

Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации  
Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей  
среды (Росгидромет)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «СИБИРСКИЙ  
РЕГИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ» (ФГБУ «СибНИГМИ»)

УДК 551.509.6/9 551.586

Рег. № НИОКТР АААА-А17-117022250103-2

Рег. № ИКРБС АААА-Б19-219122390213-9



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ФГБУ «СибНИГМИ»  
канд. техн. наук

А.Б. Колкер

«17» декабря 2019 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка подготовленной к оперативным испытаниям автоматизированной технологии оценки условий вегетации и динамико-статистических прогнозов урожайности зерновых и зернобобовых культур по Томской области, кукурузы по Новосибирской области. Подготовленный к оперативным испытаниям метод прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области

по теме

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОГНОЗОВ И ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА УСЛОВИЙ ВЕГЕТАЦИИ  
ОСНОВНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ ДАННЫХ  
НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

(заключительный)

Шифр темы 1.1.7.1 р.1

Руководитель НИР, ведущий  
научный сотрудник, к.с.-х.н.

Т.В. Старостина

Новосибирск 2019

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

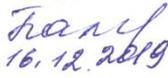
Отв. исполнитель темы, ведущий  
научный сотрудник, к.с.-х.н.  Т.В. Старостина (введение,  
раздел 4,5, заключение)  
16.12.2019

Исполнители темы

Старший научный сотрудник  В.В. Набока (раздел 1-3)  
16.12.2019

Старший научный сотрудник,  
к.ф.-м.н.  С.М. Кононенко (раздел 6)  
16.12.2019

Младший научный сотрудник  О.И. Пищимко (раздел 5)  
16.12.2019

Ведущий инженер  Т.М. Пахомова  
16.12.2019 (автоматизация методов)

Нормоконтроль  Т.П. Панькова  
17.12.2019

## РЕФЕРАТ

Отчет 68 с., 15 рис., 14 табл., 27 источн.

МЕТОД, ПРОГНОЗ, УРОЖАЙНОСТЬ, ТЕХНОЛОГИИ, КУКУРУЗА, ЗЕРНОВЫЕ И ЗЕРНОБОБОВЫЕ КУЛЬТУРЫ, ЯРОВАЯ ПШЕНИЦА, ТОМСКАЯ, НОВОСИБИРСКАЯ, КЕМЕРОВСКАЯ ОБЛАСТИ

Объектом исследований являются зерновые и зернобобовые культуры по Томской области, кукуруза по Новосибирской области и яровая пшеница по административным районам Кемеровской области.

Цель работы – изучение закономерностей формирования урожая сельскохозяйственных культур и в конечном итоге разработка методов прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур, яровой пшеницы и кукурузы. Метод исследования – динамико-статистический и физико-статистический. Разработка методов по областям выполнялась с ориентацией на принятые в Росгидромете оперативные сроки составления прогнозов. Модели прогноза урожайности трав разработаны по базам наземных и спутниковых (ИКИ РАН) данных. Средняя оправдываемость прогнозов более 85 %. Для выполнения расчетов разработана технологическая линия, включающая пакет программ для персонального компьютера и материалы информационного обеспечения.

Разработанные методы прогнозов урожайности переданы для проведения производственных испытаний в оперативные подразделения ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» и включены в План испытания и внедрения новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2020 год.

Новые модели и технологии с применением персональных компьютеров обеспечивают повышение точности, устойчивости и оперативности получения результатов прогноза; способствуют улучшению качества обслуживания агрометеорологической информацией и повышению эффективности агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Научные основы методов.....	6
2 Разработка методов и технологии оценки условий вегетации и прогноза урожайности зеленой массы кукурузы по Новосибирской области.....	11
2.1 Результаты адаптации базовой модели.....	11
2.2 Апробация методов.....	19
2.3 Технология выполнения расчетов.....	21
3 Разработка методов и технологии оценки условий вегетации и прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по Томской области.....	23
3.1 Результаты адаптации базовой модели.....	23
3.2 Апробация методов.....	29
3.3 Технология выполнения расчетов.....	34
4 Природные условия Кемеровской области.....	36
5 Методы прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области с использованием наземной информации..	42
5.1 Результаты авторских испытаний.....	47
6 Методы прогнозирования урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области с использованием наземной и спутниковой информации.....	53
6.1 Описание данных.....	55
6.2 Построение и оценка моделей.....	57
Заключение.....	60
Список использованных источников.....	65

## ВВЕДЕНИЕ

Данная работа заявлена оперативными подразделениями региона в режиме острой необходимости обновления существующих в настоящее время методов прогнозов. Она продолжает ряд ранее выполненных в ФГБУ «СибНИГМИ» исследований по применению динамического моделирования продукционного процесса основных сельскохозяйственных культур для оперативного агрометеорологического обеспечения их производства на территории отдельных субъектов Сибирского федерального округа.

Рассмотрены результаты первой попытки создания на основе динамико-статистического подхода современной технологии оценки условий формирования урожая и прогноза средней урожайности зерновых и зернобобовых культур по территории Томской области и зелёной массы кукурузы по Новосибирской области.

Работа включает также создание технологической линии информационного обеспечения расчетов оценок и прогнозов для заданных культур на персональном компьютере в режиме реального времени с использованием данных агрометеорологических наблюдений, поступающих по каналам связи в системе "ГИС МЕТЕО" и электронной версии агрометеорологических таблиц ТСХ-1.

В работе разработаны модели прогнозов урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области с использованием наземной и спутниковой информации. Модели включают наряду со стандартными агрометеорологическими параметрами новые спутниковые данные дистанционного зондирования. Разработка методов выполнялась с ориентацией на принятые в Росгидромете оперативные сроки составления прогнозов урожайности зерновых и зернобобовых культур, яровой пшеницы, кукурузы.

## 1 Научные основы методов

Ориентируясь на опыт предшествующих работ [1,2], в качестве базового средства расчетов применен апробированный (в том числе и для расчета динамики листостебельной массы кукурузы в условиях Алтайского края) вариант динамико-статистической модели продукционного процесса зерновых культур «Погода–Урожай» с суточным разрешением [3-5]. Как отмечалось в наших работах аналогичной направленности по другим сельскохозяйственным культурам, выбор модели высокой детализации продиктован условиями климата рассматриваемой территории с коротким вегетационным периодом и большой вероятностью значительных амплитуд колебаний величин метеорологических параметров за короткие временные отрезки. Влияние таких условий на рост и развитие растений сложно учесть при меньшей детализации продукционного процесса по времени.

В определенной степени этим компенсируется и заметное снижение в последние годы освещённости территории агрометеорологической информацией.

Коротко об обсуждаемой ранее базовой модели [1-3]. Она представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение во времени состояния внешней среды и, связанные с ним, изменения состояния посевов, начиная от даты всходов. Основными в этой системе являются уравнения, описывающие процессы фотосинтеза и распределения ассимилянтов между различными органами растения. Главные каналы влияния условий среды на продуктивность культуры проходят через центральную формулу модели - формулу фотосинтеза. Кроме этого, модель включает концепцию роста, развития, дыхания, пищевого статуса, адаптационных процессов и систему уравнений, описывающих изменение метеорологических условий внешней среды, а также большой объем априорной информации необходимой для ее построения.

Расчет динамики важнейших моделируемых характеристик посева сводится к интегрированию данной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. При этом аргументом всех биологических функций модели является биологическое время - сумма эффективных температур, рассчитываемая по биологическому минимуму моделируемой культуры.

Для задания начальных условий на дату массовых всходов необходимо по каждой станции, включенной в расчет располагать следующей агрометеорологической информацией:

- фенологической - даты появления массовых всходов и технической спелости для определения времени начала и окончания расчетов;
- биометрической - густота стояния растений (по этой величине, располагая информацией о соотношении величин биомасс отдельных органов стандартного растения на дату массовых всходов, рассчитываются начальные биомассы отдельных органов растений в  $(\text{мг}/\text{см}^2)$ , что численно совпадает с размерностью  $(\text{ц}/\text{га})$ );
- инструментального определения запасов влаги в отдельных слоях почвы на дату близкую к всходам;
- данными агрогидрологических свойств наиболее распространённых типов почвы по 10-см слоям, выполненных по полной программе.

Таким образом, в исходном состоянии модельный посев культуры по каждой станции представлен, как посев, обладающий среднестатистическими значениями фенологических, биометрических и агрогидрологических параметров на дату всходов. Осредненный результат модельного расчета продуктивности культуры по всем станциям, включенным в расчет, при реально заданных начальных значениях почвенного увлажнения и метеорологических параметров вегетационного периода, отражает среднюю по территории величину продуктивности.

В отсутствии возможности специального полевого эксперимента, необходимая корректировка параметров модели выполнялась на основе

литературных источников и методом итерационного подбора величин, сообразно их физическому смыслу, на материалах многолетних агрометеорологических наблюдений и статистического ряда урожайности.

Уточнению методом итерационного подбора подлежали в первую очередь параметры, наиболее сильно влияющие на расчет текущих значений биомассы отдельных органов растений и влажности корнеобитаемого слоя почвы: угол наклона световой кривой фотосинтеза ( $\alpha$ ), константа ( $a$ ) в формуле расчета устьичного сопротивления потоку  $\text{CO}_2$ , химическое сопротивление ( $r_c$ ), параметр ( $K_0$ ) в формуле расчета гидравлической проводимости почвы, константа для вычисления транспирации ( $m$ ). Для этого решалась задача максимального пошагового приближения рассчитанных при помощи модели и фактических величин урожайности. Оптимальные величины параметров определялись на основе оценок согласования результатов модельных расчетов с данными по урожайности территориальных органов Федеральной службы государственной статистики.

Такие параметры модели, как, средние даты наступления фаз развития растений и суммы эффективных температур для их прохождения, густота посева уточняются методом статистической обработки данных многолетних агрометеорологических наблюдений гидрометеорологических станций, расположенных в ареале распространения производственных посевов культуры. По справочным материалам уточнялись координаты станций и агрогидрологические свойства отдельных слоёв преобладающих типов почв в расположении выбранных опорных станций.

Для модельного расчета комплексной количественной оценки агрометеорологических условий формирования урожая за определенный отрезок периода вегетации, относительно эталонных условий за аналогичный период, применен известный подход, предложенный в [3-5]. По опыту наших предыдущих работ в качестве эталона приняты условия прошлого года. Оценка условий формирования урожая относительно условий прошлого года на качественном уровне, наряду со средними многолетними

условиями, является наиболее часто применяемой в практической агрометеорологии. Как подчёркивалось ранее [1,2], применение в качестве эталонных условия прошлого года, кроме простоты восприятия потребителем, привлекательно с точки зрения технологии подготовки данных и выполнения расчетов. Рабочие наборы данных за весь период вегетации прошедшего года в следующем году пошагово (ежесуточно) замещаются данными текущего. Технологически при необходимости представляется возможным заменить эталон «прошлый год» на любой другой год, например, на «экстремально сухой» или «экстремально влажный».

Так как урожай является интегральной характеристикой агрометеорологических условий вегетационного периода, за меру отличия сложившихся условий текущей вегетации от прошлогодних принимается отношение ( $E_k$ ) конечных урожаев, рассчитанных по условиям текущего и прошлого года за оцениваемый период, выраженное в процентах [3-5]:

$$E_k = \frac{Y_k}{Y_{пг}} \times 100 \%, \quad (1)$$

где  $Y_k$ - урожай, рассчитанный по набору фактических данных: текущего года от всходов до даты расчета, и данных прошлого года от даты расчета до конца вегетации;

$Y_{пг}$  - урожай, рассчитанный по фактическим данным прошлого года от всходов до конца вегетации.

Разработка методов прогноза выполнялась с ориентацией на принятые в Росгидромете критерии оправдываемости и оперативные сроки составления прогнозов урожайности - по зелёной массе кукурузы - 21-23 июля, по зерновым и зернобобовым культурам в два срока - 21-23 июня и 21-23 июля.

При построении сценария ожидаемых метеорологических условий на период от даты составления прогноза до конца вегетации принят наиболее успешный из апробированных ранее «аналоговый» вариант.

Он представляющий собой метеорологические условия «года-аналога» по долгосрочному прогнозу погоды на предстоящий месяц с пролонгацией до конца вегетации. Для этого составлены каталоги в виде стандартных наборов суточных данных по четырем основным метеорологическим элементам входного потока данных по списку опорных станций за 1971-2019 годы. Он автоматически пополняется по окончании занесения фактической информации за полный период вегетации текущего года. После этого производится заключительный модельный расчет текущего года - расчет продуктивности культуры по фактической информации за полный период вегетации (вторая декада июня - первая декада сентября включительно). Результат этого расчета в начале следующего вегетационного периода заносится в набор данных для расчета комплексной количественной оценки условий формирования урожая культуры на заданные даты (например, конец декад) следующего года.

Существующие прикладные динамические модели и технологии их применения находятся в процессе дальнейшего совершенствования. Для надежной работы методов и технологий агрометеорологического обеспечения производства сельскохозяйственных культур и, в частности, разработанных на основе динамико-статистического подхода, необходима их систематическая корректировка. Соответствующие рекомендации по этой проблеме были выработаны участниками Международной научно-практической конференции «Агрометеорологическое обеспечение устойчивого развития сельского хозяйства в условиях глобального изменения климата» [6].

## **2 Разработка методов и технологии оценки условий вегетации и прогноза урожайности зелёной массы кукурузы по Новосибирской области**

### **2.1 Результаты адаптации базовой модели**

Работа выполнялась с учетом требований культуры, её сортов и гибридов, произрастающих на данной территории [10, 11, 12]. Задание начальных условий для расчетов на модели формировалось на основе данных наблюдений опорной сети станций по динамике формирования листостебельной биомассы.

Для привязки начальных условий по биомассам отдельных органов растений кукурузы к рассматриваемому региону ориентировались на результаты исследования Кулешова Н.Н. о ходе накопления сырой массы и сухого вещества в отдельных органах кукурузы по фазам развития из расчета на одно растение [10]. Детальное обсуждение параметров ростовых функций кукурузы на разных широтах опубликовано в [13-16]. Показано [15], что в более высоких широтах ростовые функции лучших сортов кукурузы близки к «ячменным». Уточнение параметров модели данного класса по культуре ячменя для условий Новосибирской области проводились в ФГБУ «СибНИГМИ» на данных специальных полевых экспериментальных наблюдений [1]. Результаты этих исследований учтены при разработке прикладного варианта динамической модели формирования урожая листостебельной массы кукурузы для условий юга Западной Сибири.

Расчет характеристик посева начинается со второй декады июня, а расчет динамики листостебельной биомассы в нашем варианте задан по накоплению средней суммы эффективных температур наступления фазы «9-ый лист».

Для адаптации модели к современным условиям произрастания кукурузы на территории Новосибирской области, в том числе и к соответствующему уровню урожайности зеленой массы кукурузы в регионе,

привлечены данные десяти опорных ГМС. Материалы этих станций наиболее полно характеризуют разнообразие природно-климатических условий обширной территории края и являются наиболее информативными в отношении формирования входного потока информации для решения поставленной задачи. Станции Огурцово, Коченёво, Ордынское, Каргат, Здвинск, Чистоозёрное, Купино, Баган, Краснозёрск, Карасук расположены в районах с наибольшими посевными площадями, занимаемыми в настоящее время посевами кукурузы на силос и зеленый корм. При отсутствии информации по числу часов солнечного сияния, она восполняется по данным близлежащих ГМС, выполняющим наблюдения по гелиографу.

Для направленной работы динамической модели формирования урожая заданной культуры корректировке подвергались параметры, наиболее сильно влияющие на расчет текущих значений биомассы отдельных органов растений и влажности корнеобитаемого слоя почвы: угол наклона световой кривой фотосинтеза ( $\alpha$ ), константа ( $a$ ) в формуле расчета устьичного сопротивления потоку  $\text{CO}_2$ , химическое сопротивление ( $r_c$ ), параметр ( $K_0$ ) в формуле расчета гидравлической проводимости почвы, константа для вычисления транспирации ( $m$ ). Для этого решается задача максимального пошагового приближения рассчитанных при помощи модели и фактических величин урожайности. Оптимальные величины параметров определяются на основе оценок согласования результатов модельных расчетов с данными по урожайности территориальных органов Федеральной службы государственной статистики.

