

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Факультет математики и информационных технологий  
Кафедра теоретической кибернетики и прикладной математики

**ПОЛИВАРИАНТНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ AGROTOOL НА  
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ**

Выпускная квалификационная работа  
(магистерская диссертация)

Выполнила:  
магистрант 447М-ИТ группы,  
Немчикова Кристина Алексеевна

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Научный руководитель:  
к.т.н., профессор  
Хворова Любовь Анатольевна

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Допустить к защите:  
Зав. кафедрой, к.т.н., профессор  
Хворова Любовь Анатольевна

\_\_\_\_\_  
(подпись)

«25» мая 2016 г.

Магистерская диссертация защищена:  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Оценка: \_\_\_\_\_

Председатель ГАК:  
Камышников А.И.  
(Ф.И.О.)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Барнаул 2016

## РЕФЕРАТ

**Тема магистерской диссертации:** Поливариантный анализ модели AGROTOOL на чувствительность.

**Цель работы** – анализ чувствительности модели продукционного процесса сельскохозяйственных растений AGROTOOL к вариациям входящих в нее параметров. Определение допустимого диапазона погрешности задания параметров.

**Объект исследования** – система имитационного моделирования продуктивности агроэкосистем AGROTOOL.

**Предмет исследования** – методы исследования чувствительности и устойчивости модели AGROTOOL к вариации ее параметров.

В работе рассмотрены задачи адаптации модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур AGROTOOL к условиям Алтайского Приобья, а именно: идентификация параметров модели по агрометеорологическим данным региона и исследование чувствительности модели к вариациям начальных данных и точности задания параметров. Проанализированы результаты идентификации блоков водного режима, фенологического развития и продуктивности посева. Исследование чувствительности осуществлено к почвенно-гидрологическим параметрам и к вариации начального состояния модели. Сформулированы критерии точности задания области допустимых значений параметров модели.

**Ключевые слова:** агроэкосистема, адаптация, идентификация, модель, продукционный процесс, чувствительность модели.

Магистерская диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 78 страницах компьютерного текста, включает 4 таблицы, 17 рисунков, 5 приложений.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ...	11
1.1. Идентификация параметров моделей. Постановка задачи.....	12
1.2. Методы исследования чувствительности моделей к вариациям параметров.....	16
ГЛАВА 2. СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ AGROTOOL И ПРОБЛЕМА АНАЛИЗА МОДЕЛИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ.....	23
2.1. Структурно-функциональное строение модели AGROTOOL.....	23
2.2. Решение задачи параметрической идентификации блоков модели.....	27
2.2.1. Идентификация параметров блока динамики почвенной влаги.....	27
2.2.2. Идентификация параметров блока развития растений.....	29
2.2.3. Идентификация параметров блока продуктивности растений.....	33
2.3. Анализ результатов идентификации параметров блоков модели.....	34
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	44
3.1. Исследование чувствительности модели к почвенно-гидрологическим параметрам.....	44
3.2. Чувствительность модели к вариации начального влагозапаса.....	46
3.3. Чувствительность модели к вариации даты сева.....	48
3.4. Определение допустимых границ изменения параметров.....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	51
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	55
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	59

## ВВЕДЕНИЕ

Модель продукционного процесса сельскохозяйственных культур AGROTOOL разработана научным коллективом лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического НИИ (г. Санкт-Петербург) и представляет собой динамическую балансовую структуру блочного типа, описывающую систему «почва – растение – атмосфера» [16, 5]. Однако проблема решения практических задач принятия решений в агроэкологии с помощью математических моделей продуктивности агроэкосистем не исчерпывается разработкой достаточно универсальных моделей и эффективных численных методов для их компьютерной реализации. Необходимо иметь представление о качестве модели, степени ее соответствия реальной физической системе, устойчивости и чувствительности к вариациям входящих в модель параметров [16, 2, 12,].

Для адаптации модели AGROTOOL к почвенно-климатическим условиям Алтайского края и внедрении ее в сельскохозяйственное производство необходимо провести идентификацию параметров модели к конкретным условиям региона и сельскохозяйственной культуры, а также осуществить анализ модели на чувствительность к вариациям входящих в модель параметров.

**Цель работы** – анализ чувствительности модели продукционного процесса сельскохозяйственных растений AGROTOOL к вариациям входящих в нее параметров и определение допустимого диапазона погрешности задания параметров.

К числу **основных задач**, поставленных и решенных в рамках защищаемой работы, относятся:

1) изучение теоретической базы анализа моделей на чувствительность: степень разработанности проблемы, обзор и анализ методов структурно-параметрической идентификации и анализа моделей на чувствительность;

2) исследование чувствительности модели AGROTOOL к изменению параметров и выработка на этой основе комплекса требований к информационному обеспечению модели;

3) формулировка требований к точности задания параметров модели, определение допустимого диапазона погрешности задания параметров.

4) на основе результатов численных расчетов, проведенных по модели продуктивности AGROTOOL, сделать вывод о качестве проведенного исследования.

**Объект исследования** – система имитационного моделирования продуктивности агроэкосистем AGROTOOL.

**Предмет исследования** – методы исследования чувствительности и устойчивости модели AGROTOOL к вариации ее параметров.

**Актуальность темы исследования.** В области моделирования агроэкологических процессов, связывающих состояние и продуктивность сельскохозяйственных культур с метеорологическими и почвенными факторами, накоплен значительный опыт, однако системная теоретико-методологическая база структурно-параметрической идентификации таких моделей для их глубокой адаптации к конкретным почвенно-климатическим условиям регионов еще не сложилась, что затрудняет внедрение существующих программных комплексов продуктивности агроэкосистем в производственную практику сельскохозяйственных предприятий.

На современном этапе развития математических моделей и методов в агроэкологии, недостаточно разработаны: подходы к формализации и оптимизации процедуры адаптации, методы и алгоритмы структурно-параметрической идентификации моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур, принципы, качество и критерии их адаптации к условиям региона, что могло бы повысить эффективность их использования в АПК.

Таким образом, актуальность темы исследования обусловлена недостаточной разработанностью формализованных подходов, методов

структурно-параметрической идентификации и анализа моделей на чувствительность, математических моделей адекватного описания некоторых агроэкологических процессов; недостаточной разработанностью инструментальных средств, информационного и программного обеспечения процедуры структурно-параметрической идентификации; необходимостью повышения оперативности и качества адаптации моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур с целью более эффективного формирования и развития совокупности информационных ресурсов продуктивности зерновых культур и прогнозирования урожайности с учетом индивидуальных для сельхозпроизводителей почвенно-климатических факторов региона.

**Степень разработанности проблемы.** Проблеме идентификации систем посвящено большое число публикаций, как отечественных, так и зарубежных. Они охватывают различные аспекты проблемы идентификации. Среди наиболее значительных монографий, посвященных широкому кругу вопросов, связанных с идентификацией автоматизированных систем управления, можно назвать работы Бокса и Дженкинса (1974 г.), Эйкхоффа (1975 г.), Сприета и Ванстеенкесте (1982 г.) как достаточно полные исследования, относящиеся к некоторым практическим разделам идентификации, книги Гудвина и Пейна (1977 г.), Дэвиса и Винтера (1985 г.), Седерстрема и Стойки (1987 г.) с более абстрактным изложением теории. У Кашьяп и Рао (1976 г.) в их толковании теории центральное место занимают процедуры подтверждения и выбора модели. Рекуррентным методам идентификации посвящены работы Льюнга и Седерстрема (1983 г.), Янга (1984 г.). Следует отметить также книги зарубежных авторов, переведенные на русский язык: Д. Гропа (1979 г.), Э.П. Сэйджа и Дж.Л. Мелсы (1974, 1976 гг.), Дж. Саридиса (1980 г.), Р. Ли (1966 г.), Л. Льюнга (1991 г.), а также книги под редакцией П. Эйкхоффа (1983 г.) и П. Леондеса (1980 г.).

Все эти работы рассматривают различные вопросы, связанные как с описанием типовых систем с постоянными и переменными параметрами,

нелинейных систем и их моделей, так и с рассмотрением разнообразных методов идентификации (параметрических, непараметрических, рекуррентных), изложением вопросов выбора моделей, критериев и алгоритмов для решения различных задач идентификации. Большое внимание уделено применению компьютеров для решения конкретных задач идентификации динамических систем. Однако, *вопросы идентификации систем, изложенные в работах, касаются теории автоматического управления и анализа временных рядов.* Большая часть работ посвящена множеству линейных и нелинейных моделей регрессионного типа.

В России большую роль в становлении научного направления «идентификация систем» сыграли научные школы академика Я.З. Цыпкина и профессора Н.С. Райбмана, которые способствовали системной интеграции интеллектуальных усилий к построению новых весьма эффективных наукоемких технологий решения актуальных прикладных задач в области управления автоматизированными системами. Из отечественных авторов, в первую очередь необходимо назвать книги Я.З. Цыпкина (1984 г.), Н.С. Райбмана (1970, 1979 гг.), К. С Гинсберга (1996, 1998, 2000 гг.) и др.

Большое число статей, относящихся к разным разделам теории идентификации, можно найти в трудах симпозиумов IFAC по идентификации и оцениванию параметров и материалах Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления», организаторами которой являются Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Российский Национальный Комитет по автоматическому управлению, Российский фонд фундаментальных исследований и фонд «Проблемы управления». Тематика симпозиумов и конференций охватывает различные аспекты теории идентификации автоматизированных систем, проблемы их моделирования и управления ими.

Рассматриваемая в магистерской диссертации проблема исследования чувствительности моделей к вариации входящих в них параметров ранее нашла отражение в трудах таких российских ученых,

как Марчук Г.И., Пененко В.В. Представленные в изученных работах теоретические аспекты параметрической идентификации и анализа моделей на чувствительность были использованы при реализации цели и задач магистерского исследования.

**Новизна исследования** заключается в адаптации имитационно-моделирующего комплекса продуктивности агроэкосистем AGROTOOL к условиям региона в результате проведения комплексной параметрической идентификации по агрометеорологическим данным измерений АНИИСХОЗа ОПХ им. В.В. Докучаева, в исследовании чувствительности модели к вариациям ее параметров, оценке применимости модели для прогноза урожайности зерновых культур в условиях Алтайского края.

**Методы исследования.** В качестве основных способов получения новых знаний и методов решения поставленных задач в диссертации использованы следующие методы научного исследования: системный подход, формализация, моделирование, сравнение, анализ, синтез, абстрагирование, обобщение, статистические методы, численный эксперимент.

**Теоретико-методологической основой исследования** послужили фундаментальные концепции, представленные в трудах отечественных и зарубежных ученых по изучаемым проблемам параметрической идентификации и исследованию чувствительности моделей к вариации входящих в них параметров (Полуэктов Р.А., Пененко В.В., Льюнг Л., Денисов В.В., Эйкхофф П.)

Статистическим инструментарием исследования послужили методы оптимизации, исследование рядов динамики и прогнозирования, а также графический и табличный методы визуализации данных. Для решения поставленных задач магистерского исследования применялись программный код модели AGROTOOL, табличный процессор «MS Excel», текстовый редактор «MS Word».



**Информационная база исследования** представлена фактическими агрометеорологическими данными, включающими многолетние ежедневные метеорологические данные: минимальная и максимальная температура воздуха (град. С); минимальная относительная влажность воздуха (%); осадки (мм); скорость ветра (м/с); продолжительность солнечного сияния (час); материалами департамента сельского хозяйства Алтайского края, аналитическими данными справочной и научной литературы.

**Практическая значимость** проведенного исследования определяется актуальностью поставленных задач и достигнутым уровнем разработанности проблемы.

**Структура магистерской диссертации.** Магистерская диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 78 страницах компьютерного текста, включает 4 таблицы, 17 рисунков, 5 приложений.

### **Основное содержание магистерской диссертации**

Во введении сформулированы цель и задачи выпускной работы, определены объект и предмет исследования, изложены теоретические и методологические основы исследования, раскрыты новизна, актуальность и практическая значимость.

Первая глава посвящена проблеме адаптации динамических моделей к условиям региона, приведена постановка задачи параметрической идентификации моделей, изложены теоретические аспекты исследования чувствительности моделей к вариациям параметров.

Во второй главе «Система имитационного моделирования Agrotool и проблема анализа модели на чувствительность» рассматривается структурно-функциональное строение модели AGROTOOL, приводятся результаты и анализ параметрической идентификации блоков модели.

В третьей главе анализируются результаты исследования чувствительности модели к почвенно-гидрологическим параметрам и к вариации начального состояния, сформулированы критерии точности задания области допустимых значений параметров модели, приведен критический анализ проведенного исследования.

В заключении подведены итоги проведенного исследования, приведены результаты апробации работы.

Приложение содержит сводные данные по результатам идентификации параметров блока водного режима для тяжелосуглинистых, среднесуглинистых и суглинистых почв Алтайского Приобья.

## ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В настоящее время математическое и компьютерное моделирование является неотъемлемой частью практически любой сферы научной деятельности, внедряясь, в том числе, в промышленное и сельскохозяйственное производство. Все большее значение приобретают так называемые динамические модели агроэкосистемы или модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Это объясняется временными и технологическими трудностями проведения эксперимента в реальных условиях. Так, чтобы экспериментальным путем определить, как будет вести себя сельскохозяйственное растение при тех или иных внешних условиях или агротехнологиях надо провести полевой опыт, который во многих регионах возможно осуществить только один раз в год. А компьютерная имитационная модель может ответить на поставленный вопрос в течение нескольких секунд (при условии, что модель адекватно описывает свой реальный прототип – агрономический посев). Поэтому развитию и совершенствованию методов математического описания и компьютерного моделирования процессов в системе «почва-растение-атмосфера» уделяется серьезное внимание. Соответствующие модели становятся интеллектуальным ядром компьютеризированных систем поддержки принятия решений в земледелии и растениеводстве.

С алгоритмической точки зрения модель продукционного процесса формально может быть представлена в виде следующего эволюционного оператора [16]:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), w(t), u(t), a), \quad x(0) = x_0, \quad t \in (0, T), \quad (1.1)$$

где  $t$  – время,  $x(t)$  – вектор состояния модели,  $w(t)$  – вектор неконтролируемых внешних воздействий (погода),  $u(t)$  – вектор контролируемых внешних воздействий (агротехника),  $a$  – вектор параметров модели,  $T$  – время окончания процесса моделирования, обычно совпадающее с моментом

уборки урожая. Суть моделирования состоит в определении вида оператора  $f$ , содержащего в себе описание всех основных процессов, протекающих в агроэкосистеме.

На практике такие модели реализуются в виде компьютерных программ, где алгоритмизирован метод решения (развертывания во времени) оператора (1.1). При этом осуществляется переход к дискретному описанию с выбранным временным шагом, то есть модель записывается в виде системы конечно-разностных уравнений:

$$x(k+1) = f(x(k), w(k), u(k), a), x(0) = x_0, k = 1, 2, \dots, N. \quad (1.2)$$

В таких моделях нужно определить, каким будет шаг по времени и по вертикальной координате (для пространственно-распределенных характеристик).

### **1.1. Идентификация параметров моделей. Постановка задачи**

Можно выделить три типа задач, в которых динамические модели продукционного процесса растений могут быть полезны. Это анализ эффективности технологических решений, принятых в прошлом, оценка состояния агроэкосистемы в текущий момент времени и прогнозирование ее будущего поведения [28].

Понимание природы процессов, происходящих в системе, может служить основой при структурной идентификации модели, которая также называется *идентификацией в широком смысле*.

Модель задается с помощью конечного набора численных характеристик, или коэффициентов, которые не могут быть определены с достаточной степенью точности из знания физической природы системы. Поэтому для нахождения всех этих коэффициентов приходится прибегать к процедурам оценивания [28]. Такая постановка задачи в специальной литературе называется *параметрической идентификацией*, или *идентификацией в узком смысле*. В качестве критерия в задаче

параметрической идентификации выступает суммарное рассогласование экспериментально полученных и расчетных данных.

*Адекватность модели* – количественное соответствие ее исходной системе с той точностью, которую требует конкретная задача. Под верификацией понимается проверка адекватности модели системе-оригиналу.

Рассмотрим постановку задачи параметрической идентификации моделей.

Метод структурно-параметрической идентификации моделей агросистем основан на рассмотрении рассогласования между поведением реальной системы  $\mathfrak{T}^0$  и соответствующим поведением модельной системы  $\mathfrak{T}$  с параметрами [28].

