

О.А. Иванова, М.Н. Стрижов, Л.А. Хворова
**Информационные технологии
в агрометеорологических прогнозах
перезимовки озимых культур в условиях
Алтайского края***

Ключевые слова: информационные технологии, моделирование, урожайность, гидротермический режим почвы, озимые культуры, риск гибели урожая.

Key words: information technology, modelling, productivity, hydrothermal mode of soil, winter crops, risk of destruction of a crop.

1. Введение. В зерновом балансе России озимые зерновые культуры занимают одно из ведущих мест. Они дают около трети валового сбора зерна. Во многих районах России озимые культуры превосходят по урожайности яровые.

В Алтайском крае в 2008 г. средняя урожайность озимых по краю составила 18 ц/га (в 2007 г. – 22,4 ц/га). В Кытмановском районе в среднем достигнута урожайность 33,5 ц/га; Панкрушихинском и Петропавловском – по 29,6; Павловском – 27,0; Бийском – 25,2 ц/га. В Третьяковском, где яровых собрали 7,3 ц/га, озимые дали 16,3 ц/га. В 2009 г. озимая пшеница дала рекордный урожай – более 60 ц/га [1].

Однако нередко из-за неблагоприятных метеорологических условий высокая потенциальная продуктивность озимых культур не реализуется, происходит частичная гибель озимых посевов, и это наносит большой ущерб хозяйствам. Поэтому своевременные агрометеорологические прогнозы перезимовки и состояния озимых посевов (ожидаемые размеры площади с изреженными и погибшими посевами к весне) позволят снизить ущерб, причиняемый неблагоприятными условиями перезимовки. Ранняя оценка состояния озимых посевов позволит руководителям хозяйств спланировать агротехнические мероприятия весеннего ухода за озимыми, в частности, подсев яровыми культурами сильно изреженных посевов.

Анализ состояния исследуемой проблемы в области упреждающего прогнозирования урожайности озимых зерновых культур и оценки риска возможных потерь урожая от сложившихся метеорологических условий осеннего, зимнего и весеннего периодов показали необходимость разработки новых подходов к методике прогнозирования, в частности, привлечения методов статистической обработки многомерных данных, математического мо-

делирования, современных информационных технологий и экспертных оценок.

Усовершенствование и внедрение в практику методов, основанных на моделировании условий перезимовки и долгосрочных прогнозов состояния посевов к весне, – одна из наиболее актуальных и сложных проблем агрометеорологии, она имеет важное научное и практическое значение. Решению этой задачи посвящена данная работа.

Рассмотрим решение следующих частных задач, необходимых для реализации цели исследования:

- исследование применимости имитационно-моделирующего комплекса AGROTOOL, разработанного в лаборатории математического моделирования Санкт-Петербургского агрофизического института, для оценки и прогноза состояния озимых посевов;

- разработка блока термического режима почвы для осеннего, зимнего и весеннего периодов, позволяющего рассчитывать глубину промерзания и оттаивания почвы, температуру почвы на уровне узла кушения;

- усовершенствование динамической модели продукционного процесса сельскохозяйственных растений AGROTOOL включением в нее блока термического режима почвы и состояния озимых культур в холодное время года;

- модификация базы агрометеорологических данных с учетом необходимой агрометеорологической информации по осеннему, зимнему и весеннему периодам.

2. Усовершенствование имитационно-моделирующего комплекса AGROTOOL. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур, как правило, описывают формирование урожая начиная с момента сева весной или весеннего возобновления вегетации (для озимых культур). Модели процессов в холодный период года носят в основном теоретический характер. В данной работе описывается динамика формирования термического режима почвы в холодный период года для включения ее модели в имитационно-моделирующий комплекс AGROTOOL [2]. Нас, как исследователей, данная модель устраивает техникой моделирования, структурой, информационной поддержкой, возможностью модификации отдельных блоков и включением новых блоков в модель, а также наличием подробных инструкций по вопросам идентификации параметров модели и вопросам адаптации ее к условиям региона.

* Работа выполнена при поддержке ведомственно-аналитической программы «Развитие научного потенциала Высшей школы 2009–2010» (проект №2.2.2.4/4278).

2.1. Структура программного комплекса AGRO-TOOL. Концептуальная схема модели AGROTOOL построена в среде визуального программирования Rational Rose. Непосредственно логика модели закодирована в объектном паскале, а используемые данные хранятся в базах данных. Реализованная в виде программного продукта, модель производственного процесса формально может быть записана в виде системы конечно-разностных уравнений:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f(x(k), a, w(k), u(k)), \\ x(0) &= x_0, k = 0, 1, \dots, T, \end{aligned} \quad (1)$$

где k – номер шага (номер суток) счета; $x(k), x(k+1)$ – векторы состояния модели на двух соседних шагах; a – вектор параметров модели; $w(k)$ – вектор неконтролируемых внешних воздействий (погода); $u(k)$ – вектор управляющих воздействий (агротехника); x_0 – начальное условие. В этих соотношениях T означает время окончания процесса моделирования, которое обычно совпадает с днем уборки урожая.