Такие параметры модели, как, средние даты наступления фаз развития растений и суммы эффективных температур для их прохождения, густота посева уточняется методом статистической обработки данных многолетних агрометеорологических наблюдений гидрометеорологических станций, расположенных в ареале распространения производственных посевов культуры. По справочным материалам уточняются агрогидрологические свойства отдельных слоёв преобладающих типов почв в расположении

выбранных опорных станций, выполненным по полной программе, фиксируются координаты станций.

Определение и уточнение параметров модели выполнено путем статистической обработки данных наблюдений за 1991-2014 годы и методом итерационного подбора оптимальных величин параметров. Решалась задача максимального пошагового приближения рассчитанных при помощи модели и фактических величин средней урожайности. Оптимальные величины параметров определялись на основе оценок согласования результатов модельных расчетов с данными по урожайности территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Новосибирской области. Оценка согласования рассчитанных и наблюдаемых характеристик выполнена методом корреляционного анализа. Таким образом, динамическая модель "Погода-Урожай", адаптирована для расчета средней урожайности зеленой массы кукурузы по Новосибирской области, настроена на средний уровень культуры земледелия на рассматриваемом временном отрезке. При отсутствии значимого тренда урожайности такая настройка модели, предполагает некие средние условия уборки культуры. Тренд урожайности зеленой массы кукурузы на временном отрезке, взятом для разработки методов, (1991-2014 годы) не значим на 5 % - ном уровне значимости - коэффициент корреляции равен  $-0,254$  при значимой величине равной  $0,404$ .

В данном регионе, расположенном в так называемой зоне рискованного земледелия, условия уборки сельскохозяйственных культур нередко вносят существенный вклад в конечный результат всего процесса формирования урожая. Для учёта потерь урожая в связи со сложными погодными условиями периода уборочных работ, предложена поправка в виде средней из абсолютных ошибок расчетных величин урожайности по фактическим данным за полный период вегетации в такие годы для данной культуры. Годы со сложными условиями уборки выбирались по описанию периодов в агрометеорологических ежегодниках [8].

Анализ модельных расчетов по заключительному варианту идентификации параметров показал, что среднее значение из абсолютных ошибок расчета урожайности зеленой массы кукурузы по фактическим данным в годы с тяжелыми условиями уборки по Новосибирской области (1997, 1998, 1999, 2009, 2010, 2012, 2014 годы) составляет 71,2 ц/га, в сторону превышения, относительно фактических величин.

Результат адаптации динамической модели - степень согласования рассчитанных, в том числе и с учетом поправки на условия уборки, и фактических величин средней областной урожайности зеленой массы кукурузы показана в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1 - Теснота согласования рассчитанных и фактических средних величин основных характеристик выхода модели формирования урожая зеленой массы кукурузы для Новосибирской области по результатам адаптации базовой модели

Показатель	Коэффициент корреляции		Среднее отклонение	Обеспеченность отклонений разной величины, %		
	$r$	$r_{zn}$		отклонения	обеспеченность	
Урожайность с учетом условий уборки	0,889	0,404	8,1 %	<10 %	62,5	
				<20 %	91,7	
<b>Запасы продуктивной влаги в почве</b>						
0-20см	Огурцово	0,847	0,404	8,0 мм	-	-
	Кулундинская зона	0,567	0,404	17,4 мм	-	-
0-100см	Огурцово	0,904	0,404	7,8 мм	-	-
	Кулундинская зона	0,800	0,404	19,2 мм	-	-

Коэффициент корреляции модельного ряда величин урожайности (с поправкой в годы с экстремальными условиями уборки) и её фактических значений по данным Территориального органа государственной статистики по Новосибирской области равен 0,889 при значимой величине на 5 %-ном уровне значимости, равном 0,404. Обеспеченность расчетов урожайности с ошибкой, не превышающей  $0,67 \sigma_y$  (22,7 ц/га), за 1991-2014 годы составила 87,5 %.

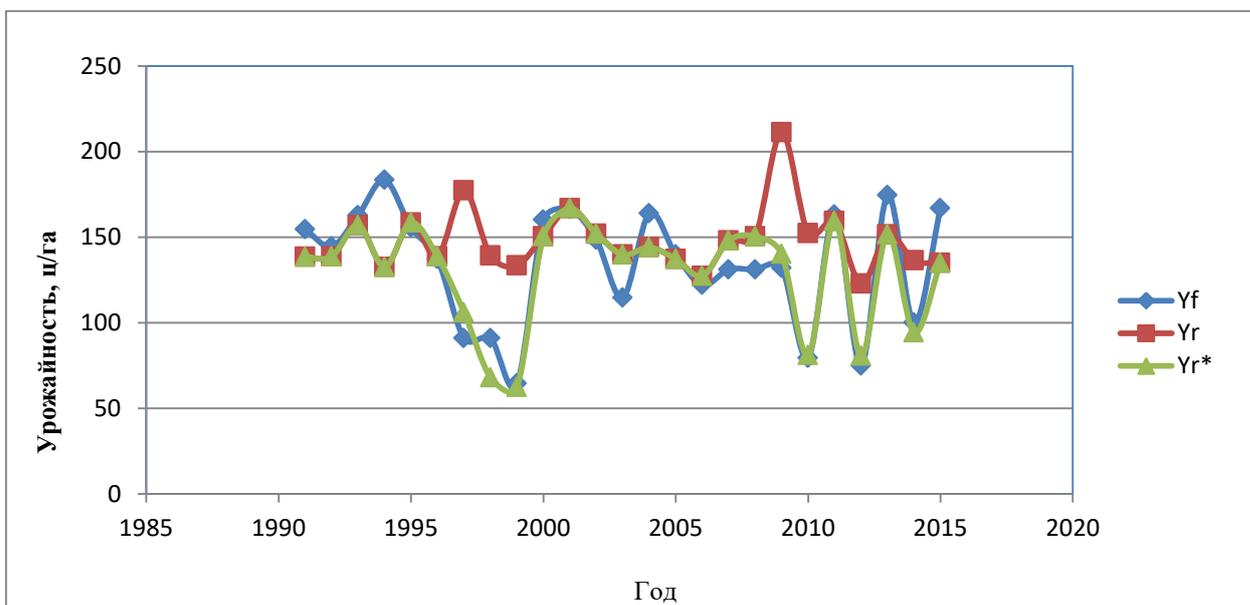
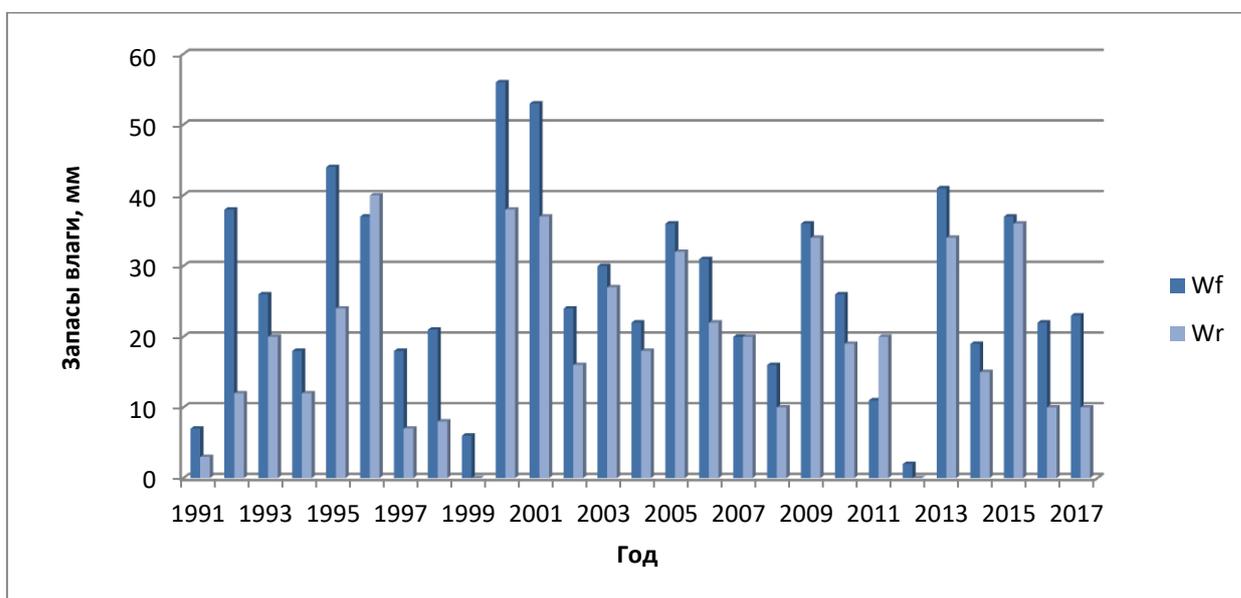


Рисунок 1 - Согласование модельной ( $Y_r$ ), в том числе с учетом поправок на условия уборки ( $Y_r^*$ ), средней урожайности зелёной массы кукурузы по Новосибирской области и фактической ( $Y_f$ )

Получены значимые коэффициенты корреляции модельных и наблюдаемых запасов продуктивной влаги в почве под кукурузой на примере третьей декады июля по данным сопряженных длиннорядных наблюдений агрометеорологической станции Огурцово в Центрально-Восточной зоне и комбинированного ряда данных наблюдений станций\*, освещающих условия вегетации кукурузы в Кулундинской зоне области (таблица 1, рисунок 2, 3). Среднее отклонение модельных запасов влаги от наблюдаемых на начало репродуктивного развития растений кукурузы составляет в слое почвы 0-20 см по АМС Огурцово 8 мм, по Кулундинской

зоне 7,8 мм, а в слое 0-100см по АМС Огурцово - 17,4 мм, по Кулундинской зоне -19,2 мм.

а)



б)

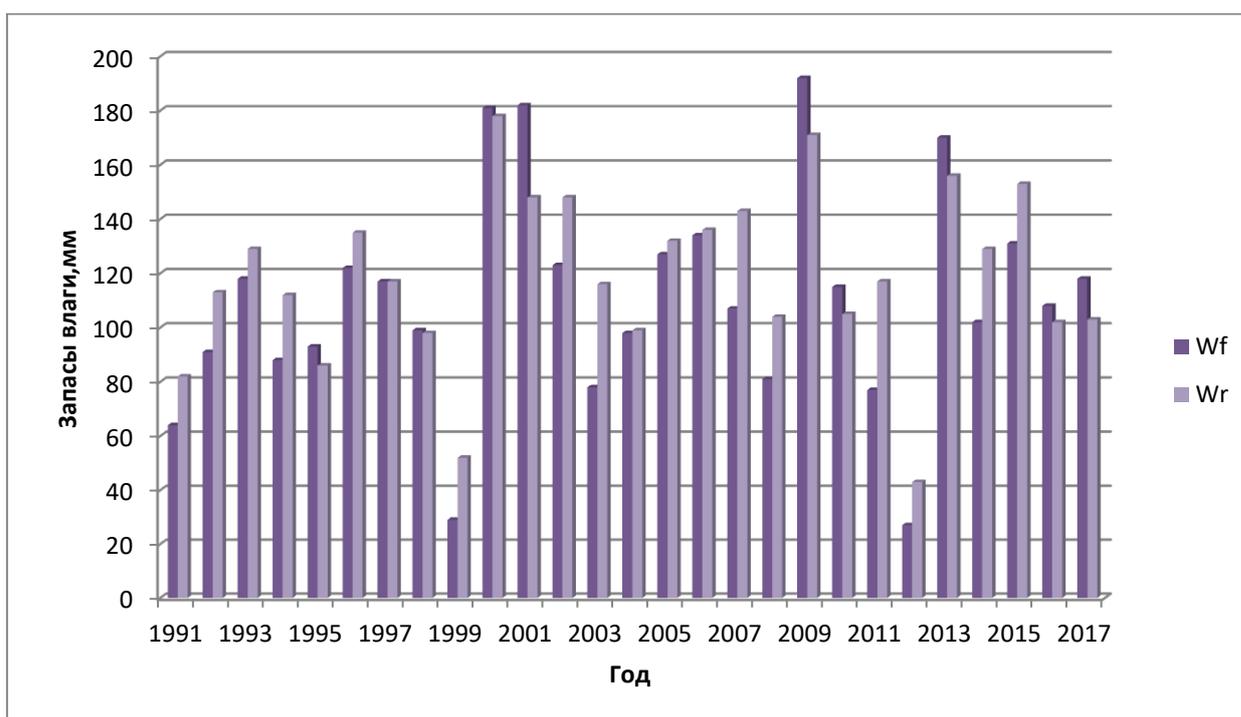
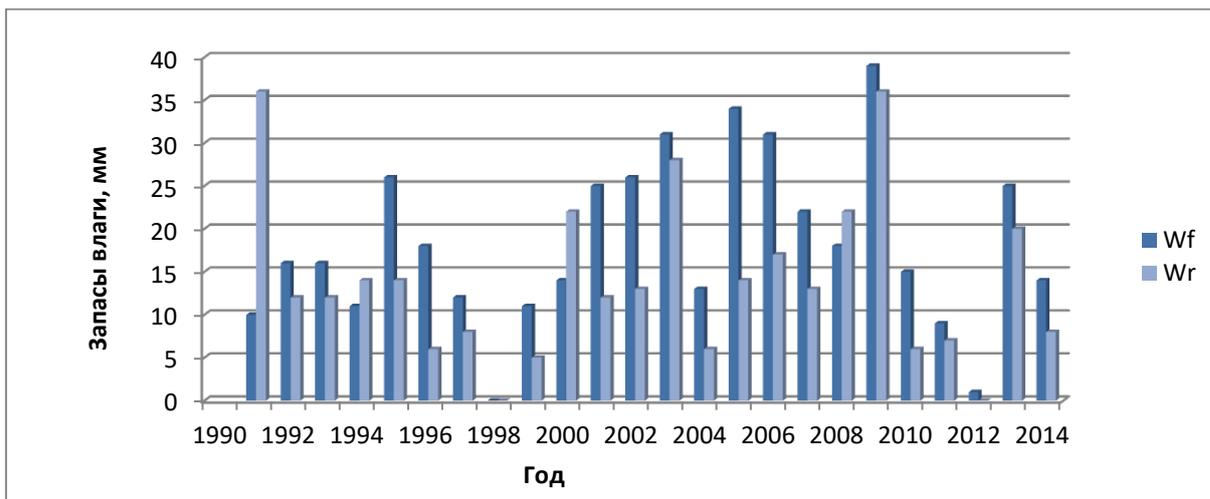


Рисунок 2 - Согласование модельных ( $W_r$ ) и наблюдаемых ( $W_f$ ) запасов продуктивной влаги под кукурузой в слоях почвы 0-20 см (а) и 0-100 см (б). Центрально-Восточная зона, АМС Огурцово, 28 июля

а)



б)

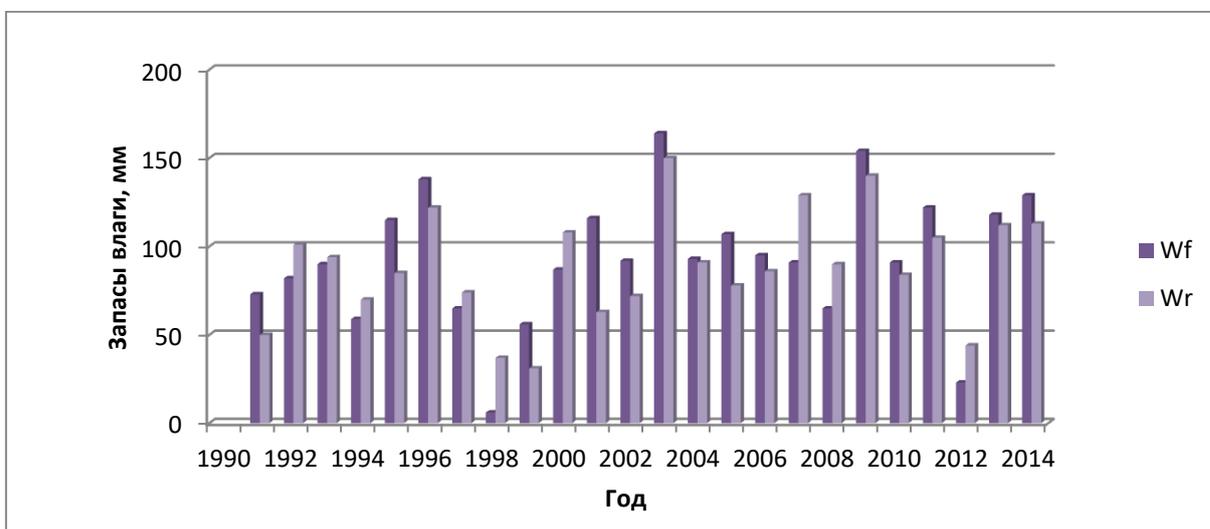


Рисунок 3 - Согласование модельных ( $W_r$ ) и наблюдаемых ( $W_f$ ) запасов продуктивной влаги под кукурузой в слоях почвы 0-20 см (а) и 0-100 см (б). Кулундинская зона области, согласно списку станций \*, 28 июля.