Для решения задачи идентификации необходимо выбрать, определить и сформировать:

- входные и выходные данные;
- структуру модели изучаемого объекта (системы);
- критерий качества идентификации;
- алгоритм идентификации;
- критерии и методы верификации (подтверждения) модели.

Рассмотрим класс моделей  $\mathfrak{T}=(\mathfrak{T}_1, \mathfrak{T}_2, \dots, \mathfrak{T}_m)$ , представляющих собой динамические балансовые структуры блочного типа и описывающих систему «почва – растение – атмосфера» [28]. Причем, каждая  $\mathfrak{T}_i=\mathfrak{T}_i(X, S, Y, P, \Sigma, L)$ , где

$x_i \in X, \quad i = \overline{1, n_x}$  – совокупность входных переменных;

$s_i \in S, \quad i = \overline{1, n_s}$  – совокупность переменных состояния модели;

$y_i \in Y, \quad i = \overline{1, n_y}$  – совокупность выходных переменных модели;

$p_i \in P, \quad i = \overline{1, n_p}$  – совокупность параметров модели;

$\sigma_i \in \Sigma$ ,  $i = \overline{1, n_\sigma}$  – совокупность внутренних связей в модели между переменными – структура модели.

Функция  $L = \{L_1, \dots, L_{n_s}\}$  есть не что иное, как разрешающий оператор совокупности математических соотношений, позволяющих по заданным входам (совокупности внешних воздействий)  $x_i \in X$ ,  $i = \overline{1, n_x}$ , с той или иной определенностью находить функции  $s_i \in S$ ,  $i = \overline{1, n_s}$ , на интервале  $t_0 \leq t \leq t_n$ :

$$s_1(t+1) = L_1(x_1, \dots, x_{n_x}, s_1, \dots, s_{n_s}, p_1, \dots, p_{n_p}, \sigma_1, \dots, \sigma_{n_\sigma}, t),$$

.....

$$s_{n_s}(t+1) = L_{n_s}(x_1, \dots, x_{n_x}, s_1, \dots, s_{n_s}, p_1, \dots, p_{n_p}, \sigma_1, \dots, \sigma_{n_\sigma}, t)$$

или в короткой записи

$$S(t+1) = L(X, S, Y, P, \Sigma, t). \quad (1.3)$$

Зависимость (1.3) называется законом функционирования модельной системы  $\mathfrak{S}$ .

Необходимо из класса моделей  $\mathfrak{S} = (\mathfrak{S}_1, \mathfrak{S}_2, \dots, \mathfrak{S}_m)$  выбрать модель  $\mathfrak{S}_i \subset \mathfrak{S}$  с законом функционирования  $L^* : (\mathfrak{S}^0) \rightarrow \mathfrak{S}_i$  (скобки обозначают, что  $L^*$  – частично определенное отображение, т.е. не все черты состава и структуры оригинала  $\mathfrak{S}^0$  отражаются моделью) таким, что  $S(t+1) = L^*(X, S, Y, P, \Sigma, t)$  и  $Y = \varphi(X, S, P, \beta)$ ,  $\beta$  – вектор настроечных параметров выходных переменных.

Функциональное преобразование  $L^*$  может быть выбрано из условия

$$\|S(t+1) - L^*(X, S, Y, P, \Sigma, t)\| \rightarrow \min_{\substack{p_i \in P \\ \sigma_i \in \Sigma}} \quad (1.4)$$

в некотором пространстве выбранного класса функций  $L^*$  или, чтобы минимизировать некоторый критерий рассогласования модельной системы и системы-оригинала (критерий качества модели):

$$\mathfrak{R}_L^* \rightarrow \min_{L^* \in L} .$$

Выбор функционального преобразования  $L^*$  во многом субъективен и не поддается строгой формализации. Процесс определения структуры оператора модели  $L^*$ , т.е. выбор класса операторов  $L$ , в котором будет осуществляться поиск приемлемого оператора, называется структурной идентификацией. После определения структуры оператора  $L^*$ , т.е. его вида с точностью до коэффициентов  $p_i \in P, i = \overline{1, n_p}$ , процесс идентификации сводится к оцениванию этих коэффициентов (параметров). Такая задача называется задачей параметрической идентификации [28].

Проблема численного решения задачи оптимизации (1.4) сопряжена со значительной размерностью вектора идентифицируемых параметров модели  $P$ , многоэкстремальностью и недифференцируемостью целевой функции (1.4).

В данной работе для реализации целей исследования используется модель продукционного процесса сельскохозяйственных культур AGROTOOL, которая разработана научным коллективом лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического НИИ (г. Санкт-Петербург) [16, 5], и представляет собой динамическую балансовую структуру блочного типа, описывающую систему «почва – растение – атмосфера». Проблема решения практических задач принятия решений в агроэкологии с помощью математических моделей продуктивности агроэкосистем не исчерпывается разработкой достаточно универсальных моделей и эффективных численных методов для их компьютерной реализации. Необходимо иметь представление о качестве модели, степени ее соответствия реальной физической системе, устойчивости и чувствительности к вариациям входящих в модель параметров.

Для адаптации модели AGROTOOL к почвенно-климатическим условиям Алтайского края необходимо провести **идентификацию параметров модели** к конкретным условиям региона и сельскохозяйственной культуры, а также осуществить **анализ модели на чувствительность** к вариациям входящих в модель параметров.

В результате проведенного исследования осуществлена процедура параметрической идентификации блоков модели AGROTOOL: динамики влажности почвы, фенологического развития и продуктивности посева, т.е. модель, прошла стадию идентификации.

## 1.2. Методы исследование чувствительности моделей к вариациям параметров

Методы исследования чувствительности предназначены для оценки влияния вариаций входных параметров на вектор состояния и выяснения роли различных факторов при формировании моделируемых процессов. В настоящее время наиболее распространенным методом изучения чувствительности моделей является **метод прямого моделирования** [12], основная идея которого состоит в следующем. Задача решается при невозмущенном  $P_1 = P \in D$  и возмущенном  $P_2 = P + \delta$  значениях вектора параметров, где  $D$  – область допустимых значений параметров. В результате получаются два значения вектора состояния, которые, используя (1.3), можно предоставить следующим образом:

$$\begin{aligned} S_1(k+1) &= L(X(k), S_1(k), Y(k), P_1, \Sigma, t) \\ S_2(k+1) &= L(X(k), S_2(k), Y(k), P_2, \Sigma, t). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Искомая вариация вычисляется по формуле

$$\delta S = S_1 - S_2. \quad (1.6)$$

Для проведения численных экспериментов метод прямого моделирования является наиболее простым и универсальным. Его целесообразно применять при оценке влияния больших вариаций [12].

Уточним процедуру исследования модели на чувствительность.

При построении моделей сложных объектов разработчикам приходится принимать ряд упрощающих допущений. Любая модель содержит определенный набор параметров, численные значения которых неизвестны и должны быть определены по экспериментальным данным в процессе идентификации модели. Для того, чтобы сформулировать требования к



точности определения этих величин, необходимо исследовать чувствительность модели к вариации этих параметров. Предполагается, что модель прошла стадию идентификации, т.е. составляющие вектора параметров  $p_i \in P$ ,  $i = \overline{1, n_p}$  – уравнения (1.3) известны.

Определенные составляющие вектора  $P$  определяются в процессе лабораторного или полевого опыта, которые нередко бывают трудоёмкими и дорогостоящими, либо их значения берутся из справочников. Поэтому возникает вопрос о точности определения тех или иных параметров. Эта задача решается путем исследования чувствительности модели к вариациям составляющих вектора  $P$ . «Если какая-либо из выходных переменных модели, к примеру, урожай значительно изменяется даже при малой вариации параметра, то к точности определения этого параметра должны предъявляться особые требования» [3]. При незначительном изменении выхода модели при вариации определенного параметра он может быть оценен приближенно. Обозначим эту варьируемую составляющую вектора  $P$  через  $p$ . Тогда, вектор  $P$  можно представить в виде:

$$P = \begin{bmatrix} p \\ p^1 \end{bmatrix},$$

где  $p^1$  – неизменяемые параметры вектора  $P$ . Тогда уравнение модели (1.2) переписываются в виде:

$$S((k+1), p) = L(X(k), S(k, p), Y(k), p^1, p, \Sigma, t), \quad S(0) = S_0(p), k = 0, 1, \dots, T. \quad (1.7)$$

Продифференцируем обе части равенства (1.7) по параметру  $p$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial S((k+1), p)}{\partial p} &= \frac{\partial L}{\partial S} \cdot \frac{\partial S(k, p)}{\partial p} + \frac{\partial L}{\partial p}, \\ \frac{\partial S(0)}{\partial p} &= \frac{\partial S_0}{\partial p}, \end{aligned} \quad (1.8)$$

где  $\frac{\partial L}{\partial S} = \left( \frac{\partial L_i}{\partial S_j} \right)_{i,j=\overline{1,n}}$  – матрица размера  $m \times n$ ;  $\frac{\partial S}{\partial p}$ ,  $\frac{\partial L(k, p)}{\partial p}$ ,  $\frac{\partial S(0)}{\partial p}$  –  $n$ -мерные вектора.

Частные производные  $\frac{\partial S(k, p)}{\partial p}$  носят название **функций чувствительности**. Введем обозначение  $\frac{\partial S(k, p)}{\partial p} = v(k, p)$ . Тогда (1.8)

запишется в виде:

$$v(k+1, p) = \frac{\partial L}{\partial S} \cdot v(k, p) + \frac{\partial L}{\partial p}, \quad v(0, p) = \frac{\partial S_0}{\partial p}, \quad k=0, 1, \dots, T. \quad (1.9)$$

Соотношения (1.9) называются **уравнениями чувствительности**.

В компьютерном эксперименте функции чувствительности могут быть получены при многократном прогоне модели при различных значениях варьируемого параметра. Поскольку мы исследуем чувствительность компьютерной версии модели, то производные в соотношении (1.9) могут быть заменены конечными приращениями, т.е. вместо  $v(k, p)$  будут вычисляться величины, характеризующие относительные приращения:

$$\frac{\Delta s}{s_0} = R \frac{\Delta p}{p_0}. \quad (1.10)$$

В формуле (1.10)  $s$  – произвольная характеристика посева или другая составляющая модели;  $s_0$  и  $p_0$  – базовые значения исследуемой переменной и параметра, которые называются невозмущенными;  $\Delta p$  – вариация (приращение – положительное или отрицательное) параметра;  $\Delta s$  – изменение исследуемой величины, вызванное вариацией параметра  $p$ . Безразмерный коэффициент  $R$  наиболее полно характеризует чувствительность. Оценка чувствительности модели к вариациям тех или иных параметров позволит сформулировать требования к необходимой точности задания этих параметров.

Из соотношения (1.10) вытекает, что чем больше значение показателя  $R$ , тем более жесткие требования предъявляются к точности задания варьируемого параметра. Если задать определенную границу точности расчета выходной переменной модели  $s$ , например, 20%, то требуемая точность параметра определяется из соотношения:

$$\frac{\Delta p_{\max}}{p_0} = \frac{0.2}{R}.$$

В случае малых вариаций  $\delta P$  и  $\delta S$  для нахождения  $\delta S$  лучше использовать **уравнения в вариациях** – линейные уравнения, которые получаются в результате линеаризации исходной нелинейной системы в окрестности невозмущенных состояний и параметров. Поскольку для компьютерной реализации задача должна быть записана в дискретной форме, то и уравнение для вариаций удобно вывести из (1.3). Пусть  $P_0$  – невозмущенное значение вектора параметров, а  $S(P_0)$  – решение задачи (1.3) при этих параметрах. Представим вектор параметров в окрестности  $P_0$  в виде:

$$P = P_0 + \xi \cdot \delta P, P, P_0 \in D, \quad (1.11)$$

где  $\xi$  – вещественный параметр. Предположим, что и вектор состояния можно представить в таком же виде:

$$S = S(P_0) + \xi \cdot \delta S. \quad (1.12)$$

Тогда, используя (1.11), (1.12) и проводя формально операции дифференцирования функционала в тождестве (1.3), получим систему уравнений в вариациях.

Уравнения в вариациях, в силу линейности полученной задачи относительно вариаций векторов состояния и параметров, при специальном задании  $\delta P$  позволяют оценивать непосредственно функции чувствительности вектора состояния к вариациям параметров.

Для оценок функций чувствительности применим и метод прямого моделирования. Вычисления организуются по схеме (1.5), (1.6). При каждом решении системы уравнений (1.3), одной из компонент  $P_i$  вектора  $P$  дается небольшое приращение  $\delta P_i$  относительно невозмущенного значения. Полученная в результате операций (1.11), (1.12) вариация вектора состояния, которую обозначим через  $\delta S^{(i)}$ , делится на  $\delta P_i$ . Таким образом находится приближенное значение функции чувствительности к вариациям параметра  $P_i$ .

Если требуется оценить **вариации функционалов**, определенных на множестве решений задачи, то в этих случаях функционал можно принять в качестве меры чувствительности модели к вариациям входных величин. Примерами таких функционалов могут быть полная энергия системы, среднее значение какого-либо компонента вектора состояния по области  $D$  или по ее части. В зависимости от целей исследования функционал может быть выбран многими способами.

Рассмотрим **метод оценки вариаций для функционала** общего вида, предполагая при этом его ограниченность, непрерывность и дифференцируемость на множествах функций  $S$  и  $P$  [10]. Для определенности будем считать, что функционал явно зависит от компонент вектора состояния и неявно от компонент вектора  $P$ . Обозначим его через  $I_0(S)$ . Из сделанных предположений относительно дифференцируемости функционала  $I_0(S)$  следует, что существуют векторы:

$$\text{grad}_s I(S) = \left\{ \frac{\partial I_0(S)}{\partial S} \right\}, \quad (1.13)$$

$$\text{grad}_p I(S) = \left\{ \frac{\partial I_0(S)}{\partial P} \right\}, P \in D, \quad (1.14)$$

где символ частной производной обозначает операцию дифференцирования скалярной функции по векторному аргументу, результатом которой является вектор-градиент этой функции в направлении вектора-аргумента.

Определим вариации  $\partial I_0(S)$  функционала  $I_0(S)$ , возникающие при варьировании вектор-функций  $S$  и  $P$ . С учетом (1.13) выражение для вариации  $\partial I_0(S)$  при варьировании вектор-функции  $S$  запишется следующим образом:

$$\partial I_0(S) = (\text{grad}_s I_0(S), \partial S) = \left( \frac{\partial I_0(S)}{\partial S}, \partial S \right). \quad (1.15)$$

Учитывая (1.14), выражение для  $\partial I_0(S)$  при варьировании вектор-функции  $P$  можно записать в виде:

$$\partial I_0(S) = (\text{grad}_p I_0(S), \partial P). \quad (1.16)$$

Скалярные произведения в (1.15), (1.16) определяются структурой функционала  $\partial I_0(S)$  и соотношением (1.3) таким образом, чтобы все операции в них имели смысл. Это замечание относится к тому, что компоненты вектор-функций  $S$  и  $P$  имеют различные по физическому смыслу размерности.

Ввиду явной зависимости функционала  $I_0(S)$  от  $S$  вычисление вариации по формуле (1.15) производится обычным образом. Процедура вычислений определяется конкретным видом функционала и реализует выражение

$$\partial I_0(S) = (\text{grad}_s I_0(S), \partial S) = \lim_{\xi \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial \xi} I_0(S + \xi \cdot \delta S), \quad (1.17)$$

где  $\xi$  – некоторый вещественный параметр.

Компоненты вектора  $\text{grad}_s I_0(S)$  вычисляются непосредственно по формуле (1.13) как частные производные скалярной функции многих переменных по одной из них. Поскольку функционал  $I_0(S)$  в общем случае нелинейный, то удобнее определять вектор  $\text{grad}_s I_0(S)$ , исходя из соотношения (1.17), следующим образом:

$$\text{grad}_s I_0(S) = \left\{ \frac{\partial}{\partial \delta S} \left[ \lim_{\xi \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial \xi} I_0(S + \xi \cdot \delta S) \right] \right\}. \quad (1.18)$$

Уравнение (1.16) является основным соотношением теории чувствительности моделей. Оно связывает вариации функционалов с вариациями входных параметров. Компоненты вектора  $\text{grad}_s I_0(S)$  характеризуют вклад соответствующих им вариаций компонент вектора  $P$  в вариацию функционала, и поэтому они называются функциями влияния вариаций параметров на функционал или функциями чувствительности модели к вариациям входных величин, если в качестве меры чувствительности взят функционал  $I_0(S)$ .

