Общее	43,50019073	39				100	
Повторений	0,249187484	3				0,57284224	
Вариантов	41,65204239	9	4,628004551	78,14823914	2,200000048	95,75139618	
Случайное	1,598962903	27	0,059220847			3,675760508	
	Ош.ср.=	0,121676669	Точ.опыта%=	2,268817186	Ош. разности=	0,171564102	
	Кр.Стьюдента=	2,099999905	НСР=	0,360284597			
В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!							