\*Список станций наблюдений по Кулундинской зоне

Год	Станция	Год	Станция	Год	Станция
1991	Баган	1999	Баган	2007	Карасук
1992	Купино	2000	Баган	2008	Карасук
1993	Баган	2001	Баган	2009	Карасук
1994	Баган	2002	Баган	2010	Карасук
1995	Купино	2003	Купино	2011	Чистоозёрное
1996	Купино	2004	Чистоозёрное	2012	Карасук
1997	Баган	2005	Краснозёрск	2013	Чистоозёрное
1998	Баган	2006	Карасук	2014	Чистоозёрное

Верификация модели выполнена на независимых данных 2015-2017 годов с учётом отсутствия значимого тренда урожайности зелёной массы кукурузы по Новосибирской области на данный временной период и величины допустимого отклонения результата расчетов от фактических величин урожайности (таблица 2).

Таблица 2- Результаты верификации модели по урожайности на независимых данных 2015 -2017 годов

Год	Урожайность, ц/га		Отклонение, ц/га
	фактическая	рассчитанная	
2015	169,5	172,4	-2,9
2016	183,7	175,8	7,9
2017	158,1	176,1	-18,0

Результаты адаптации модели «Погода-Урожай» для кукурузы по Новосибирской области позволяют сделать заключение о возможности ее применения для практических целей. Адаптированную таким образом модель, предполагается применять в качестве средства расчета количественной оценки комплекса условий формирования урожая культуры на заданный момент вегетационного периода в сравнении с выбранным эталоном и ожидаемой урожайности зелёной массы кукурузы.

Оптимальные величины уточняемых параметров на заключительном этапе идентификации для Новосибирской области на данном временном отрезке следующие: угол наклона световой кривой фотосинтеза ( $\alpha$ ) – 0,035, константа (a) в формуле расчета устьичного сопротивления потоку CO<sub>2</sub> – 0,35, химическое сопротивление ( $r_c$ ) - 4,0, параметр ( $K_o$ ) в формуле расчета

гидравлической проводимости почвы - 29,6, константа для вычисления транспирации (m) – 0,45.

## 2.2 Апробация методов

В качестве фактической комплексной оценки условий формирования урожая конкретного года, относительно условий прошлого года, принято отношение фактических величин урожайности последующего года к урожайности предыдущего. Успешность метода расчета количественной оценки сложившихся условий формирования урожая зеленой массы кукурузы относительно условий аналогичного периода прошлого года характеризуется статистическими оценками за полный вегетационный период (таблица 3, рисунок 4).

Согласование модельных оценок за весь период вегетации характеризуется коэффициентом корреляции 0,940 при значимой величине, равной 0,404. Обеспеченность допустимого отклонения 87,5 %.

Таблица 3 - Сравнение рассчитанных и фактических величин комплексных оценок агрометеорологических условий формирования урожая зелёной массы кукурузы по территории Новосибирской области за полный вегетационный период, относительно условий прошлого года

Год	Урожайность, ц/га				Оценка, %		Отклонение, %	
	фактическая		рассчитанная		факти- ческая	рассчи- танная	абсо- лютное	относи- тельное
	текущий год	прошлый год	текущий год	прошлый год				
2015	166,9	100,1	172,4	97,7	166,7	176,4	-9,7	5,8
2016	183,7	166,9	175,8	172,4	110,1	102,0	8,1	7,4
2017	158,1	183,7	176,1	175,8	86,1	100,2	-14,1	16,4

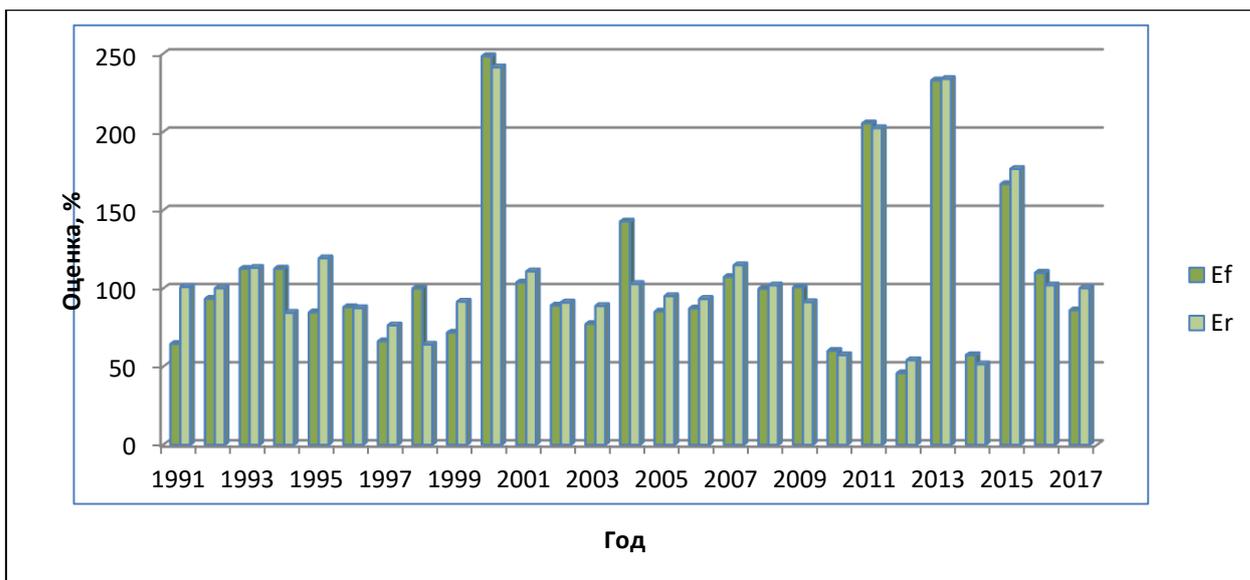


Рисунок 4 - Согласование рассчитанных ( $E_{r*}$ ) и фактических ( $E_f$ ) оценок условий формирования урожая зелёной массы кукурузы по Новосибирской области за полный вегетационный период. 2015-2017 годы по независимым данным.\*- учтены поправки в годы со сложными условиями уборки

За годы авторской оценки прогноза урожайности зеленой массы кукурузы 2015-2017 годы по допустимому отклонению модельных величин от фактических, согласно [9], оправдались все прогнозы – оправдываемость метода 100% (таблица 4 - 5, рисунок 5).

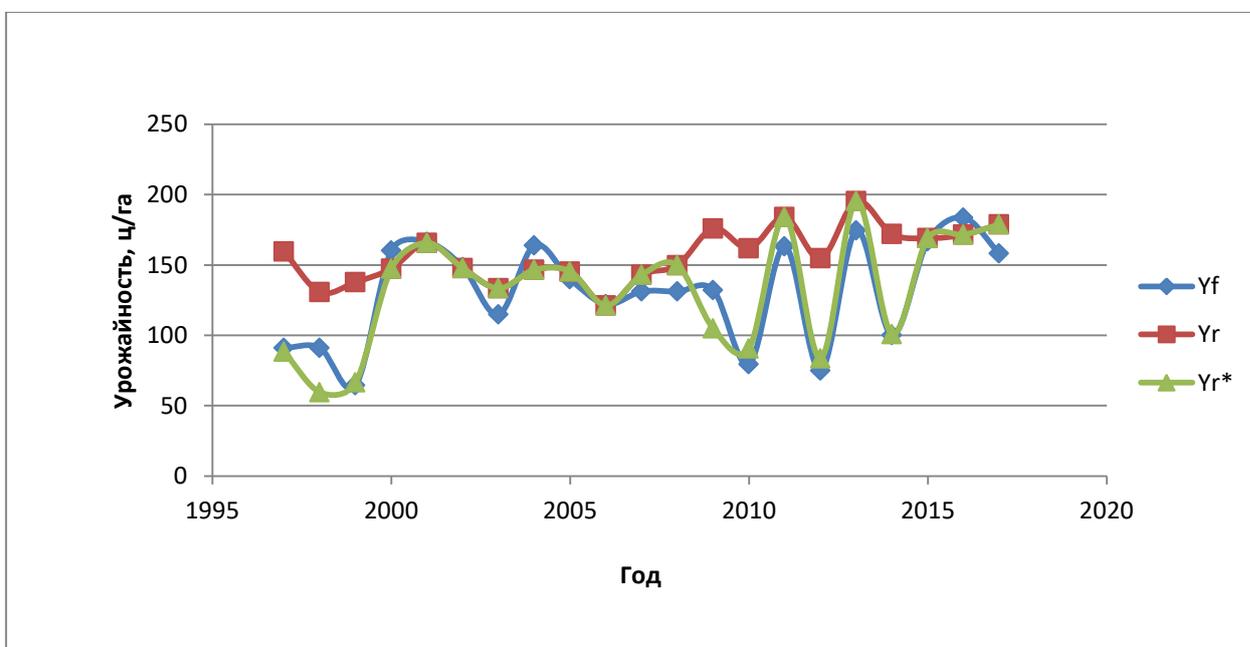


Рисунок 5 - Сравнение ожидаемой средней урожайности зелёной массы кукурузы по Новосибирской области, рассчитанной по сценарию "год-аналог" ( $Y_p$ ), в том числе с поправкой на условия уборки ( $Y_p^*$ ), и фактической ( $Y_f$ ). 2015-2017 годы по независимым данным

Таблица 4 - Сравнительная оценка качества методов прогноза средней урожайности зелёной массы кукурузы всех категорий хозяйств по Новосибирской области на независимых данных 2015-2017 годов

Год	Факт. урожайность (Уф), ц/га	Тип прогноза								
		Методический			Инерционный			Климатологический		
		прогн. урожай. (Уп), ц/га	абс. ошибка (ΔУ), ц/га	относ. ошибка (Pi), %	прогн. урожай. (Уп), ц/га	абс. ошиб (ΔУ), ц/га	относ. ошибка (Pi), %	прогн. урожай. (Уп), ц/га	абс. ошиб. (ΔУ), ц/га	относ. ошибка (Pi), %
2015	166,9	169,0	-2,1+	1,5	100,1	66,8-	49,2	137,1	29,8-	17,8
2016	183,7	161,0	22,7+	16,2	166,9	16,8+	12,0	137,1	46,6-	33,3
2017	158,1	178,8	-20,7+	13,2	183,7	25,6-	16,3	137,1	21,0+	13,4

Таблица 5 – Оценка оправдываемости методов прогноза средней урожайности зелёной массы кукурузы по Новосибирской области на независимых данным 2015-2017 годов

Тип прогноза	Оправдываемость методов, %	Средняя относительная ошибка оправдавшихся прогнозов, %
Методический	100	10,3
Инерционный	33,3	12,0
Климатологический	33,3	21,0

### 2.3 Технология выполнения расчетов

Для выполнения расчетов по разработанным методам созданы пакеты программ для персонального компьютера на языке Фортран в электронном виде:

1) пакет программ для расчета оценок условий формирования урожая и прогноза урожайности зелёной массы кукурузы по Новосибирской области состоит из:

- программы усвоения ежедневных и декадных данных из электронной версии таблицы ТСХ-1 рабочими наборами данных “ky.dat”, “ky1.dat”, и oky.dat загрузочный модуль “кукурузансо.exe “);
- программы расчета оценки сложившихся условий формирования урожая зеленой массы кукурузы, относительно аналогичного периода прошлого года, на любой момент вегетационного периода (загрузочный модуль року.exe);
- программы расчета ожидаемых средних по области величин урожайности зеленой массы кукурузы (загрузочный модуль рку.exe);
- каталога фрагментов метеорологических блоков рабочих наборов данных за 1971-2018 годы, содержащих ежегодные среднесуточные метеорологические данные опорных станций за 21.06 - 10.09 в виде отдельных файлов за каждый год, размещенных в директории “ANALOG ”;
- инструкция по эксплуатации программного комплекса.

### **3 Разработка методов и технологии оценки условий вегетации и прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по Томской области**

#### **3.1 Результаты адаптации базовой модели**

Посевные площади, занятые под зерновыми и зернобобовыми культурами в Томской области, согласно данным Федеральной службы государственной статистики по Томской области в 2017 году составили около 186,2 тысяч гектаров. Ведущую роль в этой группе культур занимает яровая пшеница, о чем свидетельствует и тесная корреляционная зависимость средней по области урожайности зерновых и зернобобовых культур и средней областной урожайности яровой пшеницы. Коэффициент корреляции за период 1991-2015 годы равен 0,827. В группу зерновых и зернобобовых культур входят также биологически близкие яровой пшенице культуры - яровой ячмень и овес. Коэффициент корреляции средней по области урожайности этих культур и урожайности зерновых и зернобобовых равны 0,486 и 0,624 соответственно, при значимой величине равной 0,396.

По опыту решения аналогичных задач для других регионов Сибирского федерального округа (Новосибирская и Кемеровская области) в качестве основного средства расчета необходимых характеристик по группе зерновых и зернобобовых культур предлагается применить динамическую модель формирования урожая яровой пшеницы, адаптированную для условий данной территории и на современный уровень урожайности, и учитывающую корреляционную зависимость средней по территории области урожайности зерновых и зернобобовых культур и средней областной урожайности яровой пшеницы.

В ФГБУ «СибНИГМИ» на основе одного из вариантов динамической модели ВНИИСХМ "Погода-Урожай" [3-5] разработана прикладная динамическая модель формирования урожая яровой пшеницы с суточным разрешением для условий Западной Сибири [1].

На базе данной модели разработаны и с 2009 года внедрены в оперативную практику методы оценки агрометеорологических условий формирования урожая и прогноза средней урожайности яровой пшеницы по территории Томской, Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края [2].

Изменения, наблюдаемые за последующие годы в сельском хозяйстве региона, как упоминалось ранее, требуют соответствующей корректировки параметров применяемых моделей.

Замечено, что расчетные величины урожайности яровой пшеницы за период 2013-2017 годы существенно ниже фактических значений. В конце периода отклонения, превысили допустимые на 1,6 - 4,8 ц/га. Это подтверждает необходимость соблюдать выработанное [6] решение о систематической корректировке методик количественной оценки состояния и прогнозов урожайности сельскохозяйственных культур в связи с внедрением новых сортов и гибридов, технологий возделывания культур и современными тенденциями изменения климата.

Для дальнейшего применения рабочего варианта динамической модели формирования урожая яровой пшеницы по Томской области в практической агрометеорологии, в том числе и для целей, намеченных данным исследованием, выполнена ее адаптация к современному уровню урожайности в регионе.

Оценка согласования рассчитанных и наблюдаемых характеристик выполнена методом корреляционного анализа на основе данных территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Томской области.

Пошаговые изменения наиболее чувствительных параметров водного блока модели, а именно константа ( $a$ ) в формуле расчета устьичного сопротивления потоку  $CO_2$ , химическое сопротивление ( $r_c$ ), параметр ( $K_0$ ) в формуле расчета гидравлической проводимости почвы, константа для вычисления транспирации ( $m$ ) не дали ожидаемого эффекта.

Оптимального приближения рассчитанной и фактической урожайности яровой пшеницы достигнуто путём итерационного подбора величины наиболее чувствительного параметра ростового блока модели - угла наклона световой кривой фотосинтеза -  $\alpha$ . Для периода 2001-2011годы  $\alpha$  равно  $0,021 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$ , для 2012-2015гг. -  $0,024 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$ .

Таким образом, динамическая модель "Погода-Урожай" адаптирована на современный уровень средней урожайности яровой пшеницы по Томской области и настроена на средний уровень культуры земледелия на рассматриваемом временном отрезке, в том числе и на некие средние условия уборки культуры. Тренд урожайности яровой пшеницы на временном отрезке 2001-2015 годы, не значим на 5%-ном уровне значимости ( $r=-0,34$  при значимой величине равной 0,514).