В состав AGROTOOL входят динамическая модель, реализованная на объектно-ориентированном языке Turbo Pascal в нотации системы Delphi; стационарная база данных, реализованная в СУБД Access; оперативная база данных, реализованная в системе Excel; интерфейс пользователя.

Динамическая модель описывает производственный процесс от момента сева до полного созревания. Она имеет блочную структуру и включает в себя описание основных процессов, имеющих место в системе «почва–растительный покров–приземный слой воздуха»: радиационного режима посева, включающего моделирование поглощенной посевом интегральной коротковолновой радиации, тепловой радиации и ФАР; турбулентного режима посева; фотосинтеза и фотодыхания; развития растений (расчета физиологического времени, определяющего сроки наступления фенофаз); распределения накопленных продуктов фотосинтеза по органам растения, роста растений и формирования урожая зерна; динамики почвенной влаги; транспирации растений и испарения влаги с поверхности почвы; динамики соединений азота в почве и в растении; прогнозирования темпов развития растений; прогнозирования урожая (начиная с фазы колошения).

Результаты тестирования модели AGROTOOL показали, что моделирование зимнего режима достаточно условное: предполагается, что растение в этот период находится в состоянии покоя. Гидротермические процессы в почве в осенний, зимний и весенний периоды не отражены в модели. Поэтому с помощью данной версии модели невозможно оценить условия перезимовки озимых и степень риска потери урожая из-за неблагоприятных условий. В рамках адаптивной идентификации модели встают задачи моделирования гидротермического режима почвы в холодное время года и прогноза перезимовки озимых зерновых культур в условиях Алтайского края. В связи с тем, что в модели AGROTOOL не моделируется зимний период, необходимо также модифицировать базу данных с включением в нее информации по зимнему периоду.

2.2. Модель термического режима почвы в зимний период. Модель формирования гидротермического режима почвы в холодное полугодие разработана Е.М. Гусевым [3] и описана в [2]. В основу модели положено уравнение для скорости продвижения фронта промерзания ξ :

$$L^* \frac{d\xi}{dt} = q_M - q_T, \quad (2)$$

$$L^* = L\rho_w(W - u_n) + \frac{c_2 |T_{II}|}{2}, \quad (3)$$

где q_T – кондуктивный поток тепла к границе промерзания со стороны талой зоны; q_M – кондуктивный отток тепла от границы промерзания в мерзлую зону.

Считается, что на больших глубинах температура почвы постоянна и равна некоторой среднегодовой температуре T^* , измеренной на максимально возможной глубине почвенного профиля, или температуре грунтовых вод при большой (10–20 м) глубине их залегания. Отличия от этой постоянной температуры имеются в некоторой верхней части почвенного профиля, испытывающего влияние динамики поверхностных термических процессов. Именно эту часть почвенного профиля называют глубиной проникания и обозначают σ (рис. 1).

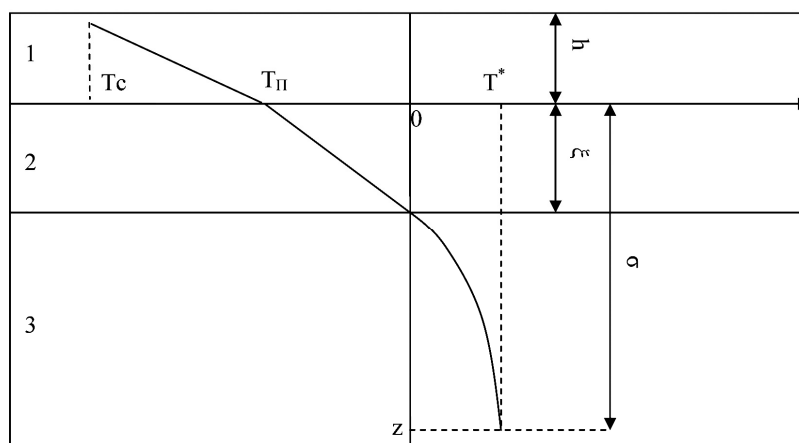


Рис. 1. Профиль температуры в снежном покрове и почве

Зная положение на данный момент времени промерзания ξ и глубины проникания σ , фактически известен поток тепла, q_T , что дает возможность записать уравнение (2) в виде:

$$L^* \frac{d\xi}{dt} = -\frac{\lambda_2 T_C}{\xi + H} - \frac{2\lambda_3 T^*}{\sqrt{\frac{9}{4}\xi^2 + 12a_3(t+t_0)} - \frac{3}{2}\xi}. \quad (4)$$

Рассмотрим модель для расчета профиля температур в почве. Пусть в какой-либо момент времени в почве имеется n чередующихся между собой мерзлых и талых слоев. Последний из них является талым, и иногда его удобно интерпретировать как полупространство, а иногда считать, что вся область ограничена снизу плоскостью $z = H$. Границы между слоями подвижны $z = h_m(t)$ ($m = 1, 2, \dots, n-1$), и на них протекают фазовые переходы. На поверхности в пределах $-l(t) \leq z \leq 0$ может лежать снег, и его верхняя граница зависит от времени. Профиль влажности по глубине накануне даты наступления отрицательной температуры воздуха $w^0(z)$ полагаем известным.