Вычисление вариаций функционала  $I_0(S)$  по формуле (1.16) в зависимости от вариаций вектора  $P$  и компонент вектора  $grad_{\mathcal{S}} I_0(S)$  представляет более сложную задачу, чем вычисление по формулам (1.17), (1.18), так как при этом необходимо учитывать неявную зависимость между векторами  $S$  и  $P$ . Чтобы учесть эту зависимость, используют метод множителей Лагранжа, который связан с теорией сопряженных уравнений [10, 12].

## **ГЛАВА 2. СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ AGROTOOL И ПРОБЛЕМА АНАЛИЗА МОДЕЛИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ**

Для исследования была выбрана имитационная модель продукционного процесса сельскохозяйственных растений AGROTOOL [16]. Модель разработана в лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ, г. Санкт-Петербург) под руководством доктора технических наук, заслуженного деятеля науки РФ, профессора Ратмира Александровича Полуэктова.

### **2.1. Структурно-функциональное строение модели AGROTOOL**

Имитационная система AGROTOOL включает в себя [16]:

- динамическую модель, реализованную на объектно-ориентированном языке Turbo Pascal в нотации системы Delphi;
- стационарную базу данных, реализованную в СУБД Access;
- оперативную базу данных, реализованную в системе Excel;
- интерфейс пользователя.

Модель описывает продукционный процесс полевых культур и производит расчет динамики урожая, начиная с посева и заканчивая уборкой. Структура модели блочная (рис. 2.1), которая включает описание следующих процессов, имеющих место в системе «почва – растительный покров – приземный слой воздуха»:

- радиационный режим посева, включающий моделирование поглощенной посевом интегральной коротковолновой радиации, тепловой радиации и ФАР;
- турбулентный режим посева;
- фотосинтез и фотодыхание;
- развитие растений (расчет физиологического времени, определяющего сроки наступления фенофаз);

–распределение накопленных продуктов фотосинтеза по органам растения с учетом взаимодействия C:N в растениях, их рост, формирование хозяйственного урожая;

–транспирация растений и испарение влаги с поверхности почвы;

–динамика тепло- и влагопереноса в почвенном профиле;

–трансформация и перенос соединений азота в почве;

–прогнозирование темпов развития растений;

–прогнозирование урожая (начиная с фазы колошения);

–выбор норм и сроков орошения в поливном земледелии;

–выбор доз азотных удобрений, норм и сроков азотных подкормок.

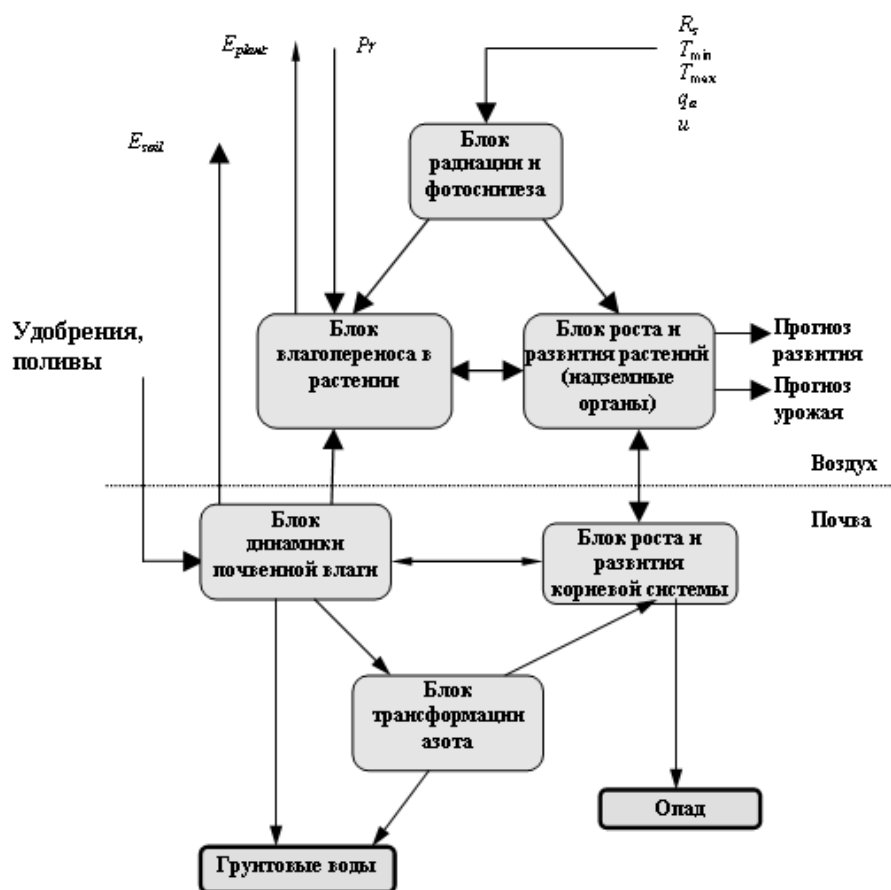


Рисунок 2.1 – Блок-схема модели [16]

Модель имеет суточный временной шаг, за исключением блока фотосинтеза, в котором реализован внутренний алгоритм расчета с часовым шагом.



В качестве входных погодных данных модели используется следующий набор суточных метеопараметров (реальных или смоделированных): минимальная и максимальная температуры воздуха, минимальная относительная влажность воздуха, осадки, скорость ветра и длительность солнечного сияния. Кроме того, для прогона модели необходимо задать начальные условия – дату сева и влагозапас в метровом слое почвы (до сева или в день сева). Для работы пользователя с моделью разработана управляющая программа – графическая оболочка модели. Она носит универсальный характер и предусматривает работу с рядом культур и мест их произрастания. С помощью оболочки можно осуществлять компьютерные эксперименты с моделью, накапливая данные моделирования для их последующего анализа и статистической обработки [16].

Принципиальная структура комплекса включает в себя два независимых исполняемых программных компонента и реляционную базу данных. Укрупненная схема взаимодействия компонентов представлена на рисунке 2.2 [16].

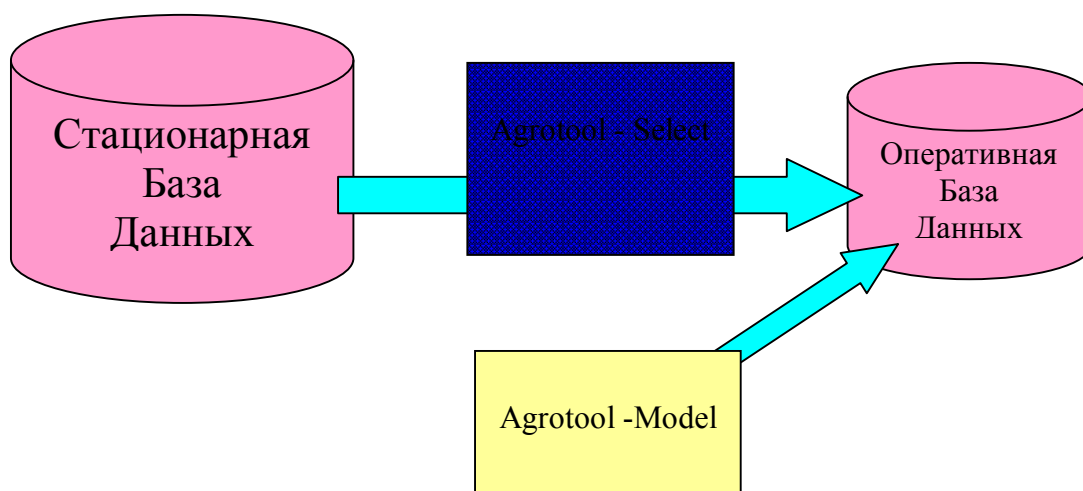


Рисунок 2.2 – Принципиальные компоненты комплекса AGROTOOL

DSM (Dataset Maker) – программный интерфейс осуществляющий формирование Оперативной базы данных (ОБД, DataSet) из стационарной базы данных (СБД). Он представляет собой отдельную программу, которая во взаимодействии с пользователем составляет SQL-запрос к СБД на извлечение данных и выполняет его, записывая заказанные данные в ОБД

(DataSet). Термин интерфейс в данном случае понимается как пользовательский интерфейс – диалоговое окно (рис. 2.3).

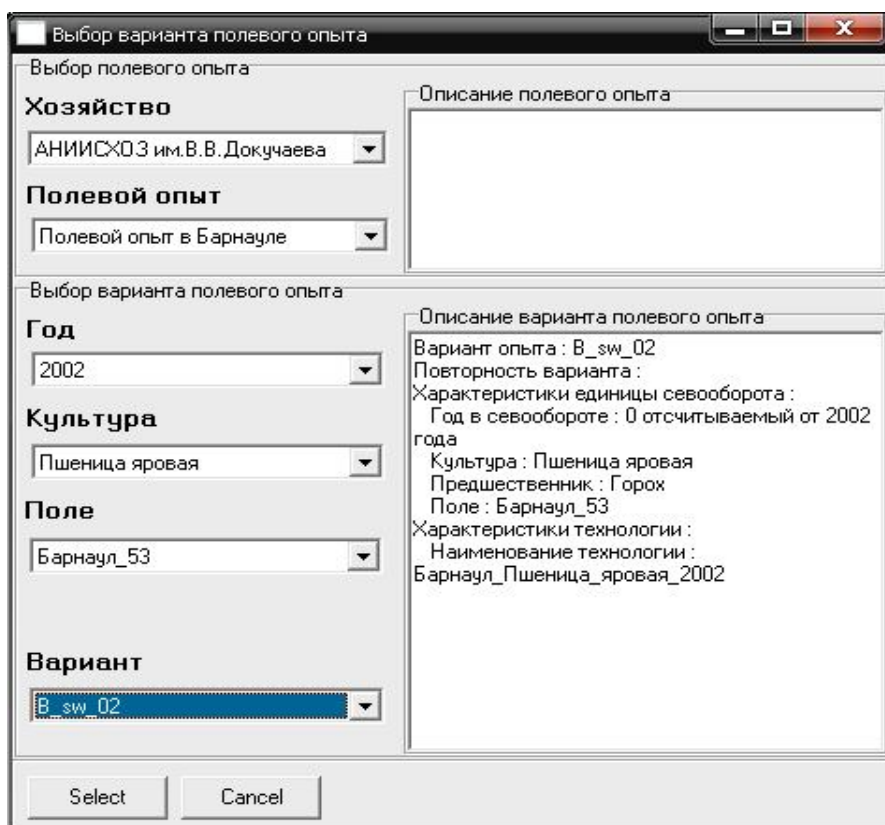


Рисунок 2.3 – Выбор варианта полевого опыта

Для просмотра результатов моделирования разработан интерфейс графической визуализации результатов расчета (рис. 2.4).

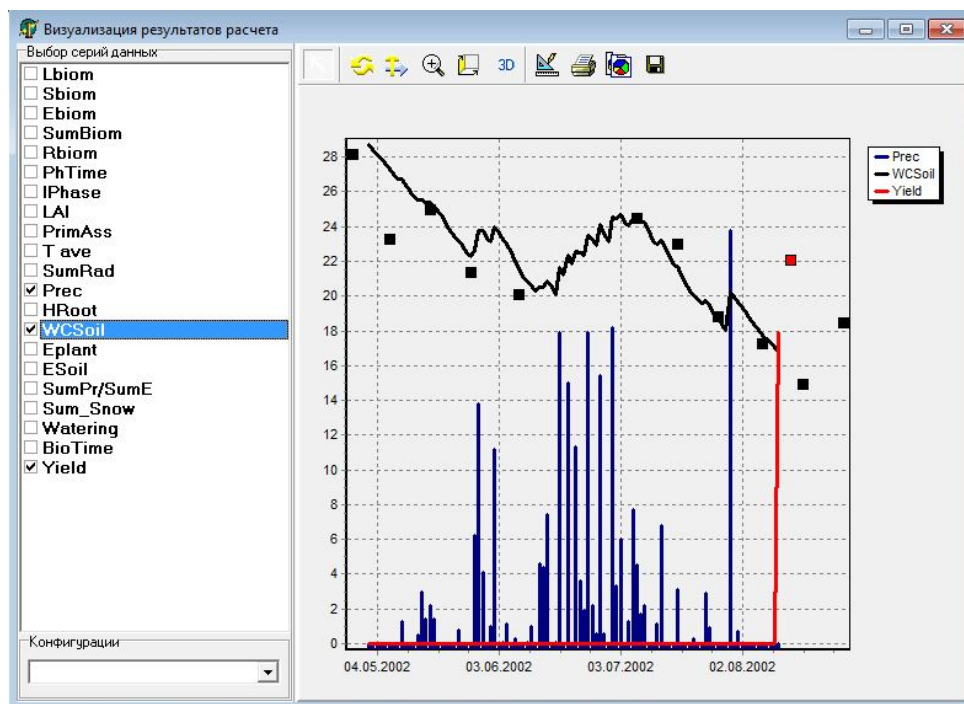


Рисунок 2.4 – Интерфейс графической визуализации результатов расчета

## 2.2. Решение задачи параметрической идентификации блоков модели

Процедура настройки параметров модели AGROTOOL включает три этапа:

- настройка водного блока модели;
- определение параметров развития;
- определение параметров продуктивности посева.

### 2.2.1. Идентификация параметров блока динамики почвенной влаги

Важной составляющей любой модели продукционного процесса растений является описание динамики переноса влаги в почве и растительном покрове. В основе моделирования влагопереноса в почве лежит уравнение Ричардса, объединяющее в себе уравнение материального баланса и закон Дарси для скорости движения влаги по почвенному профилю [4, 16, 21]:

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k^w(P) \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} - 1 \right) - f(x, t), \quad (2.1)$$

где  $t$  – время;  $x$  – пространственная координата по направленной вертикально вниз оси, имеющей начало на границе почва – приземный слой атмосферы;  $\theta$  – объемная влажность почвы;  $P$  – капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги;  $k^w(P)$  – функция влагопроводности почвы;  $f(x,t)$  – функция стока, характеризующая скорость поглощения воды корнями. Для замыкания задачи к этому соотношению добавлены начальные и граничные условия.

Начальное условие  $\theta(x, 0) = \theta(x)$  – это распределение воды по почвенному профилю в начале счета, которое должно быть измерено экспериментально или оценено исходя из тех или иных соображений.

Граничное условие на поверхности почвы (при  $x = 0$ ) записывается в виде

$$q(0,t) = \begin{cases} Pr, & \text{если } Pr > 0, \\ -Es, & \text{если } Pr = 0, \end{cases}$$

где  $Pr$  – величина атмосферных осадков, см/сут;  $Es$  – физическое испарение влаги в тех же единицах;  $q(0,t)$  – поток воды на верхней границе расчетного слоя почвы.

Граничное условие на нижней границе расчетного слоя ( $x = Hs$ ) при глубоком залегании грунтовых вод (5 м и ниже) в модели имеет вид, отражающий то обстоятельство, что вода из расчетного слоя почвы может стекать в основном за счет гравитации:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x = Hs} = 0.$$

Уравнение (2.1) описывает динамику влажности почвы и потенциала почвенной влаги, между которыми имеется однозначная связь. Эта связь задается так называемыми педотрансферными функциями [29], вид и параметры которых определяются в основном гранулометрическим составом почвы. Для каждого типа почвы должны быть определены значения следующих агрогидрологических характеристик:

МГ – максимальная гигроскопичность почвы;  $\text{см}^3/\text{см}^3$ ;

ВЗ – влажность устойчивого завядания;  $\text{см}^3/\text{см}^3$ ;

НВ – наименьшая влагоемкость почвы;  $\text{см}^3/\text{см}^3$ ;

ПВ – полная влагоемкость (влажность насыщения, пористость) почвы.

С использованием этих характеристик определяются соответствующие параметры педотрансферных функций, имеющих вид:

$$\theta(P) = \text{МГ} + \frac{\text{ПВ}-\text{МГ}}{1+b(-P)^a},$$

$$k^w(P) = Kf \cdot (-P)^C,$$

где  $\theta$  – объемная влажность почвы,  $\text{см}^3/\text{см}^3$ ;  $P$  – капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги, см вод. ст.;  $Kf$  – коэффициент фильтрации, см/сут;  $a$ ,  $b$  и  $C$  – эмпирические параметры, б/р.

Первая функция представляет собой соотношение для кривой водоудерживающей способности почвы, а вторая выражает зависимость влагопроводности почвы от капиллярно-сорбционного потенциала почвенной влаги.