Погодные условия периода уборочных работ нередко вносят существенный вклад в конечный результат. В этой связи, для учёта потерь урожая в годы со сложными условиями уборки для данной культуры, предложена поправка в виде средней из абсолютных ошибок расчетных величин урожайности по фактическим данным за полный период вегетации. Годы со сложными условиями уборки выбирались по описанию этих периодов в агрометеорологических ежегодниках [8]. Анализ модельных расчетов с учётом скорректированного ряда лет, показали, что среднее значение из абсолютных ошибок расчета урожайности яровой пшеницы по фактическим данным в годы со сложными условиями уборки по Томской области (1993, 1994, 1996, 2002, 2006, 2014 годы) составляет 3,0 ц/га, в сторону превышения рассчитанной урожайности, относительно фактических величин.

Результат адаптации динамической модели - степень согласования рассчитанных, в том числе и с учетом поправки на условия уборки, и фактических величин средней областной урожайности яровой пшеницы показана в таблице 6 и на рисунке 6. Обеспеченность расчетов урожайности с

ошибкой, не превышающей  $0,67 \sigma_y$  (1,5 ц/га), за 2001-2015 годы составила 86,7 %. Для справки: величина  $0,8 \sigma_y = 1,7$  ц/га.

Таблица 6 - Теснота согласования рассчитанных и фактических средних величин основных характеристик выхода модели формирования урожая яровой пшеницы для Томской области по результатам уточнения параметров рабочей модели

Показатель		Коэффициент корреляции		Среднее отклонение
		$r$	$r_{зн}$	
Урожайность с учетом условий уборки		0,848	0,482	1,0 ц/га
Запасы продуктивной влаги в почве, Томск, 28 июля	0-20см	0,814	0,514	8,1 мм
	0-100см	0,598	0,514	27,4 мм

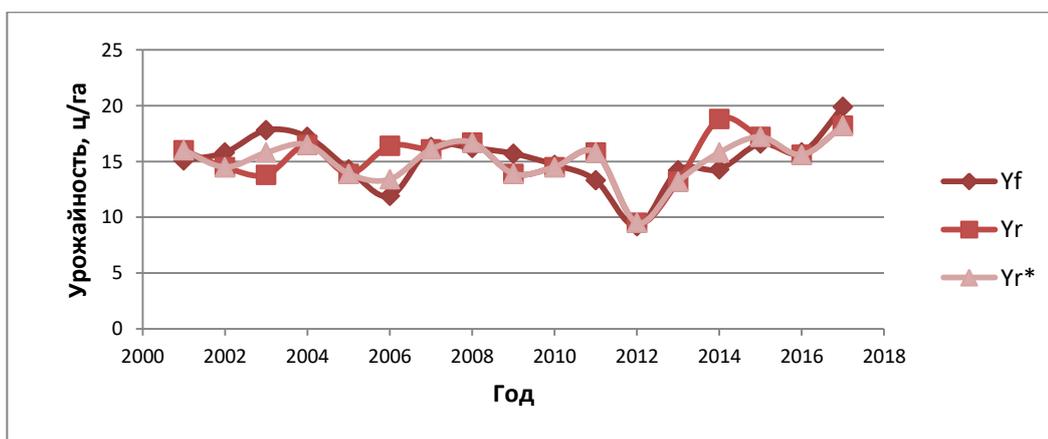


Рисунок 6 - Согласование модельной средней урожайности яровой пшеницы по Томской области ( $Y_r$ ), в том числе с поправкой на условия уборки ( $Y_r^*$ ) и фактической ( $Y_f$ )

Получены значимые коэффициенты корреляции модельных и наблюдаемых запасов продуктивной влаги в почве под яровой пшеницей на примере третьей декады июля по данным сопряженных длиннорядных агрометеорологических наблюдений станции Томск (таблица 6, рисунки 7, 8).

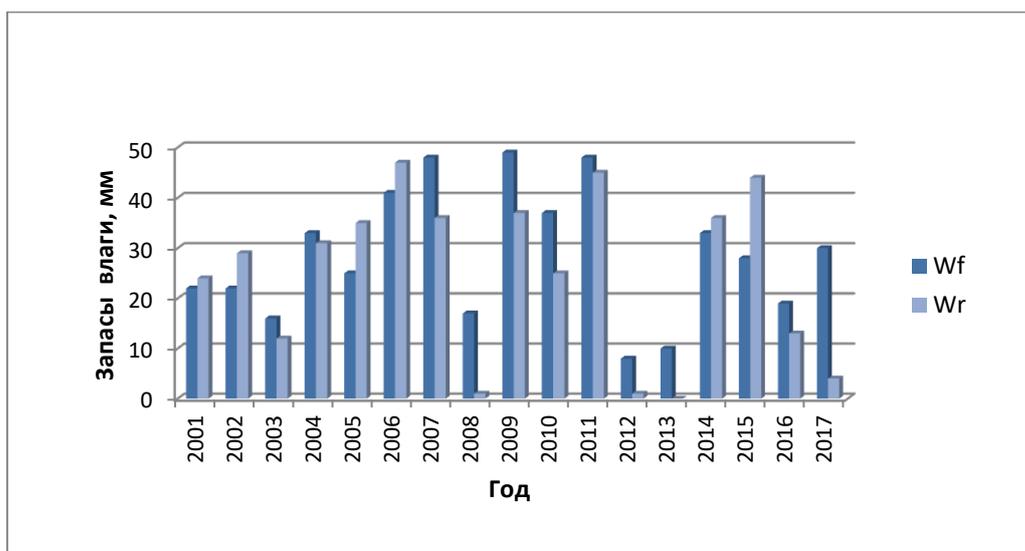


Рисунок 7 - Согласование модельных ( $W_r$ ) и наблюдаемых ( $W_f$ ) запасов продуктивной влаги под яровой пшеницей в слое почвы 0-20см, Томск, 28 июля

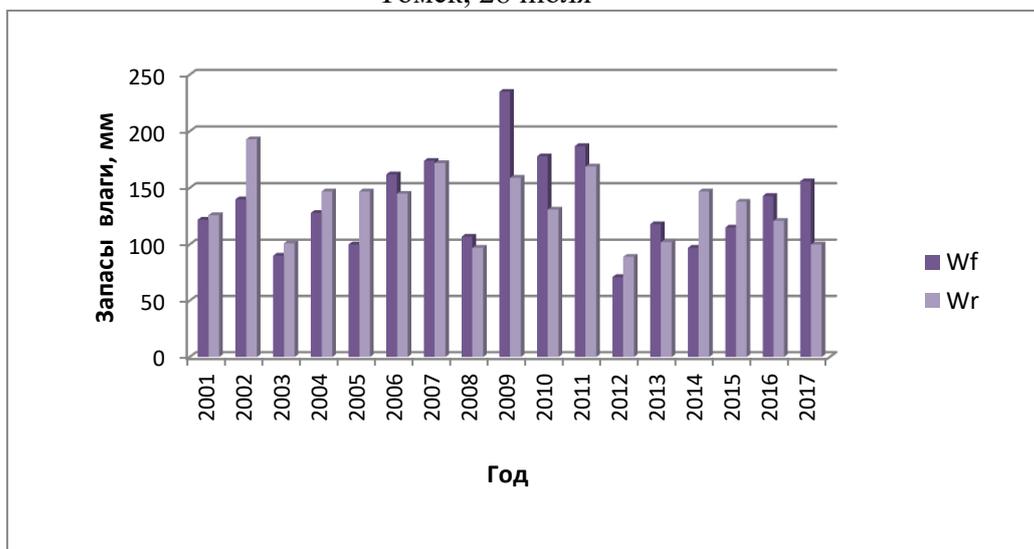


Рисунок 8 - Согласование модельных ( $W_r$ ) и наблюдаемых ( $W_f$ ) запасов продуктивной влаги под яровой пшеницей в слое почвы 0-100см, Томск, 28 июля

Среднее отклонение модельных запасов влаги от наблюдаемых на начало периода максимального развития вегетативной массы растений яровой пшеницы составляет в слое почвы 0-20 см 8 мм, а в слое 0-100 см -27 мм.

Результаты корректировки модели на независимых данных 2016-2018 годов представлены в таблице 7.

Таблица 7 - Результаты верификации модели по урожайности яровой пшеницы на независимых данных

Год	Урожайность, ц/га		Отклонение, ц/га
	фактическая	рассчитанная	
2016	15,8	15,6	0,2
2017	19,9	18,2	1,7
2018	23,1	19,0	4,1

Исходя из изложенного, для реализации поставленной задачи – создания автоматизированной технологии количественной оценки условий формирования урожая и прогноза средней урожайности группы зерновых и зернобобовых культур на основе динамического моделирования продукционного процесса растений, в систему расчета включена корреляционная зависимость средней областной урожайности зерновых и зернобобовых культур и яровой пшеницы по Томской области. Уравнение связи имеет следующий вид:

$$y = 0,669x + 2,472, \quad (2)$$

где  $y$  – средняя областная урожайность зерновых и зернобобовых культур;  $x$  - средняя областная урожайность яровой пшеницы.

Далее, по аналогии с предыдущим этапом, выполнена корректировка параметров модели на современный уровень урожайности группы зерновых и зернобобовых культур в пределах территории области. Оптимальный результат получен при значениях угла наклона световой кривой фотосинтеза -  $\alpha$  для периода 2000-2007 годы равном  $0,022 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$ , для 2008-2015годы -  $0,025 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$ ., а на время авторских испытаний 2016-2018 годы  $-0,027 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$ .

Результат корректировки - степень согласования рассчитанных, (в том числе и с учетом поправки на условия уборки), и фактических величин средней областной урожайности зерновых и зернобобовых культур

представлены на рисунке 9. Обеспеченность расчетов урожайности с ошибкой, не превышающей  $0,67 \sigma_y$  (1,6 ц/га), за 1991-2015 годы составила 88,0 %, за 2001-2015 годы - 93,3 %.

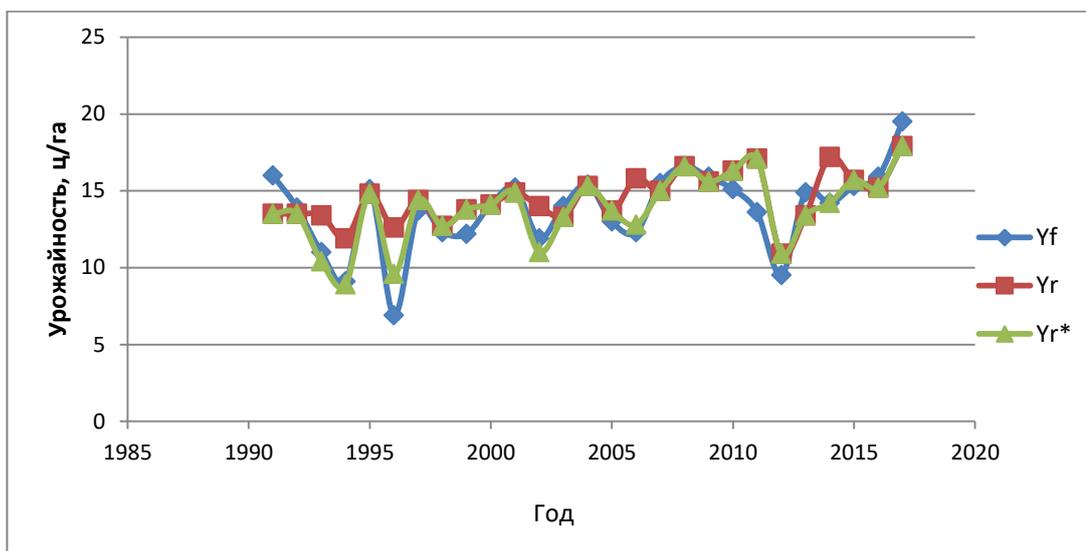


Рисунок 9 - Согласование модельных величин ( $Y_r$ ) средней урожайности зерновых и зернобобовых культур по Томской области, в том числе с поправками на условия уборки ( $Y_r^*$ ) и фактической ( $Y_f$ )

### 3.2 Апробация методов

Расчет количественной оценки сложившихся условий формирования урожая зерновых и зернобобовых культур относительно условий аналогичного периода прошлого года характеризуется статистическими оценками за полный вегетационный период (таблица 8, рисунок 9).

Согласование модельных оценок за полный период вегетации за 1991-2015 годы характеризуется коэффициентом корреляции 0,911 при значимой величине, равной 0,396, за 2001-2015 годы - 0,845. Обеспеченность допустимого отклонения (21,6 %) – 92,0 %.

Таблица 8 - Сравнение рассчитанных и фактических величин комплексных оценок агрометеорологических условий формирования урожая зерновых и зернобобовых культур по территории Томской области за полный вегетационный период, относительно условий прошлого года

Год	Урожайность, ц/га				Оценка, %		Отклонение, %	
	фактическая		рассчитанная		факти- ческая	рассчи- танная	абсо- лютное	относи- тельное
	текущий год	прошлый год	текущий год	прошлый год				
2016	15,9	15,3	15,2	15,7	103,9	96,8	7,1	6,8
2017	19,5	15,9	17,9	15,2	122,6	117,8	4,8	3,9
2018	21,6	19,5	17,0	17,9	110,8	95,0	15,8	14,2

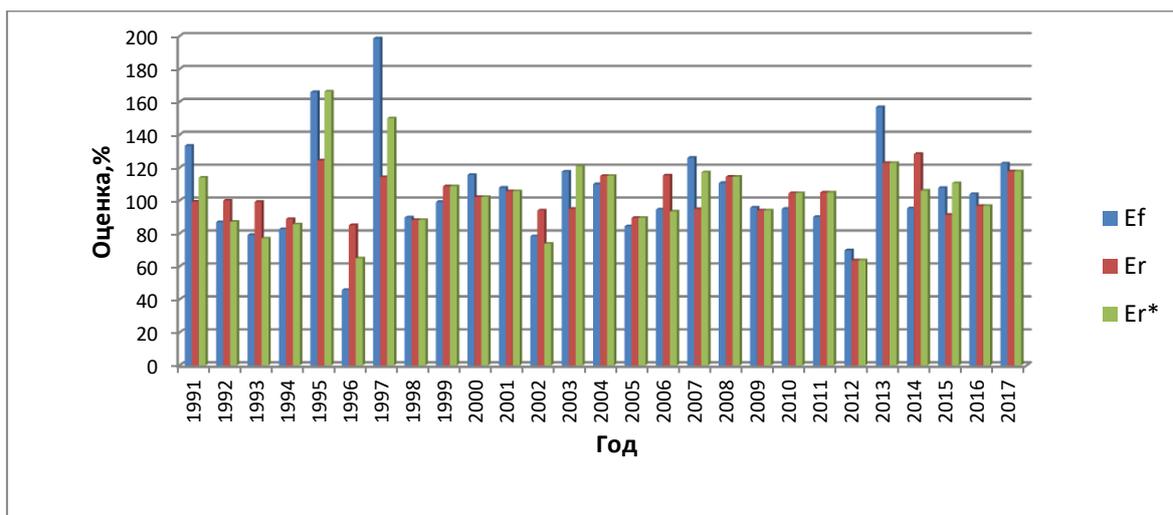


Рисунок 10 - Согласование рассчитанных на конец вегетации ( $E_r$ ), с поправкой на условия уборки ( $E_r^*$ ) и фактических ( $E_f$ ) оценок агрометеорологических условий формирования урожая зерновых и зернобобовых культур по Томской области

Авторская оценка метода прогноза средней урожайности зерновых и зернобобовых культур по сценарию ожидаемых агрометеорологических условий «год-аналог», в том числе и на независимых данных 2016-2018 годов, показана в таблицах 9, 10 и на рисунках 11,12 .

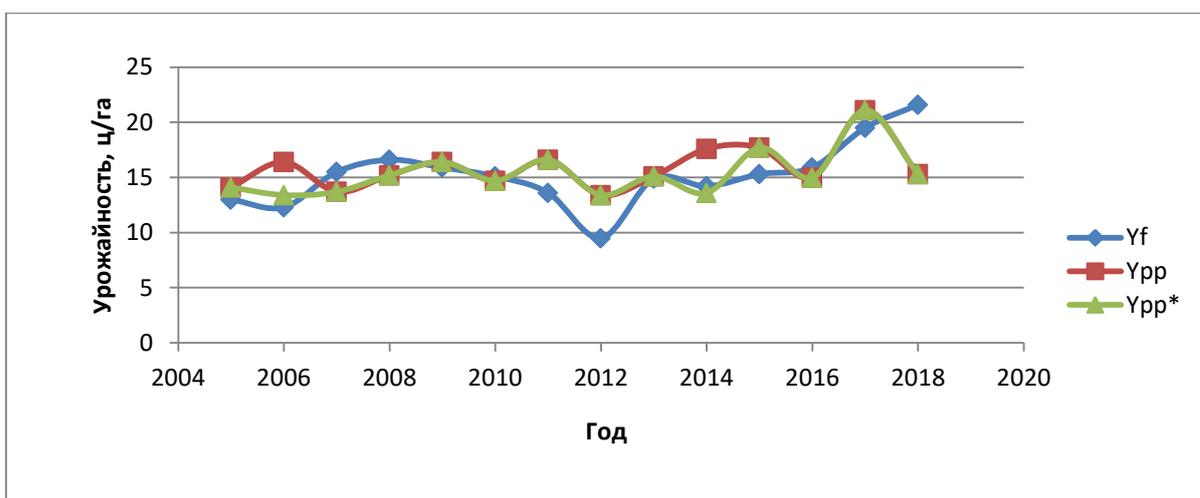


Рисунок 11 - Сравнение прогнозируемой модельной средней урожайности зерновых и зернобобовых культур по Томской области ( $Y_{pp}$ ), в том числе с учетом поправки на условия уборки ( $Y_{pp}^*$ ) и фактической ( $Y_f$ ). Предварительный срок прогноза

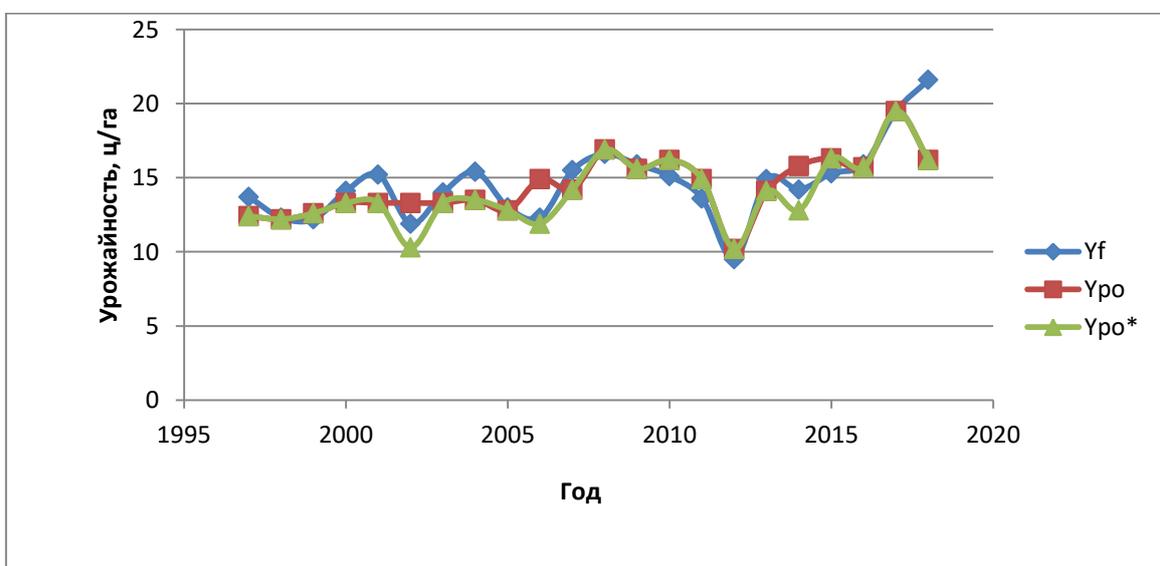


Рисунок 12 - Сравнение прогнозируемой модельной средней урожайности зерновых и зернобобовых культур по Томской области ( $Y_{po}$ ), в том числе с учетом поправки на условия уборки ( $Y_{po}^*$ ) и фактической ( $Y_f$ ). Уточненный срок прогноза

Для рассматриваемого региона информация о «годах аналогах» по долгосрочному прогнозу погоды на июль, необходимая для предварительного прогноза урожайности, восстановлена с 2005 года, а на август (для уточненного прогноза) - с 1997 года.

Обеспеченность диагностических расчётов ожидаемой урожайности по допустимой погрешности по зерновым и зернобобовым культурам за период

2005-2015 годы по предварительному прогнозу составляет 81,8 % и за 1997-2015 годы по уточненному прогнозу – 84,2 %.

За годы авторских испытаний (2016-2018 годы) в двух последних из них фактическая средняя урожайность группы зерновых и зернобобовых культур в весе после доработки по Томской области значительно превысила её абсолютный максимум за предшествующие 26 лет – на 2,9 ц/га и 5,0 ц/га соответственно. В 2018 году методические прогнозы превысили соответствующие допустимые критерии оценки оправдываемости.

Таблица 9 - Сравнительная оценка качества методов прогноза средней урожайности зерновых и зернобобовых культур по территории Томской области на независимых данных 2016-2018 годов

Год	Фактическая Урожайность, ц/га	Прогнозируемая урожайность, ц/га	Абсолютная ошибка, ц/га	Относительная ошибка, %	Прогнозируемая урожайность, ц/га	Абсолютная ошибка, ц/га	Относительная ошибка, %
		Методические прогнозы					
		Предварительный			Уточненный		
2016	15,9	15,0	0,9+	6,4	15,7	0,2+	1,4
2017	19,5	21,1	-1,6+	10,0	19,5	0+	0
2018	21,6	15,3	6,3-	36,4	16,2	5,4-	31,2
		Инерционный			Климатологический		
2016	15,9	15,3	0,6+	4,3	13,5	2,4-	17,1
2017	19,5	15,9	3,6-	22,5	13,5	6,0-	37,5
2018	21,6	19,5	2,1-	12,1	13,5	8,1-	46,8

В целом, по независимым данным 2016-2018 годов предварительный и уточнённый методические прогнозы урожайности зерновых и зернобобовых культур оправдались в двух годах (66,7%) и инерционный в одном (33,3%) (таблица 10).

Аналогичная оценка прогнозов урожайности яровой пшеницы с учетом корректировки параметров модели, разработанной в 2007 году на современный уровень продуктивности культуры представлена в таблицах 11 и 12.

Таблица 10 – Оценка оправдываемости методов прогноза средней урожайности зерновых и зернобобовых культур по Томской области на независимых данных 2016-2018 годов

Тип прогноза	Оправдываемость методов, %	Средняя относительная ошибка оправдавшихся прогнозов, %
Методический предварительный	66,7	8,2
Методический уточненный	66,7	0,7
Инерционный	33,3	4,3
Климатологический	0	0

Средняя урожайность яровой пшеницы по Томской области в 2017 и 2018 годах также существенно превысила её абсолютный максимум за предшествующие 26 лет – на 1,2 ц/га и 4,4 ц/га соответственно. В 2016 году оправдались все, представленные в таблице 11 прогнозы с минимальной ошибкой предварительного методического, в двух годах (2016 и 2017) - только уточнённый методический.

Оправдываемость уточненного методического прогноза урожайности яровой пшеницы версии 2019 года 66,7 %, предварительного методического, инерционного и климатологического - 33,3 % с некоторым преимуществом по относительной ошибке предварительного методического (таблица 12). Наблюдаемые положительные тренды урожайности по группе зерновых и зернобобовых культур и по яровой пшенице за 2004-2018 годы по Томской области характеризуются коэффициентами корреляции, равными 0,479 и 0,404 соответственно при значимой величине 0,514. При достижении значимого уровня трендов в последующие годы потребуются их учет в моделях.

Таблица 11 - Сравнительная оценка качества методов прогноза средней урожайности яровой пшеницы по территории Томской области на независимых данных 2016-2018 годов

Год	Фактическая урожайность, ц/га	Прогнозируемая урожайность, ц/га	Абсолютная ошибка, ц/га	Относительная ошибка, %	Прогнозируемая урожайность, ц/га	Абсолютная ошибка, ц/га	Относительная ошибка, %
		<b>Методические прогнозы</b>					
		Предварительный			Уточненный		
2016	15,8	16,3	-0,5+	3,6	16,7	-0,9+	6,4
2017	19,9	22,1	-2,2-	11,2	20,4	-0,5+	3,1
2018	23,1	16,6	6,5-	36,3	17,4	5,7-	31,8
		Инерционный			Климатологический		
2016	15,8	16,6	-0,8+	5,7	14,3	1,5-+	10,7
2017	19,9	15,8	4,1-	25,3	14,3	5,6-	34,6
2018	23,1	19,9	3,2-	17,9	14,3	8,8-	49,2

Таблица 12 – Оценка оправдываемости методов прогноза средней урожайности яровой пшеницы по Томской области на независимых данных 2016-2018 годов

Тип прогноза	Оправдываемость методов, %	Средняя относительная ошибка оправдавшихся прогнозов, %
Методический предварительный	33,3	3,6
Методический уточненный	66,7	4,8
Инерционный	33,3	5,7
Климатологический	33,3	10,7*

\* - только для уточненного срока прогноза

### 3.3 Технология выполнения расчетов

Разработана автоматизированная технология расчета количественной оценки условий формирования урожая и прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по Томской области.

Программа предназначена для автоматизации процесса занесения в файлы zzb.dat, zzbo.dat, zzb1.dat , просмотра и редактирования

среднесуточной температуры воздуха, продолжительности солнечного сияния, суммы осадков, среднего дефицита влажности воздуха, запасов продуктивной влаги в мм в слое почвы (программа Зернобоб\_Томск.exe, файл конфигурации conf.zzb). Эти файлы являются исходными наборами данных для расчета прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по Томской области.

Выборка среднесуточной температуры (°С), продолжительности солнечного сияния (час)\*, суммы осадков (мм), среднего дефицита (гПа), запасов продуктивной влаги в мм в слое почвы: 0-10 см, 0-20 см, 0-50 см, 0-100см производится из электронных таблиц ТСХ-1 по 7-ми станциям Томской области.

Технология автоматизированной подготовки агрометеорологической таблицы ТСХ-1 позволяет в сетевых наблюдательных организациях ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», привлеченных к производству агрометеорологических наблюдений, заносить метеорологические и агрометеорологические данные наблюдений в электронную форму ТСХ-1.

Передача электронной таблицы ТСХ-1 в отдел агрометеорологии Томского ЦГМС осуществляется ежедекадно по компьютерной "Системе сбора оперативной гидрометеорологической информации с наблюдательной сети" через Интернет, действующей в ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». Компьютерные таблицы ТСХ-1 используются для последующей выборки данных.

#### 4 Природные условия Кемеровской области

Кемеровская область расположена в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины в основном в пределах бассейна р. Томи. Её площадь составляет 95,5 тыс. км<sup>2</sup>, протяжённость по меридиану 500 км (рисунок 13).

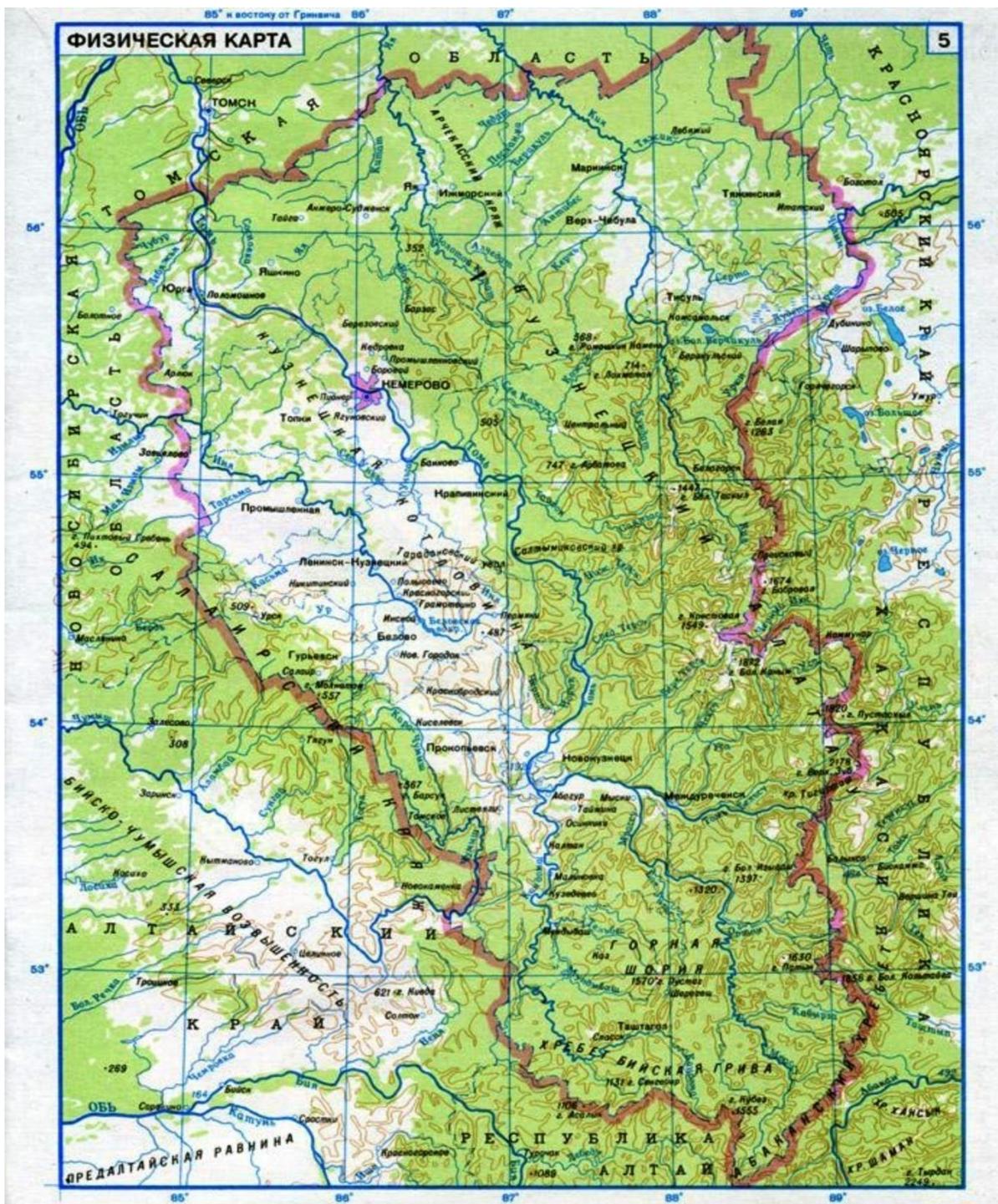


Рисунок 13 – Физико-географическая карта Кемеровской области

Рельеф области отличается большим разнообразием: на западе протянулся Салаирский кряж, на востоке – Кузнецкий Алатау, между ним расположена Кузнецкая котловина, которая на севере сливается с Западно-Сибирской равниной. На юге Салаирский кряж и Кузнецкий Алатау, сближаясь, соединяются с Алтайскими горами. Этот район называется Горной Шорией [17].

Салаирский кряж входит в пределы области своим восточным склоном и представляет собой приподнятую возвышенность (400 – 470 м), лишь отдельные высоты достигают 600 м. возвышенность имеет вид волнистых гряд со слабовыраженными вершинами и широкими долинами. Северо-восточный склон её круто, в виде отчётливо выраженных уступов высотой 100 – 150 м, поднимается над Кузнецкой котловиной.

Кузнецкий Алатау состоит из сложной системы горных массивов и коротких кряжей с плоскими, относительно ровными вершинами. Кряжи расположены в самых разнообразных направлениях и расчленены густой сетью притоков рек Томи и Кии и глубокими, нередко скалистыми ущельями. Отдельные высоты достигают 2000 м.

Кузнецкая котловина в пределах области имеет вид неправильного прямоугольника, вытянутого с севера-запада на юго-восток. Её длина превышает 350 км, а ширина достигает 100 – 120 км. Общая площадь котловины около 30 тыс. км<sup>2</sup>. Она представляет собой волнистую равнину, расчленённую густой сетью широких пологосклонных долин и балок, в центральной части которой протекает р. Томь. Высоты в северной части котловины составляют 100 – 200 м, на юге они возрастают до 400 – 500 м. Равнинный рельеф котловины нарушается лишь в её центральной части рядом невысоких горных кряжей. Кузнецкая котловины получила название Кузнецкого угольного бассейна, так как большая часть её территории сложена угленосными породами.