Для описания влагопереноса в почве в модели AGROTOOL используется механистический подход, основанный на теоретических представлениях о динамике почвенной влаги. Поэтому этот блок не требует специальной настройки, а для определения конкретных параметров блока необходимо использовать только экспериментальные данные об агрофизических характеристиках почвенного покрова. Однако для определения функции влагопроводности требуется задать еще две величины – коэффициент фильтрации  $Kf$  и показатель степени  $C$ .

### **2.2.2. Идентификация параметров блока развития растений**

**Онтогенез** – индивидуальное развитие организма, совокупность последовательных морфологических, физиологических и биохимических преобразований, претерпеваемых организмом от момента его зарождения до конца жизни [14, 15].

В ходе онтогенеза каждый организм закономерно проходит последовательные фазы, стадии или периоды развития

**Фенология** – это система научных знаний о сезонном развитии живой природы – растений и животных – в естественной обстановке в связи со сменой времен года.

В задачи фенологии входит изучение сроков наступления фаз развития растений, картирование фенологических сезонов, разработка фенологических прогнозов сроков наступления различных фаз развития растений.

**Фазы развития** – это последовательные этапы индивидуального развития растений: от прорастания семени до плодоношения и отмирания растительного организма.

У каждой зерновой культуры на протяжении периода развития различают следующие основные фазы: всходы, кущение, выход в трубку, колошение, цветение, молочная спелость, восковая спелость, полная спелость и плодов.

За начало фазы принято считать день ее наступления не менее чем у 10% растений, а за массовое наступление фазы – не менее чем у 50% растений. Бывают случаи, когда при дружном развитии растений начало и массовое наступление фазы приходятся на один и тот же день.

Под межфазным периодом времени будем понимать отрезок физического времени от момента полного наступления первой из входящих в него фенологических фаз до момента полного наступления второй. За полное наступление фазы принимается тот день, в который данная фаза наступает не менее чем у 50% учтенных растений.

Обстоятельства, которые делают необходимым применение математических методов для решения задачи прогноза темпов развития растений: неизвестен механизм, определяющий смену фенофаз; невозможно провести эксперименты, позволяющие определить минимальное время прохождения межфазных периодов. Построение математической модели позволяет (в случае удачного выбора ее структуры после проведения идентификации) на основе экспериментальных данных получить оценки как

минимального времени развития, так и оптимальных для развития значений факторов внешней среды.

Блок развития растений является также важной составной частью динамических моделей. Задачей этого блока является расчет так называемого «физиологического времени», т.е. связи скорости развития растения с условиями его вегетации, изменяющимися в обычном календарном времени. Как известно, все морфогенетические процессы развиваются не в обычном, а в физиологическом времени, визуальным проявлением которого является смена фенофаз. На скорость протекания физиологического времени оказывают существенное влияние погодные условия. Основными факторами, влияющими на скорость развития многих растений, являются длина светового дня (фотопериод), температура воздуха и влагообеспеченность посева.

В модели AGROTOOL в качестве регулирующих факторов выступают температурный и водный режимы. При этом в основу модели положены следующие известные факты.

Ведущим в формировании скорости развития растений является температурный режим. Развитие ускоряется при повышении температуры выше определенного порога, так называемого «биологического нуля». Однако слишком высокие температуры замедляют развитие. Что же касается водного режима, то стресс по влаге ускоряет развитие от фазы всходов до цветения и замедляет развитие от сева (посадки) до всходов и от цветения до полного созревания. Длительность светового дня в определенных условиях оказывает решающее влияние для перехода растения на генеративный путь развития. Однако при выращивании растений в тех же широтах, где они и были выведены, фотопериодическую реакцию, как правило, во внимание не принимают, поэтому блок фотопериодизма не включен в большинство современных прикладных моделей агроэкосистем.

Рассмотрим математические соотношения, позволяющие определять даты наступления фенофаз [16]. В модели AGROTOOL физиологическое

время измеряется в градусо-днях, а приращение физиологического времени в день  $k$  вычисляется по формуле:

$$\Delta\tau_0(k) = \begin{cases} (T_{av}(k) - T_0) & \text{при } T_{av}(k) \geq T_0, \\ 0 & \text{при } T_{av}(k) \leq T_0, \end{cases} \quad (2.2)$$

где  $T_{av}(k)$  – среднесуточная температура воздуха в день  $k$ ,  $k = \overline{1, 365}$ ;  $T_0$  – биологический нуль.

Это соотношение описывает только ускорение развития при увеличении температуры воздуха выше порогового значения  $T_0$ . Однако оно не отражает влияния на развитие высоких температур и влажности почвы. В алгоритме модели Agrotool эти эффекты учтены. Так, например, вводится функция стресса, отражающая влияние на этот процесс водного дефицита. В результате приращение физиологического времени в день  $k$  вычисляется по формуле

$$\Delta\tau(k) = \Delta\tau_0(1 - \Delta\tau_0/c_1) \cdot \text{Str}(\psi_s), \quad (2.3)$$

$c_1$  – некоторая константа;  $\psi_s$  – потенциал воды в почве; функция  $\text{Str}(\psi_s)$  отражает влияние водного дефицита и имеет вид:

$$\text{Str}(\psi_s) = \begin{cases} 1, & \text{если } \psi_s \geq \psi_{opt}, \\ 1 + (S_0 - 1) \frac{\psi_s - \psi_{opt}}{\psi_w - \psi_{opt}}, & \text{если } \psi_s \leq \psi_{opt}, \end{cases} \quad (2.4)$$

где  $\psi_w$  – потенциал воды в почве, соответствующий влажности завядания.

Величина прироста биологического времени (2.3) суммируется по дням

$$\tau(k) = \sum_{j=k_0}^k \Delta\tau(j), \quad (2.5)$$

где  $k_0$  – номер дня сева;  $k$  – номер текущего дня. Очередная фаза наступает при достижении величиной  $\tau(k)$  некоторого порогового значения  $T_{Ph}(IPh)$ , зависящего от порядкового номера фазы  $IPh$ :

$$\tau(k) \geq T_{Ph}(IPh), \quad (2.6)$$



т.е. в том случае, когда в ходе вегетации значение  $\tau(k)$  впервые достигает порогового значения  $T_{Ph}(IPh)$  (или впервые превышает его), порядковый номер фазы увеличивается на единицу. Соотношения (2.2)–(2.6) представляют собой алгоритм смены фаз развития, реализованный в AGROTOOL.

В формулы (2.2)–(2.6), отражающие влияние условий вегетации на скорость развития, входят переменные – среднесуточная температура воздуха  $T_{av}$  и осредненный по корнеобитаемому слою водный потенциал почвы  $\psi_s$ , а также пять параметров –  $T_0$ ,  $c_1$ ,  $\psi_{opt}$ ,  $S_0$  и  $T_{Ph}$ . Все эти параметры зависят от номера фазы развития  $IPh$ .

Таким образом, в модели имеется следующий набор параметров, управляющих темпами развития полевых культур и подлежащих определению для каждой фенофазы  $IPh$  в отдельности:

$T_0$  – температурные пороги по межфазным периодам, или биологические нули,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $c_1$  – параметры теплового перегрева растений,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\psi_{opt}$  – параметры теплового перегрева растений (пороговые значения потенциала почвенной влаги), или граница комфортной зоны по водному потенциалу почвы, см;  $S_0$  – коэффициент водного стресса, б/р;  $T_{Ph}$  – пороги биологического времени, переключающие фазы (порог смены фенофаз), градусо-дни.

### **2.2.3. Идентификация параметров блока продуктивности растений**

В модель включен блок моделирования газообмена (фотосинтеза и фотодыхания). В совокупности с блоками развития и роста они определяют продуктивность культуры. Однако, как показал опыт эксплуатации модели в разных почвенно-климатических условиях, настройки параметров, входящих в эти блоки, недостаточно для воспроизводства в модели адекватных реакций на почвенные и погодные условия, а также на технологию возделывания культуры. Для учета вариабельности погоды по режиму осадков в модель включена специальная функция стресса. Аргументом функции стресса

является отношение суммы осадков (с начала счета) к суммарной эвапотранспирации:

$$SS(j) = \frac{\sum_{l=0}^j Pr(l)}{\sum_{l=0}^j (E_p(l) + E_s(l))},$$

где  $Pr(l)$  – осадки в день  $l$ ;  $E_p(l)$  и  $E_s(l)$  – соответственно транспирация растений и физическое испарение, а суммирование начинается с момента всходов. Эта величина представляет собой разрывную функцию, скачкообразно меняющуюся от шага к шагу модели. Поэтому ее приходится сглаживать:

$$SS(j) = Q \cdot SS(j-1) + (1-Q) \cdot S(j),$$

и именно эту величину использовать в качестве входной величины функций стресса.

Функция стресса, учитывающая как условия засухи, так и переувлажнения имеет следующий вид:

$$W_{str} - W(j) = k_0 + k_1 \cdot SS(j) + k_2 \cdot SS^2(j),$$

и для ее включения в продукционный процесс следует умножить на эту функцию суточную сумму прироста первичных ассимилятов:

$$\Delta B^{(1)} = \Delta B \cdot W_{str} - B(SS),$$

где  $\Delta B$  – сумма первичных ассимилятов, накопленных за шаг счета;  $\Delta B^{(1)}$  – соответствующая скорректированная величина. Таким образом, в модели появились три произвольных коэффициента:  $k_0$ ,  $k_1$  и  $k_2$ . Именно они и выбраны в качестве настроечных параметров, учитывающих неоптимальность водного режима посева.

## **2.3. Анализ результатов идентификации параметров блоков модели**

### **1. Результаты идентификации параметров блока динамики почвенной влаги**

Коэффициент фильтрации  $Kf$  и показатель степени  $C$  в функции влагопроводности почвы (п. 2.2.1) определяются в процессе идентификации в два этапа. На первом этапе накапливается статистика по динамике влажности в почве в течение вегетационного периода процедурой поливариантных расчетов за несколько лет вегетации при помощи многократных компьютерных экспериментов и находятся предварительные интервалы изменения коэффициента фильтрации. На втором этапе решается задача оптимизации оценок векторов  $Kf$  и  $C$ , исходя из условий минимизации вариации величин  $\theta(i, j)$ :

$$V(Kf, C) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} (\theta_{soil}(i, j) - \theta_{real}(i, j))^2 \rightarrow \min_{Kf, C \in P}, \quad (2.7)$$

$\theta_{real}(i, j)$  – фактические значения влагозапаса,  $\theta_{soil}(i, j)$  – расчетные значения,  $i$  – номер года,  $m$  – общее число лет, за которые производится компьютерный эксперимент,  $j$  – число фактических замеров влагозапаса в почве в течение  $m$  лет.

В качестве примера в приложении 1 приведены результаты численных экспериментов – значения невязок (расхождение между экспериментальными данными и расчетными) для тяжелосуглинистых почв Алтайского Приобья.

В совокупности было проведено более 2500 вариантов расчетов по модели.

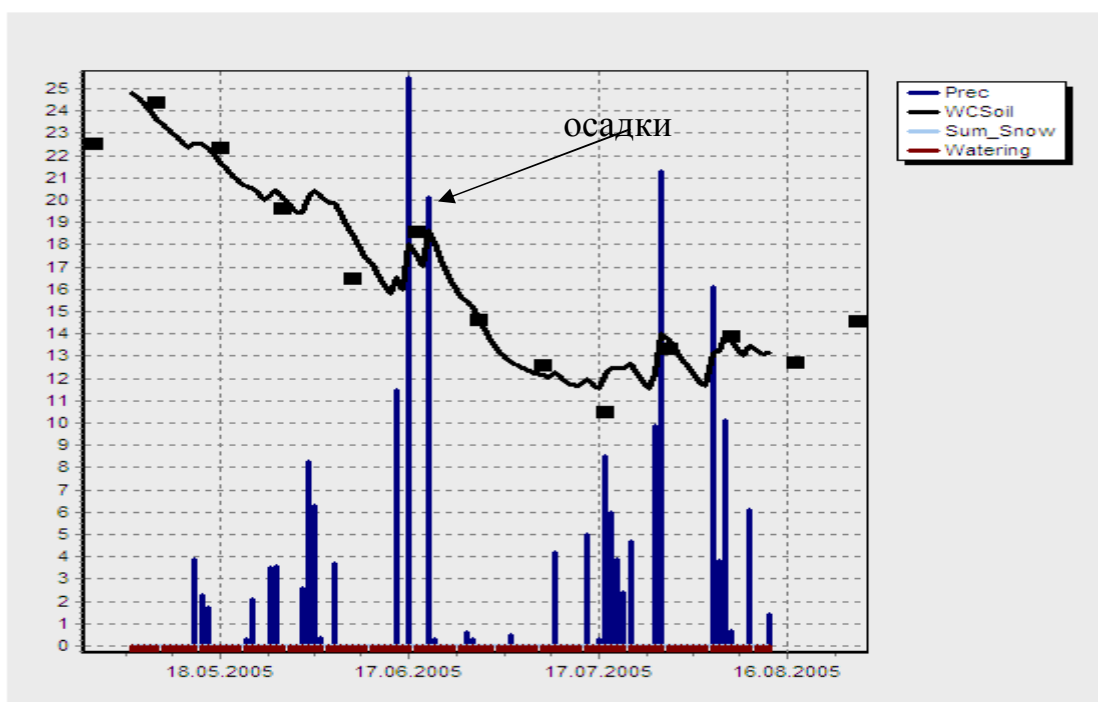


Рисунок 2.5 – Динамика влагозапасов (ОПХ им. Докучаева, 2005 г.):  
сплошная линия – влагозапас, рассчитанный по модели; ■ –  
экспериментальные значения

Для иллюстрации точности расчетов, достигнутых в результате оптимизационной процедуры (2.7), на рисунке 2.5. представлены экспериментальные и расчетные данные по динамике влагозапаса в почве под посевом яровой пшеницы.

При идентификации параметров блока динамики почвенной влаги было выявлено, что среди почв с текстурой суглинок средний и суглинок тяжелый выделены почвы с текстурой – суглинок. Что существенно повысило качество идентификации.

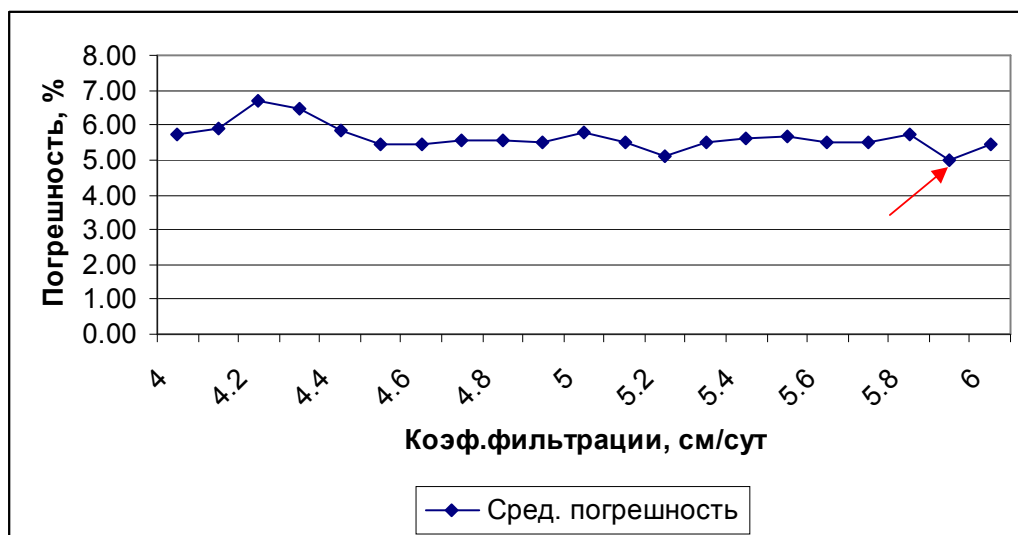


Рисунок 2.6 – График средней относительной погрешности вычисления запасов влаги в почве в зависимости от величины коэффициента фильтрации,  $C=1,1$  (суглинок тяжелый)

Для *тяжелосуглинистых почв* минимальная средняя погрешность по формуле (2.7) – составила 5,4% при оптимальных значениях  $K_f=5,9$  и  $C=1,1$ . График средней относительной погрешности приведен на рисунке 2.6.

Для *суглинистых почв* минимальная погрешность составила 7% при оптимальных значениях  $K_f=61,2$  и  $C=1,4$ . График средней относительной погрешности приведен на рисунке 2.7.