Почвенный покров горной территории области довольно однообразный. В лесном поясе преобладают глубокоподзолистые почвы

черневой тайги. Ниже лесного пояса вдоль восточной окраины Салаирского кряжа, в полосе, переходной к Кузнецкой котловине, почвы более разнообразны. Наряду со слабоподзолистыми почвами здесь встречаются серые лесные и оподзолистые чёрноземы, местами непосредственно, почти без переходов смыкающиеся с глубокоподзолистыми почвами тайги [17]. На сниженных высотах Кузнецкого Алатау формируются горно-лесные глубокоподзолистые почвы. В высокогорном поясе встречаются небольшие участки горно-тундровых и несколько чаще – горно-луговых почв. Крутые склоны почти совершенно лишены почвенного покрова.

В пределах равнинной части Кузнецкой котловины развиваются зональные типы почвенного покрова. Для центральной части котловины характерно преобладание выщелоченных и оподзоленных суглинистых чернозёмов. Наряду с ними встречаются оподзоленные, преимущественно тёмноцветные богатые гумусом темно-серые почвы лесостепи. В понижениях рельефа, по долинам рек и днищам балок, развиваются солончаковые торфянистые и карбонатные лугово-болотные почвы. На более сухих участках долин формируются ясно выраженные столбчатые солонцы. Засоленные почвы характерны для лугов и долин, лежащих между рекой Инёй и Салаирским кряжем. В других местах котловины засоленные почвы не развиты.

На Предсалаирской равнине под остепнёнными лугами развиты выщелоченные среднеспособные чернозёмы, а также оподзоленные преимущественно тяжелосуглинистого механического состава. Значительные массивы под берёзовыми травянистыми лесами и вырубками заняты тёмно-серыми и серыми лесными почвами.

В пределах Мариинской лесостепи на водораздельными пространствах и верхних террасах крупных реках под пологом берёзовых и сосново-берёзовых травянистых лесов развиваются серые лесные почвы развиваются в сочетании с выщелоченными чернозёмами. Террасы рек заняты

выщелоченными чернозёмами. По нижним надпойменным террасам развиты лугово-черноземные и луговые почвы.

Салаирский кряж находится полностью в пределах лесного пояса. Степная растительность подходит к его подножью только на примыкающих участках Кузнецкой котловине. В Кузнецкой Алатау фрагментарно выражен высокогорный пояс; по восточному склону разряженными участками встречается степная растительность, но основная площадь этого склона также покрыта лесами. Леса горной части области характеризуются широким развитием формации черневой тайги. Общий ландшафт Кузнецкой котловины – лесостепной. Наиболее остепненная её часть находится в присалаирской части бассейна р. Ини. К периферии котловины начинает проявляться влияние вертикальной поясности, и облесённость увеличивается.

Естественный растительный покров Предсалаирской равнины и Мариинской лесостепи представлен луговыми степями, чередующимися с участками берёзовых лесов.

Климат области резко континентальный. Определяется он сложным взаимодействием циркуляционных факторов и характером подстилающей поверхности. Отличительные черты климата – жаркое и короткое лето, холодная и многоснежная зима с умеренными, редко сильными ветрами и метелями, переходные периоды непродолжительны [17].

Средняя температура воздуха самого тёплого месяца (июля) 16,0 – 18,5°, в отдельные годы температура может существенно отличаться от средней. Абсолютный максимум температуры воздуха достигает 35 – 37°, а в предгорьях Салаирского кряжа и Кузнецкого Алатау 38 – 39°. Самым холодным месяцем является январь. Средняя температура воздуха в январе составляет – 17,5 – 19,5°

Абсолютный максимум температуры воздуха опускается до минус 45, минус 48° в Горной Шории и до минус 50, минус 57° в предгорьях Кузнецкого Алатау. Средняя годовая амплитуда температуры воздуха (разница между средней температурой самого холодного и самого тёплого

месяцев) равна 34 – 38°. Абсолютная амплитуда температура (разница между абсолютным максимумом и абсолютным минимумом температуры) достигает 80 – 85°, а в предгорьях Салаирского кряжа и Кузнецкого Алатау 90 – 95°. Тёплый период (с температурой выше 0°) начинается со второй декады апреля и длится до второй декады октября, в среднем продолжительность его составляет 175 – 195 дней.

Осадки на рассматриваемой территории в связи с большим разнообразием рельефа распределяются крайне неравномерно и колеблются за год в больших пределах: от 400 до 900 мм. В Кузнецкой котловине количество осадков увеличивается по мере приближения к горам Кузнецкого Алатау. На западных его склонах, а также в Горной Шории выпадает наибольшая годовая сумма осадков – до 1000 – 1400 мм, т.е. на западных склонах Салаирского кряжа и Кузнецкого Алатау в местах, наиболее открытых для влажных ветров, осадков выпадает в среднем на 80 – 100 % больше, а на восточных подветренных – на 20 – 25 % меньше, чем на равнине.

В годовом ходе осадков наименьшее количество их наблюдается в феврале и марте и не превышает 10 – 20 мм, на отдельных станциях, расположенных на западных и юго-западных склонах Кузнецкого Алатау, количество осадков составляет 33 – 37 мм. В месяц максимума осадков (июль – август) их выпадает 70 – 90 мм, а на отдельных возвышенных местах Кузнецкого Алатау 100 – 150 мм.

В отдельные годы, в зависимости от условий атмосферной циркуляции, как минимум, так и максимум могут быть сдвинуты на другие месяцы, месячные количества осадков также могут значительно отклоняться от многолетнего среднего значения. Среднее количество осадков за май – сентябрь составляет 250 – 350 мм, на западных склонах Кузнецкого Алатау увеличивается до 350 – 450 мм, а на отдельных станциях – до 600 мм.

В Кемеровской области наблюдается неравномерность в количестве выпадения осадков. По главному хребту и западным склонам Кузнецкого Алатау атмосферных осадков выпадает за год больше 1000 мм. Это один из самых увлажненных районов Сибири. В южной лесостепи осадков выпадает около 350 мм, а на восточных склонах Кузнецкого Алатау и того меньше. Среднегодовое количество осадков на Кузнецкой котловине составляет 400-450 мм (рисунок 14).

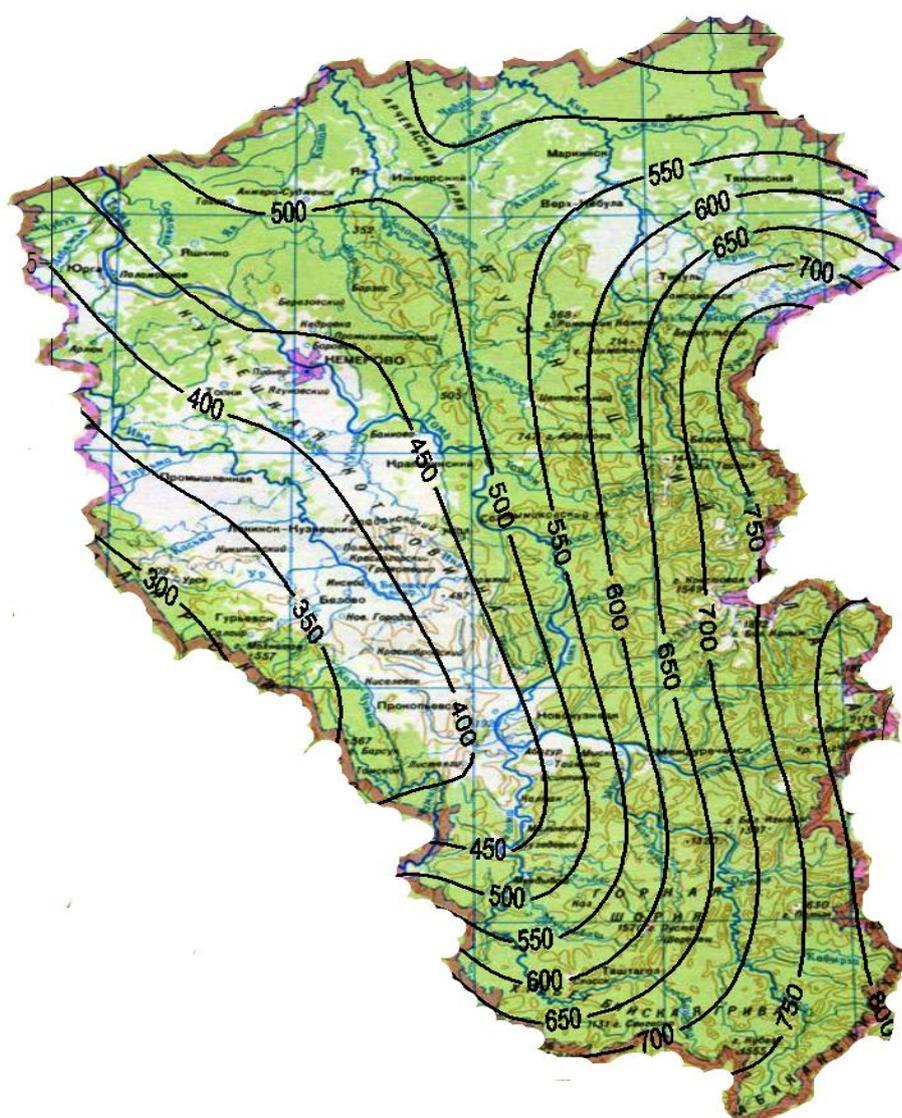


Рисунок 14 – Среднемноголетние годовые осадки на территории Кемеровской области, мм

## **5 Методы прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области с использованием наземной информации**

Яровая пшеница на исследуемой территории является основной зерновой культурой. В длительный период от всходов до восковой спелости формируются цветки, зачаточный колос, зерно, идет интенсивный прирост растительной массы. В этот период темп развития пшеницы тесно связаны с температурным режимом и условиями увлажнения. Известно, что решающими факторами формирования урожайности яровой пшеницы во всех природных зонах Кемеровской области является достаточная тепло- и влагообеспеченность вегетационного периода.

Эти факторы роста и развития в большинстве лет на территории области находятся не в сбалансированном виде. Редко бывают годы, когда наблюдается избыток влаги и недостаток тепла. Чаще всего на основной земледельческой части возделывания яровой пшеницы в области наблюдаются годы с достаточным количеством тепла и недостаточным количеством влаги. Следовательно, основным фактором, лимитирующим продуктивность яровой пшеницы в области, является влага.

По территории Кемеровской области проанализированы данные урожайности яровой пшеницы с 1971 по 2017 годы (таблица 13). Из таблицы 13 видно, что характеристики урожайности по территории и по годам заметно меняются. Самые низкие средние величины урожайности отмечены в Ижморском районе (11,7 ц/га) и Яшкинском районе (12,9 ц/га), наибольшие – в Промышленном районе (16,6 ц/га), Чебулинском и Ленинск-Кузнецком районах (16,2 и 16,1 ц/га соответственно). Большая изменчивость урожайности по годам отмечается в Прокопьевском районе (38 %), Топкинском и Ленинск-Кузнецком районах (32 %). Относительно устойчивая динамика урожайности в Тяжинском районе (20 %) и Тисульском районе (24 %). По условиям увлажнения большая часть посевных площадей яровой пшеницы расположены в зонах неустойчивого увлажнения. Вследствие часто

повторяющихся засушливых явлений урожайность яровой пшеницы сильно колеблется по годам из-за недостаточной влагообеспеченности посевов. Так, 2012 год был аномально сухим практически во всех районах Кемеровской области. На этот же год приходится минимальная урожайность.

Таблица 13 - Характеристики урожайности (ц/га) яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области (1971-2017 годы)

Район	Мариинский	Тяжинский	Тисульский	Яшкинский	Яйский	Ижморский	Чебулинский	Юргинский	Топкинский
Среднее	14,1	14,2	14,0	12,9	13,1	11,7	16,2	13,6	14,8
Максимум (год)	23,2 (2007)	19,1 (1992)	20,4 (2003)	21,6 (1987)	21,8 (2004)	18,7 (1992)	26,2 (2003)	22,2 (1987)	23,7 (2009)
Минимум (год)	6,8 (1979)	7,9 (1974)	8,0 (1975)	5,7 (2012)	6,1 (1977)	3,7 (2012)	8,3 (2012)	4,1 (2012)	5,0 (2012)
Коэффициент вариации, %	28	20	24	26	29	27	27	30	32

Продолжение таблицы 13

Район	Кемеровский	Крапивинский	Промышленный	Л-Кузнецкий	Гурьевский	Беловский	Прокопьевский	Новокузнецкий
Среднее	15,7	13,9	16,6	16,1	15,3	13,1	13,1	14,0
Максимум (год)	23,6 (1987)	21,0 (1987)	24,9 (1987)	26,9 (1987)	23,0 (2017)	21,6 (1987)	23,1 (1987)	23,7 (1987)
Минимум (год)	6,2 (2012)	4,4 (1981)	5,3 (2012)	4,7 (2012)	7,4 (2012)	4,3 (1981)	4,4 (1981)	4,1 (1976)
Коэффициент вариации, %	28	26	26	32	23	31	38	30



Как известно у каждой сельскохозяйственной культуры свои требования к условиям среды, причем эти требования не остаются постоянными на протяжении всего вегетационного цикла, а меняются в зависимости от фаз развития. Нами исследовалось влияние температуры воздуха, осадков, дефицита влажности воздуха на урожайность яровой пшеницы в административных районах Кемеровской области. Широко использованы комплексные показатели тепло- и влагообеспеченности: ГТК Селянинова, коэффициенты увлажнения Чиркова и т.д. [19-25].

Проведенные нами исследования показали, что влияние температуры и осадков в течение вегетационного периода на урожайность яровой пшеницы проявляется во всех районах Кемеровской области. Однако, корреляционный анализ урожайности яровой пшеницы с указанными показателями погодных условий показал, что достаточно высокая связь получена с осадками весенне-летнего периода и менее тесные обратные связи получены между урожайностью и температурой воздуха. Как известно, значение осадков, характеризующих условия увлажнения яровой пшеницы, весьма велико. Максимальный коэффициент корреляции между осадками и урожайностью получен за период с апреля по вторую декаду июля.

Существенное влияние на формирование урожайности на данной территории оказывает влагообеспеченность растений. Одним из определяющих факторов будущей урожайности являются осадки. Наиболее значимы осадки с мая по июнь, когда у яровой пшеницы происходит рост стебля, дифференциация стеблевых узлов, интенсивный прирост растительной массы, закладка колоса, элементов цветка, что предопределяет число зерен в колосе, а также создаются условия для формирования повышенной массы 1000 зерен. В тоже время для данного периода характерно длительное бездождье, сопровождающееся суховейными явлениями, что может нарушить нормальное прохождение у растений важных для формирования урожая процессов развития.

При сложившихся засушливых условиях весенне-летнего периода немаловажное значение имеют зимние осадки, являющиеся комплексным показателем потенциальных возможностей увлажнения почвы весной. Влияние зимних осадков отмечается в некоторых районах Кемеровской области.

В начальных фазах развития яровой пшеницы по исследуемым районам Кемеровской области урожайность не лимитируется термическими условиями. Здесь связь практически отсутствует. Значения же увлажнения с самого начала вегетации существенны, о чем свидетельствуют коэффициенты корреляции между урожайностью, с одной стороны и суммами осадков за периоды всходы – колошение. Значение температуры воздуха возрастает с фазы выход в трубку при сохранении достаточного весомого значения условий увлажнения.

Вегетационный период яровой пшеницы в Кемеровской области ограничен маем, июнем и июлем, в августе завершается налив и созревание зерна, а в сентябре проводится массовая уборка пшеницы. В качестве основных агрометеорологических факторов, определяющих условия вегетации и формирование урожая, мы использовали гидротермический коэффициент с мая по вторую декаду июля, учитывающий осадки и температуру воздуха. Как показали проведенные нами исследования при сопоставлении этих факторов с урожайностью оказалось, что в основном неблагоприятные агрометеорологические условия, резко снижающие урожайность пшеницы, складываются при низких значениях ГТК за май – июнь, т.е. при возникновении засушливых явлений. В годы, когда за май – июнь ГТК равен 0.8 и выше, влагообеспеченность бывает достаточной, урожайность пшеницы, как правило, выше линии тренда.

Важным является период второй декады июля, когда у пшеницы наступает колошение. Недостаточная влагообеспеченность и повышенный температурный режим в этот период могут привести к значительному снижению урожая. Большую информативность имеют комплексные

показатели, которые отражают как термический режим, так и условия увлажнения.

Нами проведена большая работа по нахождению связей между урожайностью яровой пшеницы и рядом агрометеорологических факторов. В результате было получено более 100 коэффициентов парной корреляции, которые дали возможность наглядно представить в количественном выражении влияние каждого агрометеорологического фактора на урожайность яровой пшеницы.

Наиболее значимые показатели были включены в физико-статистические модели для расчета урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области, таблица 2. Разработка методов выполнялась с ориентацией на принятые в Росгидромете оперативные сроки составления прогноза урожайности яровой пшеницы - предварительного (21-23 июня) и уточненного (21-23 июля) и соответствующие критерии оправдываемости.

В Приложении А представлены программы расчета прогнозов урожайности и валового сбора яровой пшеницы в электронном виде для персонального компьютера, а в Приложении Б - технология расчета прогнозов урожайности и валового сбора яровой пшеницы на персональном компьютере.

### **5.1 Результаты авторских испытаний**

Оценка успешности методов прогноза урожайности яровой пшеницы проводилась согласно “Методическим указаниям по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов” РД 52.27.284-91 [11].

Заключение о качестве метода проводилось на материалах трехлетней независимой выборки на основе двух критериев оправдываемости метода и его ошибки.

Критерием оправдываемости прогнозов при заблаговременности два месяца и меньше служит допустимая погрешность, равная  $0,67\Delta\sigma$ , при заблаговременности прогноза более двух месяцев  $0,8 \Delta\sigma$ , - где  $\Delta\sigma$  - среднеквадратическое отклонение прогнозируемого элемента. Причем  $\Delta\sigma$  рассчитывается по данным фактической урожайности за последние 15 лет, включая год прогноза.

В качестве погрешности прогноза принимается величина – относительная ошибка:

$$\varepsilon = \frac{\Delta Y}{Y_{ф. ср.}} 100 \%,$$

где  $\Delta Y$  – абсолютная ошибка ( $\Delta Y = Y_{ф} - Y_{п}$ ),  $Y_{ф}$  – фактическая урожайность,  $Y_{п}$  – прогностическая урожайность,  $\bar{Y}_{ф. ср.}$  – среднее арифметическое значение фактической урожайности за последние пять лет.

Заключение о целесообразности использования метода производится на основании итогов сравнения успешности прогнозов, составленных по новому методу с инерционным и климатологическим. Сравнительная оценка успешности испытываемого метода прогноза урожайности яровой пшеницы по районам Кемеровской области в оба срока составления (21-23 июня и 21-23 июля) на основании РД и согласно утвержденной программы испытаний проводилась с инерционными и климатологическими прогнозами, поскольку в настоящее время в оперативной практике отдела расчетный метод прогноза районной урожайности яровой пшеницы отсутствует.

За период авторских испытаний (2015-2017 годы) было проверено по 2 физико-статистические модели на два срока: 21-23 июня и 21-23 июля.

Средняя оправдываемость методического прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области (по величине относительной ошибки) на срок 21-23 июня и 21-23 июля составила около и выше 90 %, что значительно выше порога успешности

агрометеорологических прогнозов. Средняя оправдываемость инерционного и климатологического прогнозов значительно ниже методических и в некоторые годы достигают 70,0 % (таблица 14).

Оценка оправдываемости составленных прогнозов по новому методу по величине допустимой погрешности ( $\Delta\sigma$ ) позволила выявить число оправдавшихся методических, инерционных и климатологических прогнозов. По 16 административным районам все методические прогнозы оправдались. Оправдываемость метода составила 100 %, что на 17-67 % выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов. Не оправдался только один прогноз по Яшкинскому району в 2017 году, урожайность яровой пшеницы составила 20,4 ц/га - максимальная за все периоды наблюдений.

К достоинствам нового метода следует отнести то, что он позволяет прогнозировать урожайность яровой пшеницы в амбарном весе. Кроме того, для выполнения расчетов была создана и запущена полностью автоматизированная технология составления прогнозов и расчетов оценок, включая выборку данных из базы данных АСОАМИ и электронной версии ТСХ-1 в Кемеровском ЦГМС.

Таблица 14 - Средняя оправдываемость прогнозов за 2015-2017 годы по административным районам Кемеровской области (по величине относительной ошибки)

Район	Заблаговременность	№ модели	Методические	Инерционные	Климатологические
Мариинский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	97,6	90,0	74,3
		2	96,5	90,0	74,3
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	95,0	90,0	74,3
		4	95,8	90,0	74,3
Тяжинский	предварительный прогноз,	1	94,2	85,6	83,3

	21-23 июня	2	96,4	85,6	83,3
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	94,7	85,6	83,3
		4	94,6	85,6	83,3
Тисульский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	92,2	84,2	88,3
		2	90,3	84,2	88,3
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	89,6	84,2	88,3
		4	91,5	84,2	88,3
Яшкинский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	86,3	74,3	63,5
		2	87,8	74,3	63,5
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	88,7	74,3	63,5
		4	90,0	74,3	63,5
Яйский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	91,3	91,2	81,3
		2	89,1	91,2	81,3
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	85,6	91,2	81,3
		4	88,4	91,2	81,3
Ижморский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	91,3	81,0	66,6
		2	90,7	81,0	66,6
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	91,3	81,0	66,6
		4	87,7	81,0	66,6
Чебулинский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	94,0	83,0	59,9
		2	83,7	83,0	59,9
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	92,7	83,0	59,9
		4	82,8	83,0	59,9
Юргинский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	90,4	90,4	81,2
		2	91,6	90,4	81,2
	уточненный прогноз, 21-2 июля	3	92,9	90,4	81,2
		4	93,3	90,4	81,2
Топкинский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	95,6	95,0	83,9
		2	96,0	95,0	83,9
	уточненный прогноз, 21-2 июля	3	91,9	95,0	83,9
		4	92,7	95,0	83,9
Кемеровский	предварительный прогноз,	1	91,8	91,9	82,1

	21-23 июня	2	88,3	91,9	82,1
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	91,7	91,9	82,1
		4	91,4	91,9	82,1
Крапивинский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	95,4	92,9	92,4
		2	94,5	92,9	92,4
	уточненный прогноз, 21-2 июля	3	97,6	92,9	92,4
		4	97,4	92,9	92,4
Промышленный	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	89,8	79,9	76,4
		2	90,2	79,9	76,4
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	88,4	79,9	76,4
		4	87,4	79,9	76,4
Ленинск-Кузнецкий	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	83,0	72,9	76,8
		2	86,0	72,9	76,8
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	84,9	72,9	76,8
		4	81,0	72,9	76,8
Гурьевский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	84,5	67,7	73,5
		2	86,1	67,7	73,5
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	83,9	67,7	73,5
		4	85,7	67,7	73,5
Беловский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	86,3	69,3	81,2
		2	86,1	69,3	81,2
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	88,9	69,3	81,2
		4	86,4	69,3	81,2
Прокопьевский	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	88,2	86,2	80,1
		2	90,6	86,2	80,1
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	92,3	86,2	80,1
		4	91,0	86,2	80,1
Новокузнецкий	предварительный прогноз, 21-23 июня	1	90,4	83,6	87,3
		2	94,2	83,6	87,3
	уточненный прогноз, 21-23 июля	3	90,6	83,6	87,3
		4	90,6	83,6	87,3

Таким образом, представленные модели за период авторских испытаний обеспечены хорошими результатами. Оправдываемость методических прогнозов выше оправдываемости климатологических и инерционных прогнозов, а средние ошибки методических прогнозов ниже ошибок инерционных и климатологических прогнозов.

На основании этого можно сделать заключение, что разработанный нами метод прогноза урожайности яровой пшеницы имеет явные преимущества и может быть рекомендован для производственного испытания в прогностическом подразделении ФГБУ «Кемеровский ЦГМС» ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС».

## **6 Методы прогнозирования урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области с использованием наземной и спутниковой информации**

В работе разработаны модели прогноза урожайности яровой пшеницы для административных районов Кемеровской области. Сложная орография, резко континентальный климат, относительно малые пространственные и временные масштабы погодных явлений в конечном итоге влияют на точность прогностических моделей, использующих только стандартные приземные метеоданные. Дополнительная информация в виде данных дистанционного зондирования атмосферы в статистических моделях прогноза урожайности для регионов Сибири улучшает качество прогнозов [22].

Прогноз, предоставленный администрациям районов в оперативные сроки, принятые в Росгидромете, предварительный (21-23 июня) и уточнённый (21-23 июля) помогает уменьшить экономические потери, связанные с рисками природного характера.

В [23] дается краткий обзор теоретических и прикладных разработок этого направления, проводимых в Институте космических исследований РАН. Методом поиска аналогов временного хода вегетационных индексов разработаны автоматизированные мониторинг и анализ состояния посевов в любом регионе России, оперативная и объективная оценка последствий воздействия на посевы различных факторов. В работе описана технология построения для любого административного района карт отклонений вегетационного индекса от среднемноголетних значений. Графики временной изменчивости значений индекса можно строить в указанных точках земной поверхности. Мониторинг состояния посевов даётся для субъектов РФ.

В [24] вегетационный индекс используется вместе со стандартными данными агрометеорологических наблюдений для построения регрессионных моделей и делается ежедекадный расчет урожайности озимых культур по

территории субъектов Северо-Кавказского, Приволжского и Центрально-Черноземного регионов. По оценке авторов ошибка прогноза не превышала 10 % , что даёт возможность использовать данную технологию в оперативном обеспечении сельского хозяйства УГМС Росгидромета.

В работе [25] авторы заменили в своей динамической модели прогноза урожайности рассчитанную относительную площадь листьев посевов на значения измеренного вегетационного индекса NDVI, получив усовершенствованную модель, с помощью которой сделали следующие выводы: величина NDVI достаточно адекватно отражает ход фотосинтеза всех сельскохозяйственных культур; использование NDVI в блоке расчета фотосинтеза в действующей модели прогнозирования урожайности яровой пшеницы дало положительные результаты; замена теоретической кривой сезонного хода фотосинтеза на измеренные значения вегетационного индекса, привела к повышению оправдываемости в годы с экстремальными условиями. Полученные результаты дают основание утверждать, что вегетационный индекс NDVI может быть использован как во вновь создаваемых динамических моделях прогнозирования урожайности, так и в действующих моделях для их усовершенствования.

В качестве примера использования вегетационного индекса NDVI в ЕС можно привести материалы регулярного бюллетеня [26], издающегося по проекту Европейской комиссии MARS (Monitoring Agricultural ResourceS), в котором регулярно публикуются точные и своевременные прогнозы ожидаемой урожайности сельскохозяйственных культур по территории Союза и других стратегических регионов мира. Технология системы AGRI4CAST, оперативно работающая с 1992 года, в состоянии контролировать весь вегетационный период таких культур как, зерновые, масличные, белковые, сахарной свеклы, картофеля, рис, пастбища, способна реагировать на эффекты краткосрочного метеорологического воздействия. Эффективность системы обеспечивают данные дистанционного

зондирования и метеорологических наблюдений, агрометеорологическое моделирование и статистический анализ.

## 6.1 Описание данных

Появление новых модулей спутникового зондирования поверхности земли с возможностью измерять и обрабатывать различные участки спектра привело к новым показателям вегетационного периода роста растений. К ним относится нормализованный относительный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), показатель количества активной биомассы и самый распространенный среди подобных ему индексов. Он используется в различных работах, связанных с дистанционным зондированием поверхности земли и растительного покрова. Накопленная в Институте космических исследований РАН по всей территории России информация по этому индексу с реальной регулярностью 3-4 раза в неделю и разрешением 250 м архивирована с 2000г., дала начало новому направлению исследований.

Модели включают данные Западно-Сибирского УГМС стандартных наблюдений (осадки, температуру и дефицит насыщения воздуха) и спутниковые данные дистанционного зондирования (вегетационный индекс NDVI). Данные по урожайности взяты из статистических сборников региона. Данные  $NDVI = (nir - red) / (nir + red)$ , где *nir* - отражение в ближней инфракрасной области спектра (диапазон волн 0,7-1,0 мкм), *red* - отражение в красной области спектра (диапазон волн 0,6-0,7 мкм) из архива ИКИ РАН. Спектральные каналы выбирались из условия наименьшего отражения растительности в красном диапазоне спектра и, наоборот, самое высокое отражение по сравнению с другими природными объектами в ближнем ИК-диапазоне спектра. Падение спектральной кривой в красном диапазоне и резкий подъем в ближнем ИК-диапазоне характерно для растительности в хорошем состоянии. Фотосинтез высших растений приводит к максимуму отражения листьями в инфракрасной области и к максимальному

поглощению хлорофиллом солнечной радиации в красной области спектра. Фазы вегетации яровых зерновых культур влияют на величину вегетационного индекса.

При построении моделей прогноза урожайности фазы вегетации определяют выбор агрометеорологических параметров и интервалов их временного суммирования. Параметры регрессионных моделей находились с помощью метода наименьших квадратов, среда программирования MATLAB. Как и в [27] оценка значимости коэффициента корреляции для парных моделей и в многомерном случае проводилась с помощью критерия Стьюдента, выборочное значение  $t_R^*$  которого, рассчитывались по формулам и сравнивались с  $t_{кр}(\alpha; \nu)$  из таблицы, где уровень значимости  $\alpha$  принимался равным 5%, а число степеней свободы  $\nu=N-m-1$ , где  $N=12$  длина выборки,  $m$  число независимых переменных.

При оценке качества полученных моделей проверялось выполнение следующих условий:

1) Близость коэффициента детерминации  $r^2$  к значению 0.70, показывающую какой процент дисперсии исходного ряда урожайности  $y = \{y_1, \dots, y_N\}$  описывает модель.

2) По критерию Стьюдента проверялась значимость коэффициентов регрессии. Критическое значение  $t_{кр}(\alpha, \nu)$  определяется по уровню значимости  $\alpha$  (принималось равным 5%) и числу степеней свободы  $\nu = N-2$ , где  $N$  - длина ряда.

3) Адекватность регрессионной модели исходным данным проверялась с помощью критерия Фишера F.

4) Неравенство  $\sigma_y > \sigma_\varepsilon$ , где  $\sigma_\varepsilon$  - стандартное отклонение ошибок,  $\sigma_y$  - стандартное отклонение исходного ряда. Авторские испытания моделей проводились в соответствии с [9] на двухлетней контрольной выборке. По результатам этих проверок принималось решение о передаче построенных моделей на производственные испытания.

## 6.2 Построение и оценка моделей

При построении моделей для каждого района в качестве независимых параметров подбирались агрометеорологические данные с разными интервалами осреднения, температура (временной интервал I - 20VII, коэффициент корреляции  $r=-0,65$ ) и дефицит насыщения воздуха (временной интервал 21.VI - 20.VII, коэффициент корреляции  $r = -0,75$ ). К ним добавлялись осадки (временной интервал I - 20VII, коэффициент корреляции  $r=0,78$ ) и данные по вегетационному индексу  $ndvi$ .

Коэффициент детерминации однофакторных моделей (приземные данные в качестве независимых признаков) не превышает 0.57, что указывает на недостаточность числа независимых переменных для описания ряда. При этом статистическую значимость или адекватность этих моделей подтверждает величина критерия Фишера  $F \approx 20$ , что больше  $F_{кр} \approx 5$  и его уровень значимости  $0.01 < 0.05$ .

Двухпараметрические модели, в которых в качестве независимых переменных используются осадки и дефицит

$$y = 0.12x_2 - 0.15x_3 + 9.5.$$

улучшают качество модели. При этом статистическую значимость или адекватность построенной модели подтверждает величина критерия Фишера ( $10 = F > F_{кр} = 3.7$ ) и его уровень значимости 0.005 значительно меньше задаваемого при расчете коэффициентов модели 0.05. Но коэффициент детерминации модели равен 0.6, что ниже требуемой границы 0.70 и указывает по-прежнему на недостаточность числа независимых переменных.

Замена независимой переменной осадки на  $ndvi$  улучшает показатели модели для данного района и приближает среднюю относительную ошибку оправдавшихся прогнозов к плановым  $\bar{P} = 5-10$  %. Приведем пример двухпараметрической регрессионной модели (предварительный прогноз 21-

23 июня) зависимости урожайности яровой пшеницы от значений вегетационного индекса NDVI на 23 неделе от начала года и среднесуточного дефицита влажности воздуха за май по Тяжинскому району Кемеровской области (рисунок 16).