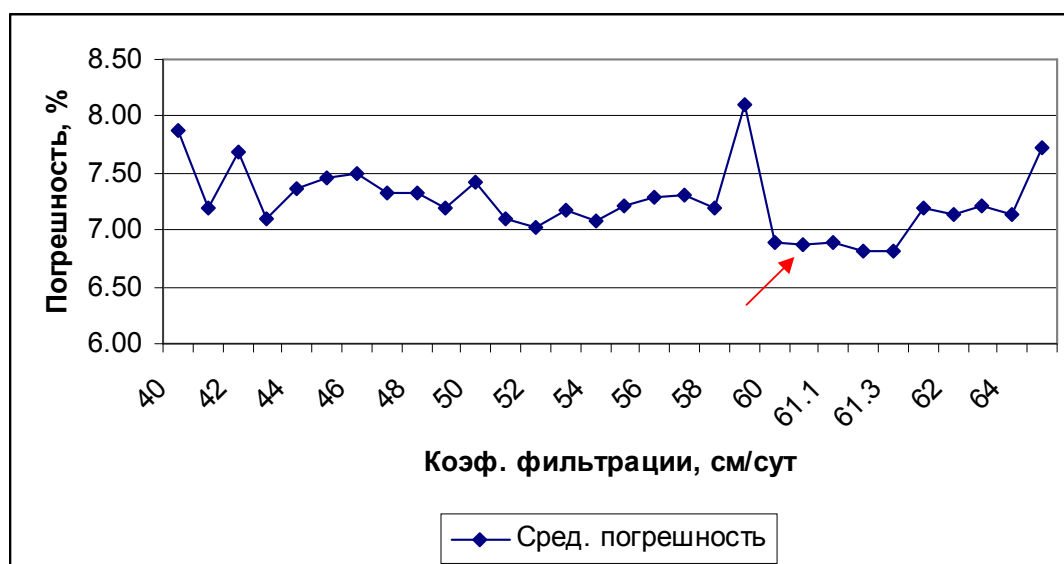


Рисунок 2.7 – График средней относительной погрешности вычисления запасов влаги в почве в зависимости от величины коэффициента фильтрации,  $C=1,4$  (суглинок)

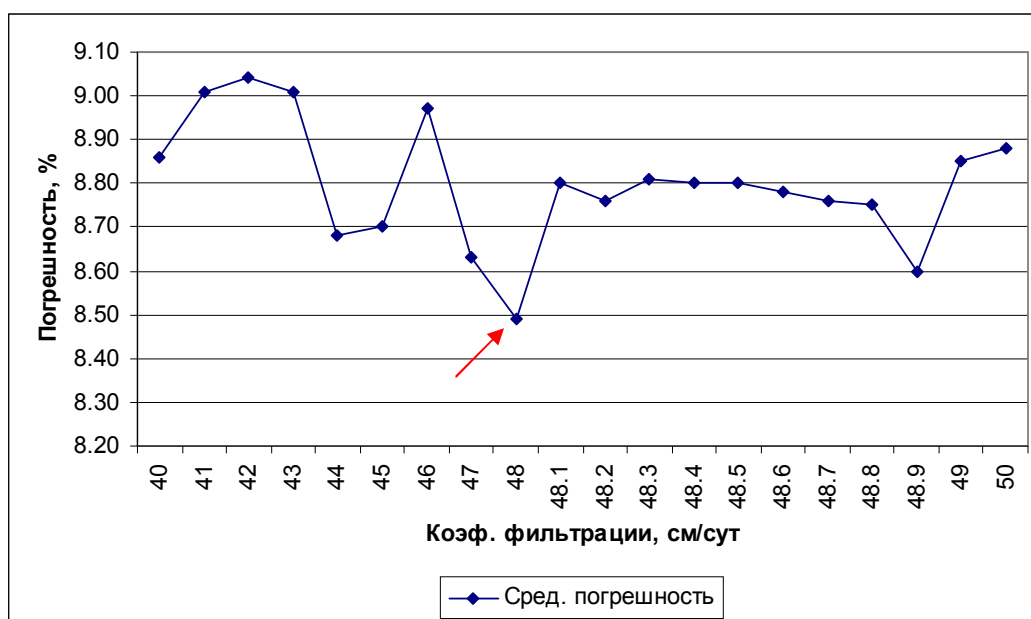


Рисунок 2.8 – График средней относительной погрешности вычисления запасов влаги в почве в зависимости от величины коэффициента фильтрации,  $C=1,7$  (суглинок средний)

Для среднесуглинистых почв минимальная погрешность составила 8,5% при оптимальных значениях  $K_f=48$  и  $C=1,7$ . График средней относительной погрешности приведен на рисунке 2.8.

Для иллюстрации качества идентификации блока на рисунках 2.9 и 2.10 приведена динамика влагозапаса (2005 г) до идентификации и после.

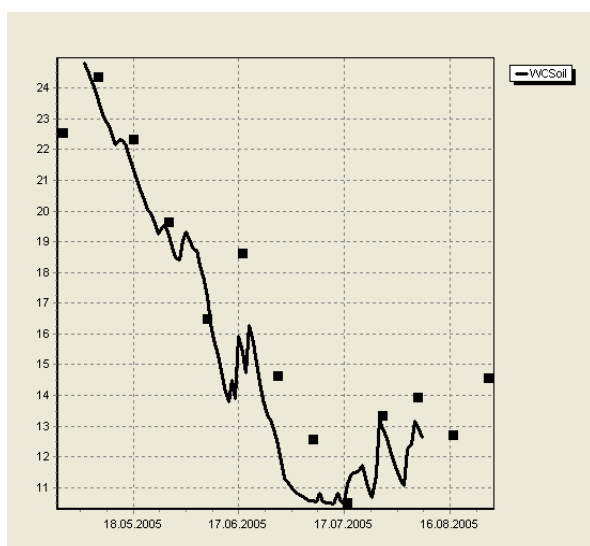


Рисунок 2.9 – Динамика влагозапаса до идентификации

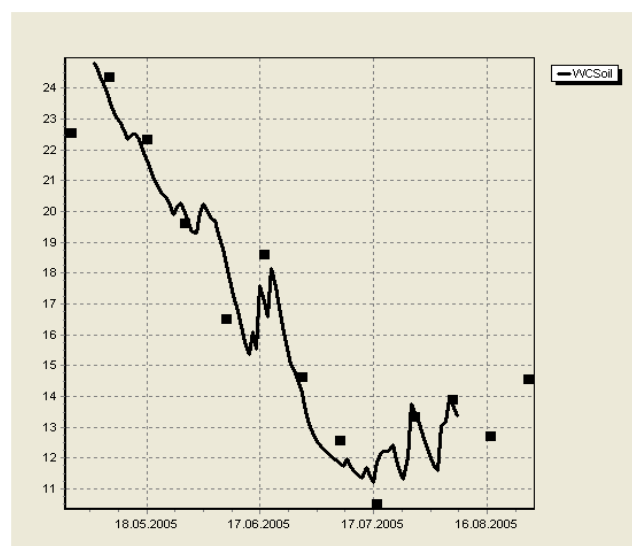


Рисунок 2.10 – Динамика влагозапаса после идентификации

## 2. Результаты идентификации параметров блока фенологического развития

В модели AGROTOOL для яровой пшеницы фиксируются следующие фенологические фазы: всходы, кущение, выход в трубку, колошение, цветение, молочная спелость, восковая спелость, полная спелость.

При идентификации биологических порогов определялось минимальное расхождение между расчетными и фактическими датами наступления фенофаз.

В приложении 2 приведены фактические и расчетные даты наступления фенофаз. Для нахождения минимальных расхождений между фактическими и модельными значениями биологических порогов составлено дополнительно приложение 3 – расхождения в датах по всем годам. Фиксировались те значения биологических порогов (столбцы *Biopog*) которые давали наименьшее расхождение (как в сторону ранних сроков, так и поздних). Разброс в сроках от -3 до +3 считается приемлемым. Это объясняется установленной процедурой фиксации сроков наступления фенологических фаз: за полное наступление фазы принимается тот день, в который данная фаза наступает не менее чем у 50% учтенных растений.

Таблица 2.1

### Результаты идентификации пороговых значений

Название фазы	Пороговые значения
Всходы	82
Кущение	176
Выход в трубку	214,2
Колошение	363,4
Цветение	420
Молочная спелость	540
Восковая спелость	700
Полная спелость	805

Поэтому, как следует из приложения 3 определение биологических порогов для фаз №1 – №8 можно признать достаточно качественным. Выбросы – большие расхождения в сроках фактических и модельных,

наблюдаются всего в четырех ячейках таблицы. В таблице 2.1 приведены полученные значения биологических порогов.

Для иллюстрации точности расчетов, достигнутых в процессе идентификации блока фенологии, на рисунках 2.10 и 2.11 представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных по фазам.

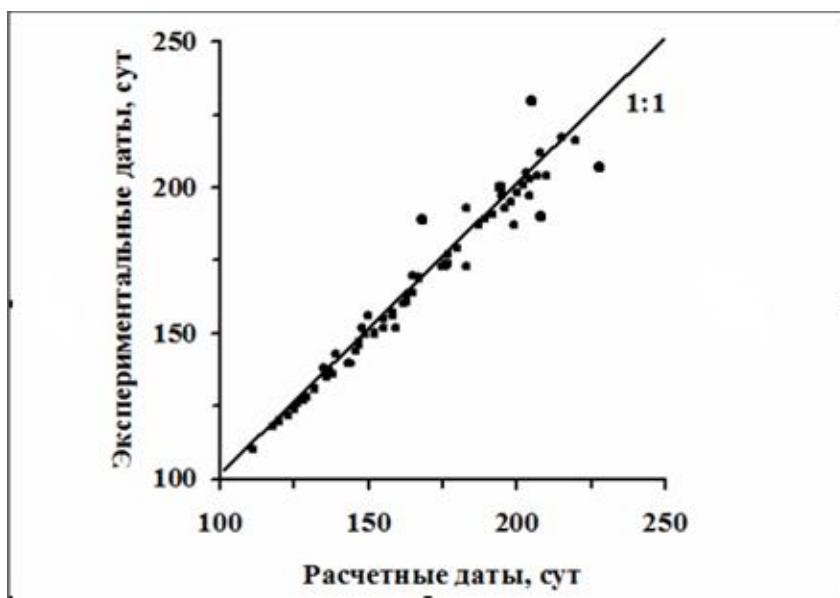


Рисунок 2.10 – Расчетные и экспериментальные даты наступления фенофаз (на осях отложены номера дней по Юлианскому календарю)

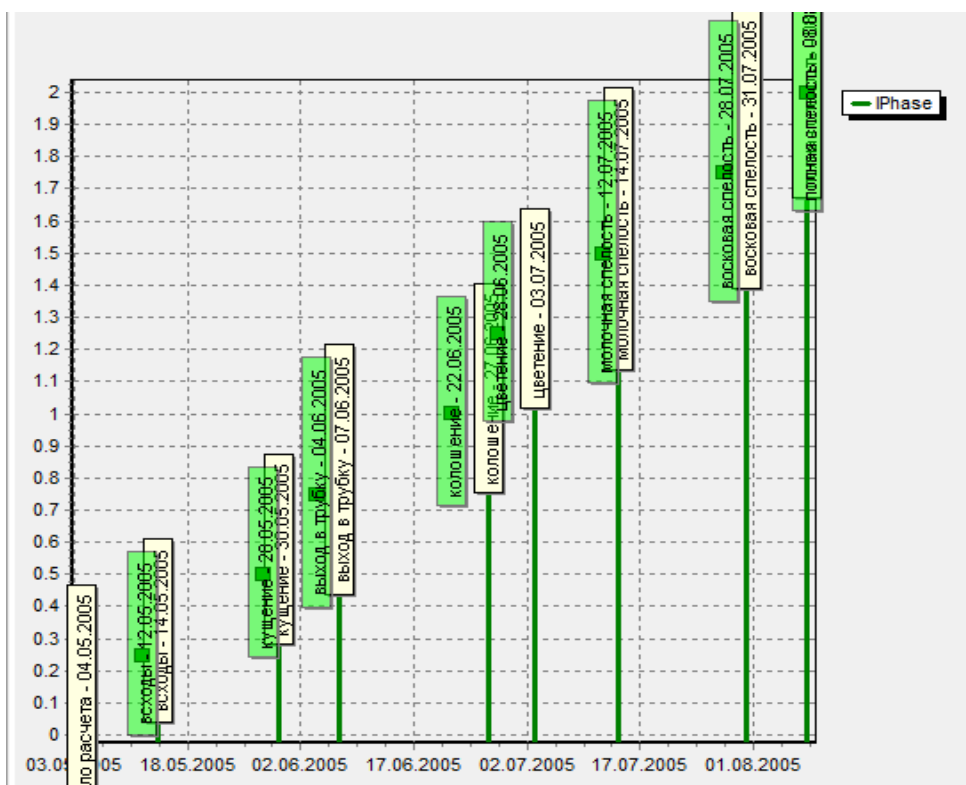


Рисунок 2.11 – Визуализация расчетных и экспериментальных дат наступления фенофаз



### 3. Результаты идентификации параметров блока продуктивности растений

Результатом окончательной идентификации параметров модели является величина урожайности культуры.

При идентификации блока продуктивности растений так же определялось минимальное расхождение между расчетными и фактическими величинами урожайности яровой пшенице. На рисунке 2.12 приведена урожайность яровой пшеницы по годам до идентификации,

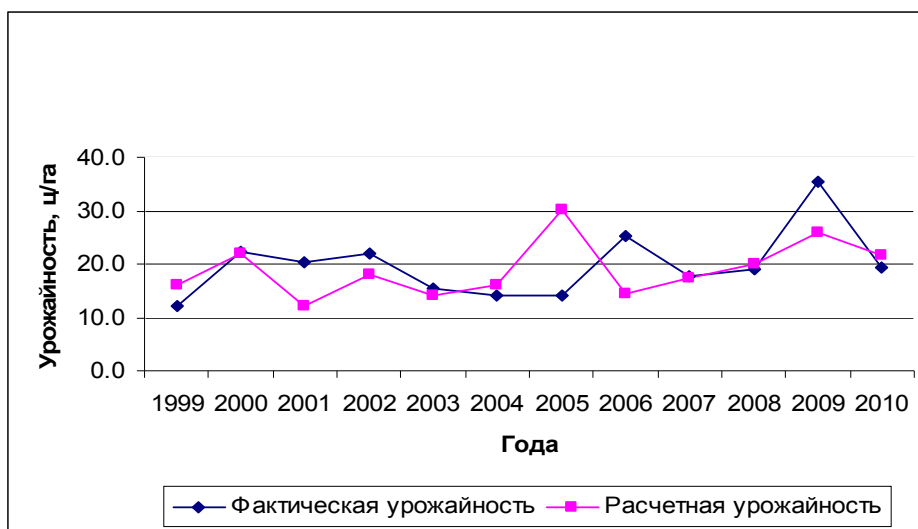


Рисунок 2.12 – Расчетная и фактическая величина урожайности до идентификации

на рисунке 2.13 после идентификации блока продуктивности растений.

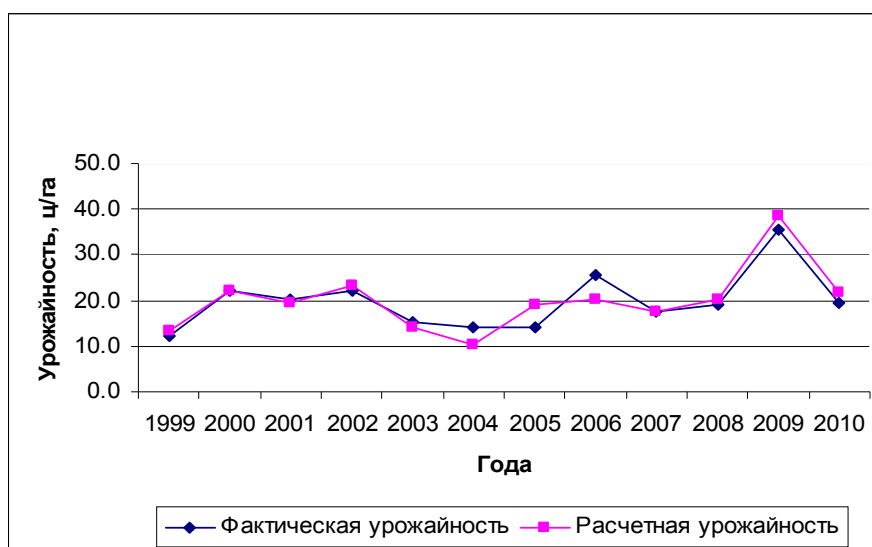


Рисунок 2.13 – Расчетная и фактическая величина урожайности после идентификации

Определение коэффициентов  $k_0$ ,  $k_1$  и  $k_2$  в блоке продуктивности (п. 2.2.3) осуществлялось процедурой «идентификация урожая». Она заключается в следующем. Первоначально для коэффициентов  $k_i$  выбираются граничные значения и число градаций. Максимальное число градаций выбрано 3, так что полный перебор всех комбинаций составляет  $3^3=27$ . Выбирается конкретный год счета. Для этого года перебираются все комбинации, сравнивая расчетный урожай с фактическим урожаем данного года и вычисляя невязку. Эта процедура повторяется для всех лет, выбранных для идентификации. В результате формируется файл в виде двумерной таблицы, столбцы которой соответствуют годам, а строки – комбинациям значений  $k_0$ ,  $k_1$  и  $k_2$ . Выбор оптимальной комбинации производится по принципу минимакса: в каждой строке находится максимальная по модулю невязка, а в качестве оптимальной выбирается та строка, для которой этот максимум является минимальным. В случае, когда полученная ошибка не является удовлетворительной, назначаются новые значения коэффициентов вблизи тех, которые найдены на предыдущем шаге, и процедура повторяется.

Для ОПХ им. Докучаева Алтайского края расчетные и фактические величины урожаев яровой пшеницы представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Расчетные и экспериментальные величины урожаев после  
идентификации, ц/га

Урожайность		
Годы	Фактическая	Расчетная
1999	12,2	13,2
2000	22,2	22,0
2001	20,2	19,6
2002	22,1	23,3
2003	15,4	14,1
2004	14,1	10,2
2005	14,1	19,0
2006	25,4	20,4
2007	17,6	17,4
2008	18,9	20,1
2009	35,5	38,5
2010	19,4	21,6

Средняя относительная погрешность расчетной величины урожайности составила 12%.

**Выводы.** По результатам проведенной идентификации можно сделать следующие выводы: блоки динамики почвенной влаги и фазы развития модели AGROTOOL достаточно хорошо идентифицируются по данным региона. Блок продуктивности растений требует модификации. Необходимо осуществлять оценку урожайности в зависимости от типа почв и сорта культуры.

## ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 3.1. Исследование чувствительности модели к почвенно-гидрологическим параметрам

Почва в модели рассматривается как среда, неоднородная по своим гидрофизическим свойствам. Гидрофизические свойства каждого слоя почвы характеризуются следующими параметрами: максимальной гигроскопичностью (МГ), влажностью завядания (ВЗ), наименьшей влагоемкостью (НВ) и влажностью насыщения (ПВ).

Именно они определяют форму зависимости потенциала почвенной влаги  $P$  от влажности почвы  $\theta$ , являющейся основной гидрофизической характеристикой (ОГХ) почвы:

$$\theta(P) = \text{МГ} + \frac{\text{ПВ} - \text{МГ}}{1 + b(-P)^a}. \quad (3.1)$$

На рисунке 3.1 приведены результаты расчета динамики почвенной влаги при вариации наименьшей влагоемкости почвы (НВ). Данные на графиках относятся к модели яровой пшеницы (2002 год, АНИИСХ им. Докучаева, Алтайский край). Траектории соответствуют базовому значению НВ и значению, измененному на  $\pm 10\%$ .

Из рисунка 3.1 видно, что увеличение НВ приводит к росту влагозапасов в метровом слое почвы в начальный период вегетации, которое постепенно сглаживается к концу этого периода. Уменьшение этого параметра приводит к уменьшению влагозапасов в течение всего вегетационного периода.

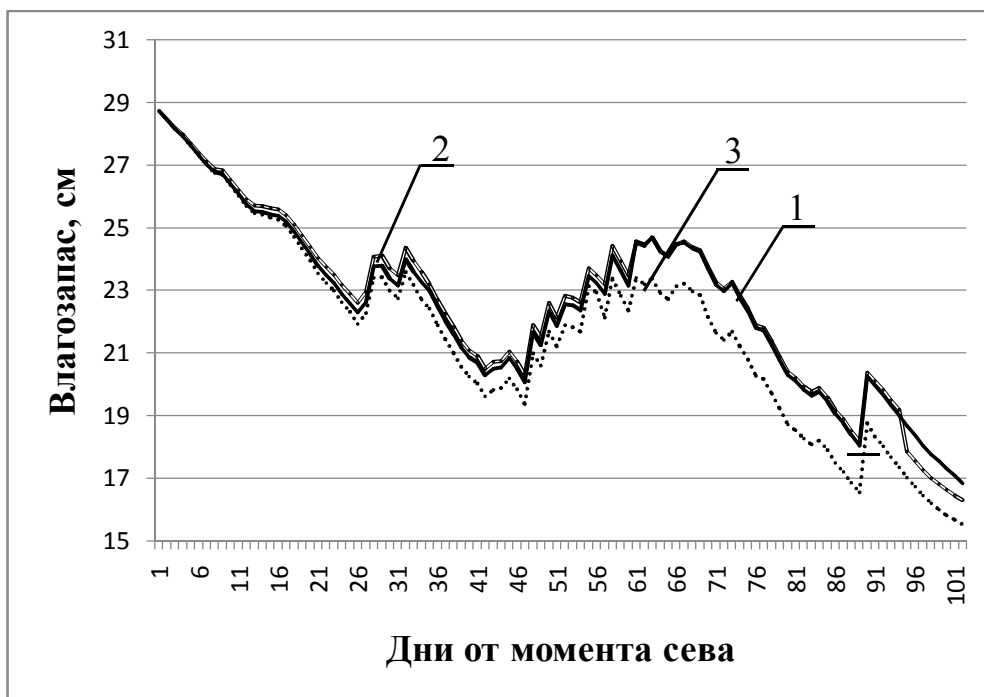


Рисунок 3.1 – Влияние изменения НВ почвы на динамику влагозапаса: 1 – влагозапас при базовом значении НВ; 2 – влагозапас при НВ, увеличенной на 10%; 3 – влагозапас при НВ, уменьшенной на 10%

При увеличении НВ заметно уменьшаются биомассы стеблей и зерна (рисунок 3.2). По результатам расчетов биомассы корней и листьев практически не изменяются.

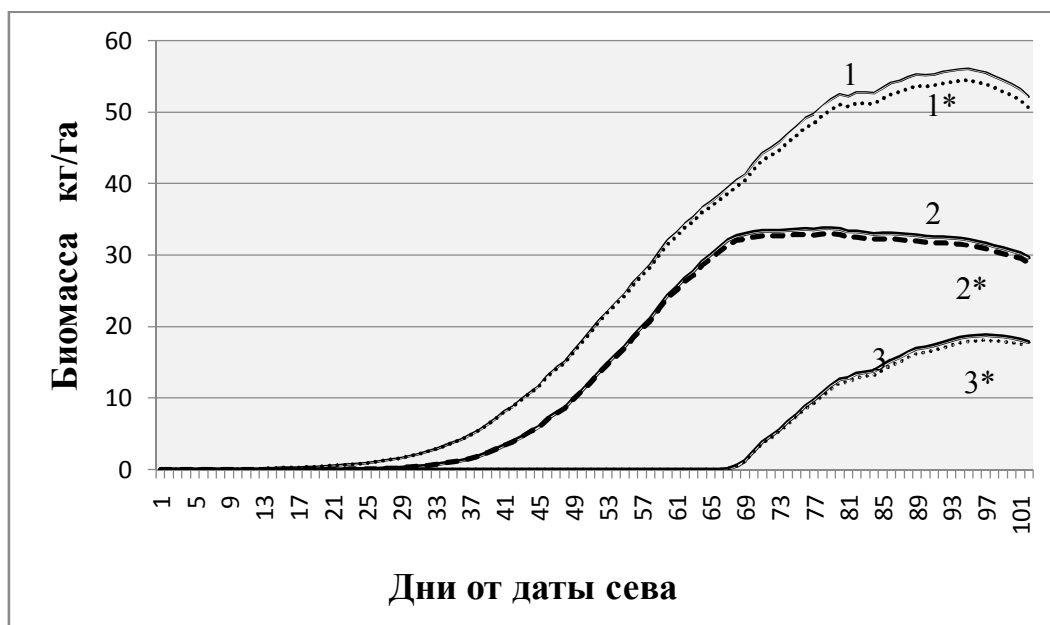


Рисунок 3.2 – Влияние величины НВ почвы на биомассу: 1 – суммарная биомасса; 2 – биомасса стеблей; 3 – биомасса зерна; \* – биомасса, полученная при увеличении НВ на 10%

### 3.2. Чувствительность модели к вариации начального влагозапаса

Для изучения чувствительности модели к вариации начального влагозапаса следует в исходных данных модели варьировать величину начального влагозапаса. Для этого был организован следующий компьютерный эксперимент: исходную величину (начальный влагозапас) варьировали как в сторону увеличения, так и уменьшения на 50%, 20%, 10%. В компьютерном эксперименте фиксировались величины урожая (ц/га). Результаты расчета урожайности приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Зависимость урожайности яровой пшеницы от начального влагозапаса

Год	Нач. влагозапас	Урож.факт.	Урож. после	-50%	-20%	-10%	10%	20%
				Урож.	Урож.	Урож.	Урож.	Урож.
1999	25	12,2	13,2	12,45	12,66	13,13	13,37	13,52
2001	24,70	20,2	19,6	16,86	17,77	18,83	19,83	20,21
2002	29	22,1	23,3	8,47	14,85	20,94	25,18	25,69
2003	27,3	15,4	14,1	14,44	15,34	14,13	14,04	13,98
2004	24,2	14,1	10,2	9,52	9,21	9,64	10,49	10,77
2005	25	14,1	19,0	15,61	17,41	18,07	19,75	20,13
2006	26	25,4	20,4	21,16	19,87	20,2	20,45	20,5
2007	30	17,6	17,4	3,78	10,06	14,99	18,51	18,69

Для иллюстрации на рисунке 3.3 представлена величина урожайности яровой пшеницы при изменении начального влагозапаса.

Из рисунка 3.3 следует, что увеличение начального влагозапаса положительно влияет на урожайность яровой пшеницы, что является, бесспорно, известным фактом и лишь подтверждает адекватность модели. Но с другой стороны, погрешность в задании величины начального влагозапаса может привести к неверным прогнозным значениям величины урожая.

Из всех исследованных почвенно-гидрофизических параметров наибольшее влияния на продуктивность яровой пшеницы оказывает параметр НВ. Это означает, что к экспериментальному определению параметра НВ необходимо предъявлять наиболее строгие требования.

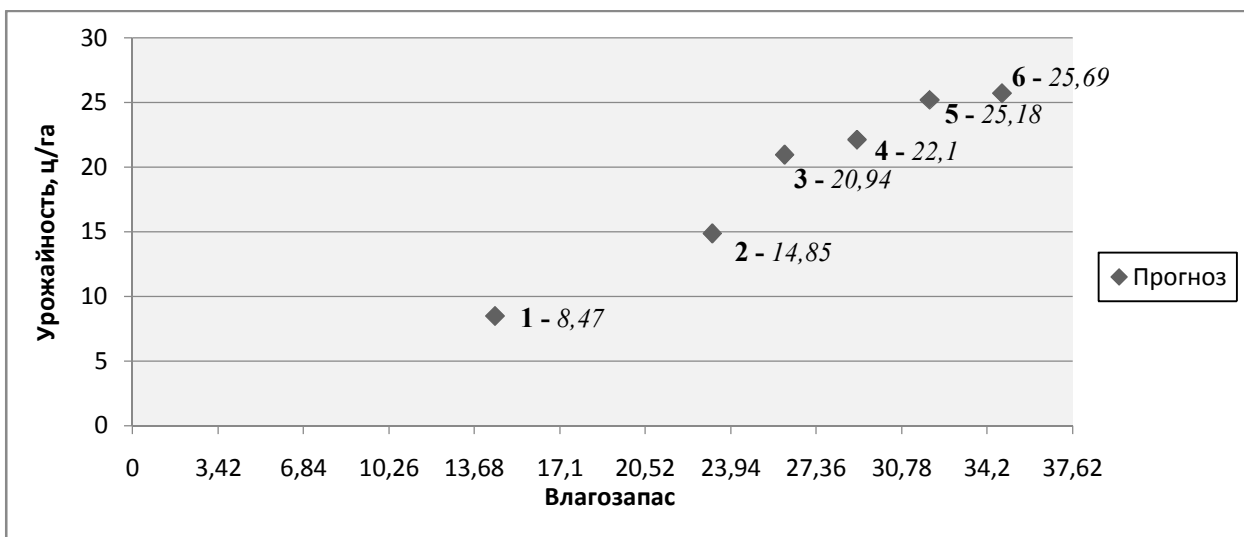


Рисунок 3.3 – Влияние величины начального влагозапаса на урожайность (2002 г).

Соответствие цифры на рисунке величине начального влагозапаса: 1 – расчетная урожайность 8,47 (фактическая урожайность – 8,5 ц/га, начальный влагозапас – 14,5); 2 – расчетная урожайность 14,85 (фактическая урожайность 14,9 ц/га, начальный влагозапас – 23,2); и т.д.

Процедура анализа на чувствительность была осуществлена и к вариациям начальных значений параметров модели.

### 3.3. Чувствительность модели к вариации даты сева

Рассмотрим влияние вариации даты сева на величину урожая. В качестве варьируемого параметра будет выступать дата сева. В эксперименте оценивалось влияние даты сева на величину урожая. Исходную величину варьировали для ситуации раннего сева (-5 дней, -2 дня) и позднего сева (+2 дня, +5 дней) в зависимости от даты сева по каждому году. В таблице 3.2 представлены результаты исследования.

На рисунке 3.4 приведено влияние даты сева на урожайность пшеницы. Результаты исследования позволяют определить оптимальную дату сева с целью получения наивысшей урожайности в условиях региона.

Таблице 3.2.

## Влияние даты сева на величину урожая

Год	Дата сева	Урож. факт.	Урож. после идентификации	Ранний сев		Поздний сев	
				-5	-2	2	5
1999	07.05.1999	12,2	13,2	14,2	13,32	12,17	11,23
2001	15.05.2001	20,2	19,6	31,93	20,99	18,7	16,44
2002	02.05.2002	22,1	23,3	30,72	24,58	23,05	21,92
2003	08.05.2003	15,4	14,1	17,66	15,37	14,9	14,9
2004	06.05.2004	14,1	10,2	12,38	11,28	9,28	7,1
2005	04.05.2005	14,1	19,0	18,88	18,55	19,47	15,78
2006	16.05.2006	25,4	20,4	40,27	22,88	21,18	19,44
2007	29.04.2007	17,6	17,4	38,97	36,95	32,39	32,45

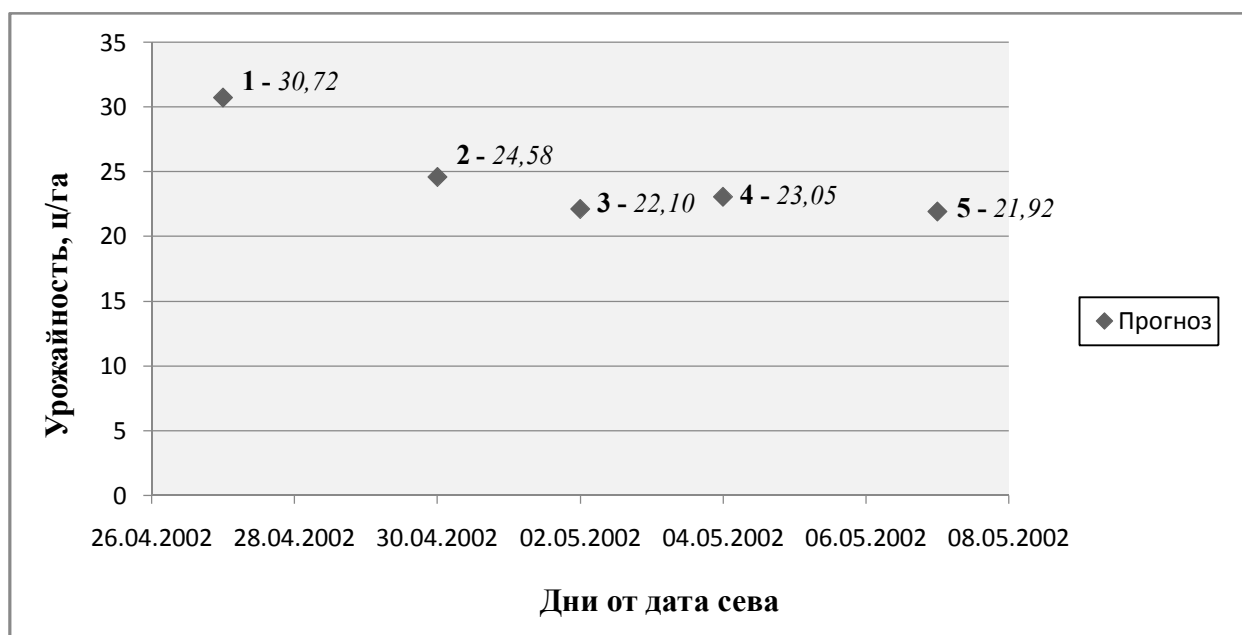


Рисунок 3.4 – Влияние даты сева на урожайность пшеницы (2002 г.). Соответствие цифры на рисунке дате сева: 1 – дата сева 27.04 (урожайность 30,7 ц/га); 2 – дата сева 30.04 (урожайность 24,6 ц/га); и т.д.