В моделях с тремя независимыми переменными (температура, осадки, дефицит) как сами агрометеорологические параметры так и интервалы их осреднения варьировались для разных районов области. Приведем параметры модели трех параметров температуры, дефицита и ndvi

$$y = -0.57x_2 + 0.2x_3 + 19.4x_4 - 9.5.$$

Коэффициент детерминации 0.85 лучше нормы 0.7. Статистическую значимость построенной модели подтверждает величина критерия Фишера ( $21.1 = F > F_{кр} = 4.2$ ) и уровень значимости в рассчитываемой статистике Фишера равен 0.0002. Проверка на двухлетней контрольной выборке (2013, 2014 годы) дает следующий результат

$$|y_i^f - y_i^c| = |8.3 - 7.5| = 0.8 < 0.67\sigma = 0.67 * 3.2 = 2.0$$

$$|y_i^f - y_i^c| = |14.98 - 16.2| = 1.22 < 0.67\sigma = 0.67 * 3.4 = 2.2.$$

Прогноз  $\{y_i^f, x_i\}$  считается оправдавшимся, если его ошибка  $|y_i^f - y_i^c|$  с контрольной выборкой  $\{y_i^c, x_i\}$  меньше  $0,67\sigma$  при заблаговременности не более двух месяцев. Тогда оправдываемость метода  $\gamma$  [7] для двух контрольных годов равна 100 %, а средняя относительная ошибка оправдавшихся прогнозов  $\bar{P} = 6.1$  %.

Включение в модели прогноза урожайности яровой пшеницы спутниковых данных ndvi улучшает качество моделей и среднюю относительную ошибку на контрольной выборке до 5-10 %.

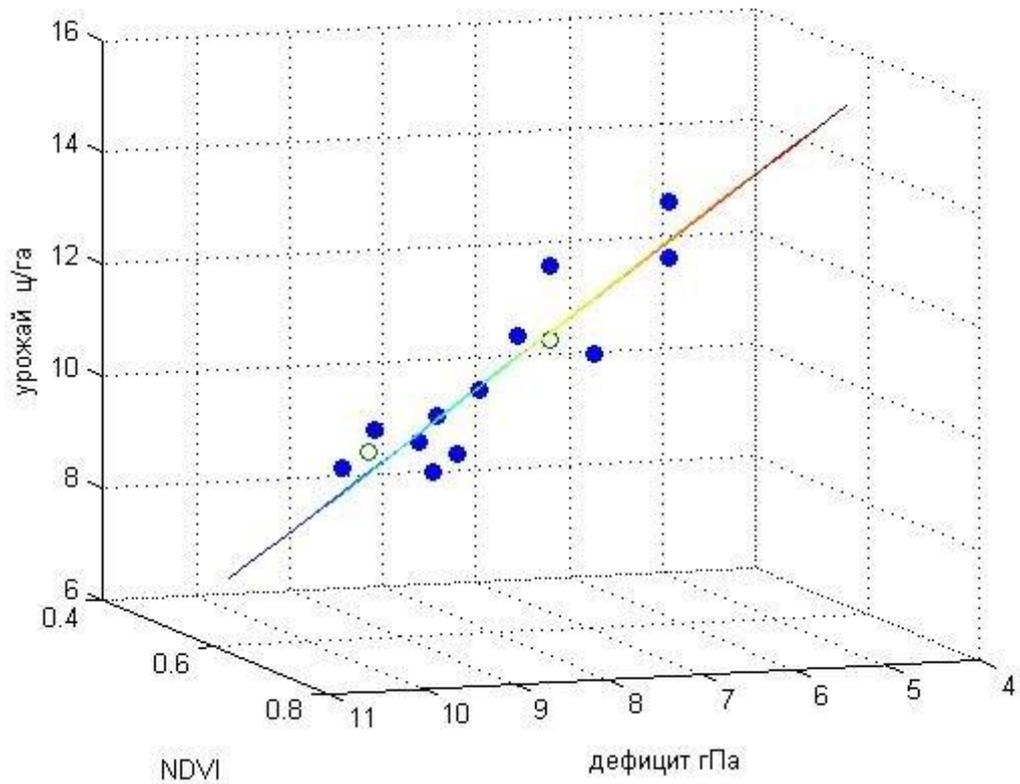


Рисунок 16 - Двухпараметрическая регрессионная модель (предварительный прогноз 1-5 июня) зависимости урожайности зерновых от значений вегетационного индекса NDVI на 23 неделе от начала года и среднесуточного дефицита водяного пара влажного воздуха за май. Окружности и синие шарики соответственно контрольная и обучающая выборки за 2002-2015 годы. Тяжинский район Кемеровской области

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения темы ФГБУ «СибНИГМИ» разработаны автоматизированные технологии оценки условий вегетации и прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по Томской области, кукурузы по Новосибирской области, методы прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области.

Получены удовлетворительные результаты адаптации одной из версий динамико-статистической модели формирования урожая зерновых культур «Погода-Урожай» (ВНИИСХМ, Сиротенко О.Д.) суточного разрешения, с ориентацией на расчет средней урожайности зерновых и зернобобовых культур по территории Томской области и средней урожайности кукурузы на зеленую массу по территории Новосибирской области по всем категориям хозяйств.

Для модельного расчета комплексной количественной оценки агрометеорологических условий формирования урожая за определенный отрезок периода вегетации, относительно эталонных условий за аналогичный период приняты условия прошлого года. Оценка условий формирования урожая относительно условий прошлого года на качественном уровне, наряду со средними многолетними условиями, является наиболее часто применяемой в практической агрометеорологии. Применение в качестве эталонных условия прошлого года, кроме простоты восприятия потребителем, привлекательно с точки зрения технологии подготовки данных и выполнения расчетов. Рабочие наборы данных за весь период вегетации прошедшего года в следующем году пошагово (ежесуточно) замещаются данными текущего. Технологически при необходимости представляется возможным заменить эталон «прошлый год» на любой другой год, например, на «экстремально сухой» или «экстремально влажный». Обеспеченность расчетов урожайности с ошибкой, не превышающей  $0,67 \sigma_y$  (1,6 ц/га), за 1991-2015 годы составила 88,0 %, за 2001-2015 годы - 93,3 %.

Результаты адаптации модели «Погода-Урожай» для кукурузы по Новосибирской области позволяют сделать заключение о возможности ее применения для практических целей. Адаптированную таким образом модель, предполагается применять в качестве средства расчета количественной оценки комплекса условий формирования урожая культуры на заданный момент вегетационного периода в сравнении с выбранным эталоном и ожидаемой урожайности зелёной массы кукурузы.

За годы авторской оценки прогноза урожайности зеленой массы кукурузы 2015-2017 годы по допустимому отклонению модельных величин от фактических, оправдались все прогнозы – оправдываемость метода 100 %. Погодные условия периода уборочных работ нередко вносят существенный вклад в конечный результат. В этой связи, для учёта потерь урожая в годы со сложными условиями уборки для данной культуры, предложена поправка в виде средней из абсолютных ошибок расчетных величин урожайности по фактическим данным за полный период вегетации.

По результатам авторских испытаний и достигнутой степени автоматизации расчетов, представляется возможным предложить для оперативных испытаний следующие методы и технологии агрометеорологических расчетов:

- метод и технологию расчета количественной оценки комплекса сложившихся агрометеорологических условий формирования урожая зерновых и зернобобовых культур по Томской области на конец каждой декады вегетационного периода, относительно условий прошлого года (при необходимости возможен расчет на любой день вегетационного периода от всходов до уборки);
- метод и технологию прогноза средней урожайности зерновых и зернобобовых культур по всем категориям хозяйств Томской области с учетом долгосрочного прогноза погоды и автоматически вводимых поправок на возможные аномальные условия уборки.

- метод и технологию расчета количественной оценки комплекса сложившихся агрометеорологических условий формирования урожая зеленой массы кукурузы на конец каждой декады вегетационного периода, относительно условий прошлого года по Новосибирской области;
- метод и технологию прогноза средней урожайности зеленой массы кукурузы по всем категориям хозяйств Новосибирской области с учетом долгосрочного прогноза погоды и автоматически вводимых поправок на возможные аномальные условия уборки.

Работа включает также создание технологической линии информационного обеспечения расчетов оценок и прогнозов для заданных культур на персональном компьютере в режиме реального времени с использованием данных агрометеорологических наблюдений, поступающих по каналам связи в системе "ГИС МЕТЕО" и электронной версии таблиц ТСХ-1.

Технология автоматизированной подготовки агрометеорологической таблицы ТСХ-1 позволяет в сетевых наблюдательных организациях ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», привлеченных к производству агрометеорологических наблюдений, заносить метеорологические и агрометеорологические данные наблюдений в электронную форму ТСХ-1.

Передача электронной таблицы ТСХ-1 в отдел агрометеорологии Томского ЦГМС и Новосибирского ГМЦ осуществляется ежедекадно по компьютерной "Системе сбора оперативной гидрометеорологической информации с наблюдательной сети" через Интернет, действующей в ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». Компьютерные таблицы ТСХ-1 используются для последующей выборки данных.

Для административных районов Кемеровской области разработана современная технология, позволяющая заблаговременно прогнозировать урожайность и валовой сбор яровой пшеницы.

Средняя оправдываемость методического прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области (по

величине относительной ошибки) на срок 21-23 июня и 21-23 июля составила около и выше 90 %, что значительно выше порога успешности агрометеорологических прогнозов. Средняя оправдываемость инерционного и климатологического прогнозов значительно ниже методических и в некоторые годы достигают 70,0 % .

Оценка оправдываемости составленных прогнозов по новому методу по величине допустимой погрешности ( $\Delta\sigma$ ) позволила выявить число оправдавшихся методических, инерционных и климатологических прогнозов. По 16 административным районам все методические прогнозы оправдались. Оправдываемость метода составила 100 %, что на 17-67 % выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов. Не оправдался только один прогноз по Яшкинскому району в 2017 году, урожайность яровой пшеницы составила 20,4 ц/га - максимальная за все периоды наблюдений.

К достоинствам нового метода следует отнести то, что он позволяет прогнозировать урожайность яровой пшеницы в амбарном весе. Кроме того, для выполнения расчетов была создана и запущена полностью автоматизированная технология составления прогнозов и расчетов оценок, включая выборку данных из базы данных АСОАМИ и электронной версии ТСХ-1 в Кемеровском ЦГМС.

Для прогноза урожайности яровой пшеницы в Кемеровской области разработана еще одна группа моделей, в параметры которых помимо традиционных метеорологических данных, включается вегетационный индекс NDVI ((Normalized Difference Vegetation Index) - нормализованный относительный индекс растительности, показатель количества активной биомассы и самый распространенный среди подобных ему индексов, получаемый дистанционным зондированием поверхности земли и растительного покрова. Включение в линейную регрессионную модель данных дистанционного зондирования, а именно, вегетационного индекса

NDVI приводит к повышению качества модели. Результаты авторских испытаний моделей показали их практическую применимость.

Таким образом, новые модели и технологии с применением персональных компьютеров обеспечивают повышение точности, устойчивости и оперативности получения результатов прогноза; способствуют улучшению качества обслуживания агрометеорологической информацией и повышению эффективности агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства субъектов Сибирского федерального округа.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Набока В.В. О развитии в ГУ «СибНИГМИ» прикладного динамико-статистического моделирования для агрометеорологического обеспечения земледелия Урало-Сибирского региона //Труды СибНИГМИ.-2010.- Вып.106. - С.112-129.

2 Набока В.В., И.Г. Ковригина И.Г. Методы оценки условий формирования урожая и прогноза средней урожайности яровой пшеницы по территории Томской, Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края и результаты их оперативных испытаний // Информационный сборник №38.- 2011.- С.115-130.

3 Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем.- Л.:Гидрометеиздат,1981. -167с.

4 Сиротенко О.Д., Абашина Е.В. Об использовании динамических моделей для оценки агрометеорологических условий формирования Урожаев // Метеорология и гидрология.-1982.- №8.- С.95-101.

5 Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н. Динамическая модель ПОГОДА-УРОЖАЙ для яровых зерновых культур и ее использование при оценке агрометеорологических условий формирования урожаев в аридной зоне // Труды ВНИИСХМ. – 1985. - Вып.10. - С. 43-61.

6 Решение участников Международной научно-практической конференции «Агрометеорологическое обеспечение устойчивого развития сельского хозяйства в условиях глобального изменения климата». (ГУ «ВНИИСХМ», Росгидромет, г. Обнинск, 9-13 октября 2006 г.) // Труды ВНИИСХМ.- 2006.- Вып.36.- С437-440.

7 Растениеводство / Н.А. Майсурян, В.Н. Степанов, В.С. Кузнецов и др. - М.:Колос,1971.- С.165-173.

8 Агрометеорологический ежегодник. Вып.20.- Новосибирск, 1972-2013.

9 Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов

гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. РД 52.27.284-91.- М.:Гидрометеоиздат,1991.- С.98-107.

10 Чирков Ю.И. Агрометеорологические условия и продуктивность кукурузы.- Л.:Гидрометеоиздат,1969.- 250 с.

11 Беляева А.А.Продуктивность кукурузы на зерно в зависимости от накопления сухого вещества листостебельной массой и початками // Молодые ученые Саратова – Агропромышленному комплексу Поволжья: Сборник научных работ.- Саратов: Изд-во СГСХА, 1997.- С.197-204.

12 Стрижова Ф.М., Царёва Л.Е., Титов Ю.Н. Растениеводство: Учебное пособие.- Барнаул: Изд-во Алтайского АГАУ, 2008. - С.168-179.

13 Найдина Т.А. Динамико-статистические методы прогноза урожайности кукурузы по субъектам Поволжского и Центрального федеральных округов // Труды ВНИИСХМ.- 2013.- Вып.38.- С.321-345.

14 Тооминг Х.Г.Солнечная радиация и формирование урожая.- Л.:Гидрометеоиздат,1977.-199 с.

15 Тооминг Х.Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов.- Л.:Гидрометеоиздат,1984.- 263 с.

16 Динамика поглощения элементов питания современными гибридами кукурузы / Р.Р. Бендер, Д.В. Хаегеле, М.Л. Руффо и др. // Агрономический Журнал.- 2013.- № 1, 2 .- Урбана: Изд-во университета штата Иллинойс, США (Перевод с английского и адаптация: Носов В.В.).

17 Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР. Азиатская часть.- М.: Мысль, 1978.- 492 с.

18 Схема административных районов Кемеровской области: [Электронный ресурс] : <http://www.SibEstate.ru>.

19 Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928.– Вып. 20. – С.169-178.

20 Уланова Е.С. Методы агрометеорологических прогнозов.- Л.- Гидрометеоиздат, 1959. - 280 с.

21 Костюков В.В., Костюкова Н.И., Старостина Т.В. Динамика урожайности яровой пшеницы на территории юго-востока Западной Сибири во второй половине XX века // Материалы XXXIII междунар. Конф. IT+SE06, майская сессия. – Украина, Крым, Ялта-Гурзуф, май 2006 г. – С.299-300.

22 Кононенко С.М., Старостина Т.В. Спутниковые данные в прогнозе урожайности пшеницы для административных районов Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018. XIV Междунар. науч. конгр., 23-27 апреля 2018 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в 2 т. Т.1. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018.- С. 94-101.

23 Савин И.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А. Оперативный спутниковый мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур в России // Геоматика.- 2011.- Вып.2.- С.69-76.

24 Клещенко А.Д., Савицкая О.В. Оценка пространственно-временного распределения урожайности зерновых культур и стандартизованного индекса осадков (SPI) по спутниковой и наземной информации Тру-ды ГГО – СПб.: ООО «Д'АРТ», 2014. – Вып. 571. – С. 147 – 161.

25 Клещенко А.Д., Лебедева В.М., Найдина Т.А., Савицкая О.В. Использование спутниковой информации Modis в оперативной агрометеорологии, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. – Т.12. – С. 143 – 154.

26 SPOT Vegetation satellite analysis: MARS Bulletin, 2011.- Vol.19.- No. 22 (Web Version).

27 Кононенко С.М., Старостина Т.В. Совместное использование спутниковой и наземной метеорологической информации для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия,

мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в 2 т. Т.2. –  
Новосибирск: СГУГиТ, 2017.- С. 28-33.