### 3.4. Определение допустимых границ изменения параметров

Важной практической задачей в процедуре исследования чувствительности модели к вариациям входящих в нее параметров является задача определения допустимых границ изменения параметров блоков. Решение этой задачи осуществлялось с помощью методов теории



чувствительности (метод прямого моделирования и метод оценок вариаций). В процессе исследования определены функции чувствительности модели как функции влияния изменений параметров на решение задачи. Для **блока водного режима** показано, что для тяжелосуглинистых почв допустимый интервал изменения коэффициента фильтрации  $K_f$  – (4.0–6.0); значения  $C$  не только сильно влияют на динамику влажности почвы, но и на величину урожая и поэтому требования к величине  $C$  достаточно жесткие:  $C = 1.1$ . Аналогичная ситуация наблюдается и для суглинистых почв:  $K_f$  – (50–65),  $C = 1.4$  и для среднесуглинистых почв  $K_f$  – (40–50),  $C = 1.7$ .

Для **блока фенологического развития** допустимой является погрешность в установлении факта смены фенофаз до двух – трех дней.

За начало фазы принято считать день ее наступления не менее, чем у 10% растений, а за массовое наступление фазы – не менее, чем у 50% растений. Бывают случаи, когда при дружном развитии растений начало и массовое наступление фазы приходятся на один и тот же день.

Под межфазным периодом времени будем понимать отрезок физического времени от момента полного наступления первой из входящих в него фенологических фаз до момента полного наступления второй. За полное наступление фазы принимается тот день, в который данная фаза наступает не менее, чем у 50% учтенных растений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования реализована **цель магистерской диссертации** – проведен анализ чувствительности модели продукционного процесса сельскохозяйственных растений AGROTOOL к вариациям входящих в нее параметров и определены допустимые диапазоны погрешности задания параметров.

Решены следующие задачи:

1) изучена теоретическая база анализа моделей на чувствительность: степень разработанности проблемы, обзор и анализ методов структурно-параметрической идентификации и анализа моделей на чувствительность;

2) проведено исследование чувствительности модели AGROTOOL к изменению параметров и выработка на этой основе комплекса требований к информационному обеспечению модели;

3) осуществлена формулировка требований к точности задания параметров модели, определение допустимого диапазона погрешности задания параметров.

4) на основе результатов численных расчетов, проведенных по модели продуктивности AGROTOOL, сделан вывод о качестве проведенного исследования.

Многочисленные численные эксперименты с использованием оптимизационных процедур идентификации и анализа модели на чувствительность позволили разработать критерии точности задания областей допустимых значений параметров модели. Результаты проведенного исследования показали достаточно высокую эффективность описанного подхода и дали высокую качественную оценку применимости модели Agrotool для прогноза урожайности зерновых культур в условиях Алтайского края.

Основные **результаты исследования** представлены на следующих конференциях:

1. Международная конференция «Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования», Барнаул, 11–14.11.2014г.
2. XVI городская научно-практическая конференция молодых ученых «Молодежь-Барнаулу». Барнаул, 21-22 ноября 2014 г.
3. XVI Региональная конференция по математике «МАК-2014». Барнаул, 20 июня 2014 г.
4. VI Международная научно-практическая конференция «Информация и образование: границы коммуникаций – INFO'14». Горно-Алтайск (Республика Алтай), 8–12 июля 2014 г.
5. Международный семинар «Математические модели в теоретической экологии и земледелии». СПб., 14–16 октябрь 2014 г.
6. VI Международная молодежная научно-практическая конференция с элементами научной школы «Прикладная математика и фундаментальная информатика». Омск, 22–28 апреля 2014 г.
7. I-я Региональная молодежная конференция «Мой выбор – наука!» (XLI научная конференция студентов, магистрантов, аспирантов и учащихся лицейных классов). Барнаул, 24.04.2014 г.
8. XVII городская научно-практическая конференция молодых ученых «Молодежь-Барнаулу». Барнаул, 17-21 ноября 2015 г.
9. III-я Региональная молодежная конференция «Мой выбор – наука!» (XLIII научная конференция студентов, магистрантов, аспирантов и учащихся лицейных классов). Барнаул, 18.04–28.04.2016 г.
  - секция иностранных языков естественнонаучных факультетов;
  - секция прикладной математики и информационных технологий;
  - междисциплинарная секция «Теоретические и прикладные исследования в биологии и экологии».
10. VI Международная молодежная научно-практическая конференция с элементами научной школы «Прикладная математика и фундаментальная информатика». Омск, 22–30 апреля 2016 г.

11. XIX Всероссийская научно-практическая конференция «Математики – Алтайскому краю (МАК-2016)». Барнаул, 1-5 июля 2016 г.

Основные положения выпускной работы представлены в следующих публикациях:

1. Немчикова К.А. Идентификация параметров и исследование чувствительности модели продуктивности Agrotool // Прикладная математика и фундаментальная информатика. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014 г., № 1. С. 174–178.

2. Хворова Л.А., Немчикова К.А., Ломиворотов Д.П. Поиск глобального минимума в задачах параметрической идентификации // Известия АлтГУ. Барнаул, 2014 г. С. 130–134. (Журнал из списка ВАК)

3. Немчикова К.А., Хворова Л.А. Адаптация модели продуктивности сельскохозяйственных культур AGROTOOL к условиям Алтайского Приобья // Матер. VI Межд. науч.-практ. конф. «Информация и образование: границы коммуникаций» (INFO'14). Горно-Алтайск, 8–12 июля 2014 г. С. 158–162.

4. Немчикова К.А., Хворова Л.А. Идентифицируемость модели Agrotool: анализ результатов, проблемы, выводы // Материалы международного семинара «Математические модели в теоретической экологии и земледелии». СПб., 14–16 октябрь 2014. С. 16–19.

5. Немчикова К.А., Хворова Л.А. Решение задачи параметрической идентификации динамических моделей продуктивности агроэкосистем // Матер. XVI регион. конф. МАК-2014, Барнаул, 20 июня 2014 г. С. 126–123.

6. Немчикова К.А. Система имитационного моделирования Agrotool // Материалы международной конференции «Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования». Барнаул, 11–14 ноября 2014. С. 713–715.

7. Немчикова К.А. Поливариантный анализ модели Agrotool на чувствительность // Прикладная математика и фундаментальная информатика. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016 г. (в печати).

8. Немчилова К.А., Букасова А.К. Теоретические и практические аспекты анализа динамики модели продуктивности агроэкосистем на чувствительность // Сб. трудов XIX всеросс. науч.-прак. конф. по математике «МАК-2016», Барнаул, 1-5 июля 2016 г. (в печати).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агрогидрологические свойства почв юго-восточной части Западной Сибири. Справочник. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 548 с.
2. Анискина О.Г., Панин Б.Д. Исследование чувствительности дискретной прогностической модели с помощью уравнений в вариациях // Сб. научных трудов. – СПб.: ЛГМИ. Вып.114, 1992. – С. 3–11.
3. Бакаленко Б.И. Информационное обеспечение динамических моделей зерновых культур: дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – СПб., 2009. – 169 с.
4. Бондаренко Н.Ф., Жуковский Е.Е., Мушкин И.Г., Нерпин С.В., Полуэктов Р.А., Усков И.Б. Моделирование продуктивности агроэкосистем. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 264 с.
5. Брыксин В.М., Гавриловская Н.В., Топаж А.Г., Хворова Л.А. Математическое моделирование и информационные технологии в экологии и природопользовании. – Барнаул: Изд-во Алт.гос.ун-та, 2013. – 256 с.
6. Гавриловская Н.В., Гейль А.И., Хворова Л.А. Структурно-параметрическая идентификация модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур Agrotool // Материалы XIII регион. конф. по математике МАК 2010. – Барнаул, 2010. – С. 114–118.
7. Городецкий В.И., Захарин Ф.М., Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении. – Л.: Изд-во Энергия, 1971. – 344 с.
8. Денисов В.В. Идентификация агрометеорологических параметров имитационных моделей продукционного процесса зерновых культур: Дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Л., 1990. – 133 с.
9. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
10. Марчук Г. И. Численное решение задач динамики атмосфер и океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 304 с.

11. Медведев С.А. Разработка и применение системы поливариантного анализа динамических моделей продукционного процесса культурных растений: автореф. дис. д.т.н. – СПб., 2014. – 18 с.
12. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 348 с.
13. Пененко В.В. Оценка параметров дискретных моделей динамики атмосферы и океана. – Метеорология и гидрология, 1979. №7. С. 77-90.
14. Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистемы. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 312 с.
15. Полуэктов Р.А., Опарина И.В., Финтушал С.М. Прогнозирование темпов фенологического развития сельскохозяйственных растений // Физиология растений, 1997. Т.44, № 4. – С. 557–564.
16. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб.: Изд-во Спб. универ., 2006. – 396 с.
17. Райбман Н.С. Что такое идентификация? М.: Наука, 1970. – 120 с.
18. Райбман Н.С. Идентификация объектов управления (обзор) // Автоматика и телемеханика, 1979. №6. – С. 80–93.
19. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматлит, 2002. – 320 с.
20. Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л. Идентификация систем управления. – М.: Наука, 1974. – 248 с.
21. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 167 с.
22. Современные методы идентификации систем / Под ред. П. Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
23. Терлеев В.В., Полуэктов Р.А., Бакаленко Б.И. Структура информационного обеспечения модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур // Агрофизика, 2012. № 2. – С. 29–36.

24. Томович Р., Вукобратович М. Общая теория чувствительности. Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. – М., 1972. – 240 с.
25. Федоров В.Д., Гильманов Т.Г. Экология. – М.: Изд-во МГУ, 1980. – 464 с.
26. Хворова Л.А. Методы исследования чувствительности моделей продуктивности агроэкосистем // Известия АлтГУ, 2013. №1. – С. 128-132.
27. Хворова Л.А., Гавриловская Н.В., Гейль А.И. Информационное обеспечение и формирование базы данных для решения задачи адаптивной идентификации модели динамики почвенной влаги // Сбор. науч. трудов межрег. школы-семинара «Ломоносовские чтения на Алтае». – Барнаул: АлтГПА, 2010. Ч. I. – С. 259–263.
28. Хворова Л.А., Топаж А.Г. Динамическое моделирование и прогнозирование в агрометеорологии. – Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2010. – 263 с.
29. Шеин Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
30. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 686 с.
31. Юсупов Р.М. Развитие и состояние теории чувствительности в стране. Вопросы кибернетики. Теория чувствительности и ее применение. Вып. 23. – М.: Связь, 1977. – С. 6–15.
32. Глаголев М.В. Анализ чувствительности модели // ДОСиГИК. Т. 3. № 3. 2012. – URL:  
[http://www.ugrasu.ru/education/institutions/rec-environmental-dynamics-and-global-climate-change-the-unesco-chair/UNESCO\\_journal/docs/6 / EDCC\\_3\\_3\\_Glagolev.pdf](http://www.ugrasu.ru/education/institutions/rec-environmental-dynamics-and-global-climate-change-the-unesco-chair/UNESCO_journal/docs/6 / EDCC_3_3_Glagolev.pdf)  
(дата обращения: 24.06.2016).
33. Пененко В.В. Математические модели и методы природоохранного прогнозирования // ИВМиМГ СО РАН. №13. 2005. – URL:  
[http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/40601/50033/NikNik\\_90\\_Penenko.pdf](http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/40601/50033/NikNik_90_Penenko.pdf) (дата обращения: 24.06.2016).



34. Анискина О.Г. Исследование чувствительности гидродинамических моделей атмосферы: дисс. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук. – СПб., 2001. – URL:

<http://earthpapers.net/issledovanie-chuvstvitenosti-gidrodinamicheskikh-modeley-atmosfery> (дата обращения: 24.06.2016).

35. Волкова Е.В. Методы анализа чувствительности для моделей фильтрации и массопереноса в подземной гидросфере: дисс. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук. – М., 2009. – URL:

<http://davaiknam.ru/text/metodi-analiza-chuvstvitenosti-dlya-modelej-filtracii-i-mas> (дата обращения: 24.06.2016).

*Приложение 1*

Сводные данные идентификации параметров блока водного режима для тяжелосуглинистых почв

Kf см/сут	C	Годы										Среднее значение %
		2002		2003		2005		2007		2009		
		погр.,%	урож	погр.,%	урож	погр.,%	урож	погр.,%	урож	погр.,%	урож	
4.0	1.1	5.21	17.46	6.33	14.13	5.14	30,05	6.32	16.89	15.26	25.30	5.75
	1.2	6.3	16.66	11.18	14.16	8.93	29.62	10.03	16.04	10.64	23.60	9.11
	1.3	7.49	15.85	13.53	14.17	11.76	29.78	12.37	14.90	8.66	21.33	11.29
	1.4	7.66	15.1	15.73	14.17	14.20	29.44	13.81	13.60	7.96	19.14	12.85
	1.5	9.45	14.79	16.94	14.16	15.69	29.15	14.67	12.87	7.71	18.06	14.19
	1.6	11.23	14.28	17.32	14.15	16.12	28.87	15.33	11.78	7.55	17.41	15.00
<b>min</b>												5.75
4.1	1.1	5.27	17.49	6.45	14.12	5.18	30.07	6.67	17.07	15.20	25.35	5.89
	1.2	6.25	16.69	11.34	14.16	8.74	29.63	9.88	16.09	11.99	23.62	9.05
	1.3	7.4	15.86	14.07	14.17	11.48	29.79	12.41	14.98	8.95	21.39	11.34
	1.4	7.65	15.11	15.70	14.17	14.20	29.46	13.80	13.65	8.10	19.15	12.84
	1.5	8.49	14.71	16.88	14.16	14.82	29.13	14.62	12.91	7.73	18.05	13.70
<b>min</b>												5.89
4.2	1.1	7.95	17.42	6.91	14.12	5.31	30.10	6.55	17.09	15.65	25.36	6.68
	1.2	6.20	16.72	11.14	14.15	8.73	29.65	9.85	16.13	10.63	23.93	8.98
	1.3	7.57	15.91	13.80	14.17	11,67	29,28	12.34	15.03	8.76	21.53	11.35
	1.4	7.58	15.15	15.62	14.17	13.13	29.42	13.74	13.69	7.78	19.29	12.52
	1.5	8.46	14.73	16.89	14.16	15.70	29.17	14.59	12.96	7.71	18.12	13.91
	1.6	10.38	14.32	17.40	14.16	16.27	28.98	15.38	11.84	7.53	17.45	14.86
<b>min</b>												6.68
4.3	1.1	8.10	17.48	6.00	14.12	5.46	30.11	6.36	17.12	15.89	25.41	6.48
	1.2	6.06	16.72	11.10	14.15	8.27	29.67	9.75	16.17	11.09	23.98	8.80
	1.3	7.38	15.92	13.32	14.17	10.72	29.78	12.21	15.03	8.98	21.62	10.91
	1.4	7.57	15.18	15.62	14.17	13.33	29.44	13.74	13.76	8.49	19.30	12.57
	1.5	8.44	14.75	16.98	14.16	15.66	29.18	14.56	13.02	7.71	18.15	13.91
<b>min</b>												6.48

4.4	1.1	5.11	17.55	6.37	14.12	5.55	30,18	6.43	17.20	16.22	25.47	5.87
	1.2	5.78	16.73	10.77	14.15	8.10	29.67	9.51	16.23	11.09	24.04	8.54
	1.3	7.34	15.94	13.78	14.17	11.14	29.23	12.21	15.12	9.26	21.71	11.12
	1.4	8.57	15.37	15.61	14.17	13.44	29.46	13.32	13.78	7.57	19.40	12.74
	1.5	8.41	14.77	16.88	14.16	15.57	29.18	14.57	13.03	7.66	18.18	13.86
	1.6	9.86	14.31	17.41	14.16	16.59	29.00	15.29	11.98	7.54	17.49	14.79
<b>min</b>												5.87
4.5	1.1	5.04	17.58	6.30	14.12	5.19	30.14	5.27	17.10	18.16	25.50	5.45
	1.2	5.99	16.81	10.72	14.15	7.65	29.66	9.39	16.27	11.08	24.11	8.44
	1.3	7.34	15.96	13.62	14.17	11.14	29.27	11.93	15.15	9.14	21.80	11.01
	1.4	8.57	15.39	15.51	14.17	13.23	29.47	13.25	13.83	8.04	19.48	12.64
	1.5	9.26	14.80	16.88	14.16	14.65	29.16	14.40	13.04	7.78	18.27	13.80
<b>min</b>												5.45
4.6	1.1	5.00	14.80	6.25	14.12	5,23	30.15	5.17	17.12	15.92	25.55	5.44
	1.2	5.49	16.83	10.32	14.15	7.88	29.71	9.31	16,30	11.11	24.16	8.25
	1.3	7.26	15.99	12.35	14.18	11.62	29.30	11.83	15.18	9.22	21.89	10.77
	1.4	8.54	15.42	15.43	14.17	13.18	29.48	13.51	13.91	7.99	19.48	12.67
	1.5	8.43	14.88	16.73	14.16	14.67	29.17	14.36	13.07	7.81	18.29	13.55
	1.6	9.84	14.35	17.36	14.16	15.47	28.97	15.27	12.06	7.80	17.55	14.49
<b>min</b>												5.44
4.7	1.1	5.10	17.61	6.25	14.12	5.18	30.17	5.78	17.24	15.93	25.58	5.58
	1.2	5.54	16.82	10.77	14.15	7.76	29.70	9.24	16.34	12.95	24.19	8.33
	1.3	7.24	16.02	12.04	14.18	11.30	29.31	11.80	15.23	9.40	21.96	10.60
	1.4	8.51	15.46	15.44	14.17	12.61	29.47	13.46	13.95	8.01	19.53	12.51
	1.5	8.35	14.84	16.85	14.16	14.65	29.18	14.32	13.19	7.91	18.31	13.54
	1.6	9.82	14.37	17.35	14.16	16.65	29.02	15.24	12.10	7.89	17.57	14.77
<b>min</b>												5.58
4.8	1.1	6.54	17.58	6.21	14.11	4.87	30.19	5.68	17.26	17.07	25.60	5.83
	1.2	5.86	16.89	10.44	14.15	7.56	29.72	9.14	16.37	13.24	24.25	8.25
	1.3	7.31	16.05	12.22	14.18	10.06	29.25	11.85	15.31	10.14	22.05	10.36
	1.4	8.10	15.44	15.31	14.17	12.47	29.47	13.55	14.00	7.77	19.63	12.36
	1.5	8.20	14.86	16.56	14.16	15.00	29.20	14,6	13.23	7.81	18.33	13.51

	1.6	9.79	14.38	17.34	14.16	16.46	29.02	15.19	12.12	7.58	17.57	14.70
<b>min</b>												5.83
4.9	1.1	5.26	17.62	6.34	14.11	4.82	30.19	5.61	17.29	16.58	25.65	5.51
	1.2	5.91	16.93	9.97	14.15	7.56	29.74	8.97	16.40	14.74	24.30	8.10
	1.3	7.20	16.07	13.18	14.17	11.14	29.33	11.78	15.35	8.98	22.12	10.83
	1.4	8.09	15.45	15.25	14.17	13.49	29.56	13.35	14.00	8.13	19.69	12.55
	1.5	8.85	14.87	16.54	14.16	14.99	29.22	14.23	13.27	7.79	18.38	13.65
	1.6	9.90	14.46	17.31	14.16	16.35	29.02	15.22	12.17	7.09	17.58	14.70
<b>min</b>												5.51
5.0	1.1	6.48	17.62	6.12	14.10	4.78	30.20	5.81	17.34	17.27	25.66	5.80
	1.2	5.86	16.96	10.32	14.15	7.49	29.76	8.92	16.43	13.23	24.37	8.15
	1.3	7.16	16.08	12.97	14.17	10.49	29.32	11.76	15.33	8.95	22.20	10.60
	1.4	8.07	15.47	14.54	14.17	13.29	29.54	13.32	14.05	8.10	19.74	12.31
	1.5	10.17	15.01	16.51	14.16	14.62	29.22	14.18	13.31	7.77	18.40	13.87
	1.6	9.50	14.36	17.26	14.16	15.95	29.01	15.21	12.23	7.72	17.62	14.48
<b>min</b>												5.80
5.1	1.1	5.75	17.56	5.89	14.10	4.84	30.21	5.51	17.36	17.22	25.70	5.50
	1.2	5.40	16.98	10.21	14.15	7.23	29.77	8.87	16.46	11.77	24.43	7.93
	1.3	7.27	16.14	12.83	14.17	10.22	29.31	11.71	15.38	8.93	22.25	10.51
	1.4	8.42	15.54	14.52	14.17	13.18	29.56	13.30	14.13	8.10	19.80	12.36
	1.5	10.11	15.03	16.50	14.16	14.99	29.25	14.16	13.36	7.94	18.41	13.94
	1.6	9.47	14.37	17.26	14.16	16.35	29.04	15.22	12.28	7.95	17.64	14.58
<b>min</b>												5.50
5.2	1.1	4.54	17.72	6.00	14.10	4.95	30.23	5.12	17.35	18.05	25.73	5.10
	1.2	5.45	17.00	10.18	14.14	7.21	29.78	8.72	16.49	11.79	24.49	7.89
	1.3	7.23	16.16	11.95	14.17	10.21	29.33	11.56	15.46	9.46	22.32	10.24
	1.4	8.37	15.56	14.44	14.17	13.25	29.59	13.28	14.11	7.99	19.72	12.34
	1.5	10.09	15.04	16.48	14.16	14.87	29.26	14.13	13.40	8.12	18.44	13.89
	1.6	9.45	14.39	17.72	14.15	15.62	29.03	15.15	12.25	7.63	17.65	14.49
<b>min</b>												5.10
	1.1	5.82	17.68	6.23	14.10	5.05	30.23	4.87	17.35	18.36	25.76	5.49
	1.2	5.72	17.03	9.79	14.14	6.85	29.80	8.67	16.52	11.72	24.55	7.76

5.3	1.3	7.17	16.19	13.07	14.17	10.42	29.36	11.42	15.48	9.84	22.39	10.52
	1.4	8.36	15.57	14.41	14.17	12.50	29.58	13.20	14.15	7.65	19.84	12.12
	1.5	10.10	15.06	16.45	14.16	15.07	29.27	14.06	13.43	7.75	18.44	13.92
	1.6	9.43	14.41	17.63	14.15	15.53	29.03	15.12	12.29	7.64	17.67	14.43
<b>min</b>												5.49
5.4	1.1	5.85	17.69	6.11	14.10	5.07	30.24	5.43	17.42	19.78	25.76	5.62
	1.2	5.66	17.05	9.67	14.15	6.59	29.80	8.58	16.55	11.97	24.58	7.63
	1.3	6.95	16.19	12.91	14.17	9.88	29.34	11.02	15.50	9.78	22.46	10.19
	1.4	8.34	15.59	15.01	14.17	12.90	29.60	13.19	14.20	7.68	19.90	12.36
	1.5	10.09	15.07	16.59	14.16	14.79	29.23	14.00	13.40	7.71	18.49	13.87
	1.6	9.35	14.43	17.61	14.15	15.59	29.04	15.11	12.38	7.62	17.69	14.42
<b>min</b>												5.62
5.5	1.1	5.81	17.71	6.04	14.09	5.23	30.25	5.51	17.44	21.55	25.76	5.65
	1.2	5.67	17.08	8.01	14.15	6.73	29.82	8.51	16.57	12.05	21.55	7.23
	1.3	6.92	16.22	13.02	14.16	9.78	29.36	10.92	15.53	9.43	22.50	10.16
	1.4	8.18	15.57	14.97	14.17	13.46	29.61	13.14	14.34	7.84	20.01	12.44
	1.5	8.32	15.04	16.62	14.16	14.89	29.29	13.96	13.44	8.18	18.48	13.45
	1.6	9.69	14.55	17.61	14.15	15.33	29.03	15.05	12.35	7.63	17.71	14.42
<b>min</b>												5.65
5.6	1.1	5.94	17.72	5.92	14.09	5.56	30.26	4.62	17.40	20.09	25.82	5.51
	1.2	5.60	17.09	9.76	14.14	6.59	29.84	8.23	16.55	12.09	24.68	7.55
	1.3	6.91	16.24	12.88	14.16	10.44	29.40	10.88	15.57	9.41	22.55	10.28
	1.4	8.16	15.59	14.89	14.17	13.47	29.63	13.33	14.40	7.86	20.07	12.46
	1.5	9.99	15.10	16.54	14.16	14.84	29.30	14.12	13.56	7.58	18.54	13.87
	1.6	9.68	14.55	17.59	14.15	15.86	29.05	15.08	12.44	7.57	17.73	14.55
<b>min</b>												5.51
5.7	1.1	5.91	17.73	5.88	14.09	5.59	30.26	4.60	17.42	20.05	25.84	5.50
	1.2	5.58	17.11	9.45	14.14	7.17	29.87	8.14	16.57	12.32	24.72	7.59
	1.3	6.89	16.26	12.78	14.16	9.79	29.38	10.71	15.58	9.90	22.63	10.04
	1.4	8.13	15.60	14.27	14.18	12.99	29.64	13.31	14.44	7.88	20.11	12.18
	1.5	9.98	15.11	15.49	14.17	14.80	29.31	14.10	13.53	7.84	18.56	13.59
	1.6	9.73	14.57	17.56	14.15	15.29	29.04	15.01	12.48	7.56	17.75	14.40

<b>min</b>												5.50
5.8	1.1	6.36	17.75	5.46	14.10	6.44	30.26	4.60	17.45	18.15	25.90	5.72
	1.2	5.68	17.06	9.34	14.14	6.65	29.87	8.00	16.60	13.57	24.75	7.42
	1.3	6.92	16.29	12.50	14.16	9.81	29.40	10.72	15.65	9.51	22.69	9.99
	1.4	8.11	15.62	14.32	14.17	12.84	29.64	13.25	14.47	8.56	20.18	12.13
	1.5	9.99	15.13	15.47	14.17	14.68	29.32	14.07	13.64	7.79	18.60	13.55
	1.6	9.72	14.58	17.56	14.15	15.30	29.04	15.00	12.51	7.59	17.76	14.40
<b>min</b>												5.72
5.9	1.1	4.68	17.84	5.62	14.10	5.12	30.29	4.42	17.46	20.25	25.88	4.97
	1.2	5.69	17.08	8.96	14.14	6.60	29.87	7.94	16.63	12.41	24.80	7.30
	1.3	6.86	16.30	12.77	14.16	9.99	29.43	10.62	15.67	9.51	22.75	10.06
	1.4	7.99	15.61	14.77	14.17	13.17	29.65	13.17	14.50	8.03	20.28	12.28
	1.5	9.96	15.15	15.43	14.17	14.87	29.33	14.46	13.23	7.88	18.62	13.68
	1.6	10.80	14.63	17.27	14.16	15.92	29.07	14.99	12.54	7.57	17.78	14.75
<b>min</b>												<b>4.97</b>
6.0	1.1	6.64	17.75	5.68	14.09	5.21	30.30	4.37	17.42	18.28	25.89	5.47
	1.2	5.69	17.10	9.12	14.14	6.58	29.90	7.81	16.66	12.72	24.79	7.30
	1.3	6.83	16.32	12.79	14.16	9.88	29.41	10.60	15.70	9.46	22.75	10.03
	1.4	7.95	15.61	13.73	14.18	12.66	29.65	13.11	14.53	9.04	20.30	11.86
	1.5	9.95	15.16	15.39	14.17	14.86	29.34	14.44	13.27	7.95	18.58	13.66
<b>min</b>												5.47
<b>min</b>												<b>4.97</b>

Приложение 2

Результаты идентификации блока фенологического развития растений по всем годам

Фазы	Віоро r	1999		2000		2001		2002		2003		2004	
		Дата фак.	Дата рас.	Дата фак.	Дата рас.	Дата фак.	Дата рас.	Дата фак.	Дата рас.	Дата фак.	Дата рас.	Дата фак.	Дата рас.
Всходы	82	16 мая	17 мая	24 мая	23 мая	24 мая	24 мая	12 мая	13 мая	18 мая	17 мая	16 мая	16 мая
Кущение	176	28 мая	26 мая	6 июня	3 июня	4 июня	1 июня	24 мая	25 мая	26 мая	29 мая	24 мая	23 мая
Выход в трубку	214.2	4 июня	1 июня	12 июня	9 июня	12 июня	6 июня	28 мая	30 мая	2 июня	2 июня	29 мая	31 мая
Колошение	363.4	28 июня	27 июня	2 июля	29 июня	4 июля	28 июня	22 июня	24 июня	24 июня	23 июня	20 июня	21 июня
Цветение	420	2 июля	3 июля	8 июля	5 июля	8 июля	4 июля	30 июня	30 июня	30 июня	29 июня	30 июня	27 июня
Молочная спелость	540	14 июля	14 июля	22 июля	20 июля	24 июля	20 июля	16 июля	16 июля	16 июля	11 июля	10 июля	12 июля
Восковая спелость	700	26 июля	31 июля	6 августа	5 августа	10 августа	5 августа	2 августа	2 августа	2 августа	29 июля	31 июля	28 июля
Полная спелость	805	14 августа	9 августа	16 августа	14 августа	26 августа	15 августа	12 августа	11 августа	14 августа	8 августа	12 августа	7 августа

Фазы	Віоро r	2005		2006		2007		2008		2009		2010	
		Дата фак.	Дата рас.	Дата фак.	Дата рас.	Дата фак.	Дата рас.	Дата фак.	Дата рас.	Дата фак.	Дата рас.	Дата фак.	Дата рас.
Всходы	82	12 мая	14 мая	24 мая	24 мая	6 мая	8 мая	18 мая	16 мая	16 мая	15 мая	18 мая	19 мая
Кущение	176	28 мая	30 мая	6 июня	5 июня	22 мая	24 мая	2 июня	30 мая	2 июня	30 мая	2 июня	4 июня
Выход в трубку	214.2	2 июня	7 июня	12 июня	10 июня	6 июня	9 июня	4 июня	3 июня	8 июня	1 июня	10 июня	9 июня
Колошение	363.4	22 июня	27 июня	2 июля	29 июня	30 июня	2 июля	2 июля	26 июня	6 июля	7 июля	30 июня	2 июля
Цветение	420	28 июня	3 июля	8 июля	5 июля	6 июля	8 июля	4 июля	2 июля	14 июля	15 июля	8 июля	8 июля
Молочная спелость	540	12 июля	14 июля	22 июля	21 июля	16 июля	20 июля	16 июля	16 июля	26 июля	30 июля	16 июля	25 июля

Восковая спелость	700	28 июля	31 июля	6 августа	7 августа	26 августа	5 августа	4 августа	1 августа	12 августа	16 августа	8 августа	12 августа
Полная спелость	805	8 августа	8 августа	16 августа	19 августа	6 августа	16 августа	10 августа	11 августа	22 августа	28 августа	18 августа	23 августа



*Приложение 3*

Результаты идентификации блока фенологического развития растений по всем годам

№ фазы	Фаза	Биопор	1999		2000		2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010	
			+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
1	всходы	82	1		-1	0		1			-1	0		2		0		2			-2		-1	1		
2	кущение	176		-2	-3		-3	1		3			-1	2			-1	2			-3		-3	2		
3	выход в трубку	214.2		-3	-3		-6	2		0		3		3			-2	3			-1		-7		-1	
4	колошение	363.4		-1	-4		-6	2			-1	1		4			-3	2			-6	1		2		
5	цветение	420	1		-3		-4	0			-1		-3	5			-3	2			-2	1		0		
6	молочная спелость	540	0		-2		-4	0			-5	2		2			-1	4		0		4		9		
7	восковая спелость	700	5		-1		-5	0			-4		-3	3		1		10		4		4		4		
8	полная спелость	805		-5	-2		-11		-1		-6		-5	0		3		10		1		6		5		

Примечание:

- + расчетные фазы позже фактических
- расчетные фазы раньше фактических