На ограничивающих область плоскостях $z = -l(t)$ и $z = H$ (при отсутствии снега $z = 0$, $z = H$) пусть будет задано граничное условие первого рода. С точки зрения дальнейших рассуждений это не является принципиальным, но зато достигается большая наглядность при изложении сути предлагаемого метода решения. При $z = 0$ естественно полагать выполняющимися условия равенства температур и тепловых потоков. На подвижных границах с фазовым переходом имеет место баланс тепла, а температура равна температуре фазового перехода T_0 . Последнюю будем полагать равной нулю. В общем случае это всегда достигается путем введения разности между искомой температурой и T_0 . Коэффициенты λ и a будем считать зависящими от времени и разрывными функциями от z , причем в пределах каждого слоя они остаются постоянными.

Математическая запись задачи сводится к следующему:

$$\partial T / \partial t = a(t) \partial^2 T / \partial z^2, \quad (5)$$

$$T|_{z=-l(t)} = \Phi_1(t), \quad l(0) \neq 0, \quad (6)$$

$$T|_{z=0} = T|_{z=+0}, \quad (7)$$

$$\lambda(t) \partial T / \partial z|_{z=0} = \lambda(t) \partial T / \partial z|_{z=+0}, \quad (8)$$

$$T|_{z=h_m(t)-0} = T|_{z=h_m(t)+0} = 0, \quad h_m(0) \neq 0, \quad (9)$$

$$(-1)^{m+1} \left[\lambda(t) \partial T / \partial z|_{z=h_m(t)-0} - \lambda(t) \partial T / \partial z|_{z=h_m(t)+0} \right] = \tilde{L}_\gamma(h_m) \left[w^0(h_m) - w_0 \right] dh_m / dt, \quad (10)$$

$$T_{z=H} = \Phi_2(t), \quad (11)$$

$$T|_{t=0} = T^0(z), \quad w|_{t=0} = w^0(z). \quad (12)$$

Если первый слой является кристаллическим, то четные значения показателя степени при -1 соответствуют зонам, где вещество находится в твердом агрегатном состоянии, а нечетные – в жидком.

Таким образом, вопрос сводится к решению системы одномерных уравнений теплопроводности при наличии n подвижных границ. Первая из них $z = -l(t)$ ($l(0) \neq 0$) представляет собой переменную толщину снежного покрова. Остальные $n-1$ соответствуют положению поверхностей раздела между талой и мерзлыми зонами. Определению подлежат профиль температуры $T(z, t)$ и положение границы $h_m(t)$ для каждого момента времени. Наибольшие трудности на этом пути возникают из-за наличия нелинейного условия (10) на подвижных границах, закон движения которых заранее неизвестен.

3. Модификация базы данных (БД). Назначение БД – систематизация и концентрация имеющихся агро- и метеорологических данных. БД ориентирована на пользователей, не имеющих специальных знаний по программированию, и выполняет функции ввода, корректировки (дополнения, обновления, удаления), обработки входной информации, выдачи информации для пользователя в виде таблиц.

Упрощенная концептуальная схема БД приведена на рисунке 2. База данных представляет собой иерархически организованную реляционную структуру (т.е. совокупность таблиц «сущность–связь») с перекрестными ссылками, использующими уникальные ключи записей ID.

В состав базы данных входят следующие таблицы, характеризующие состояние агроэкологической системы:

- *MeteoData*. Таблица содержит погодные данные какой-либо местности;
- *SoilData*. Поля этой таблицы описывают физическое состояние почвы;
- *Region*. В данной таблице хранится информация о местности метеорологических замеров;
- *Type_culture*. Тип культуры и ее особенности;
- *Data_about_culture*. Информация об урожайности, посевной площади, валовом сборе культуры с полей в определенной местности за год.

4. Реализация модели термического режима почвы. Результаты численных расчетов

4.1. Информационное обеспечение модели термического режима почвы и прогноза перезимовки озимых культур. Для адаптации модели к условиям Алтайского края необходима следующая информация: суточные данные с метеопоста хозяйства: минимальная и максимальная температуры воздуха (град С); минимальная относительная влажность воздуха (%); осадки (мм); скорость ветра (м/с); продолжительность солнечного сияния (час); данные наблюдений за посевом: влажность почвы по слоям; даты наступления фаз; физические свойства почвы с указанием типа почвы и механического состава: объемная масса (плотность сложения почвы), г/см³; влажность завядания (%);

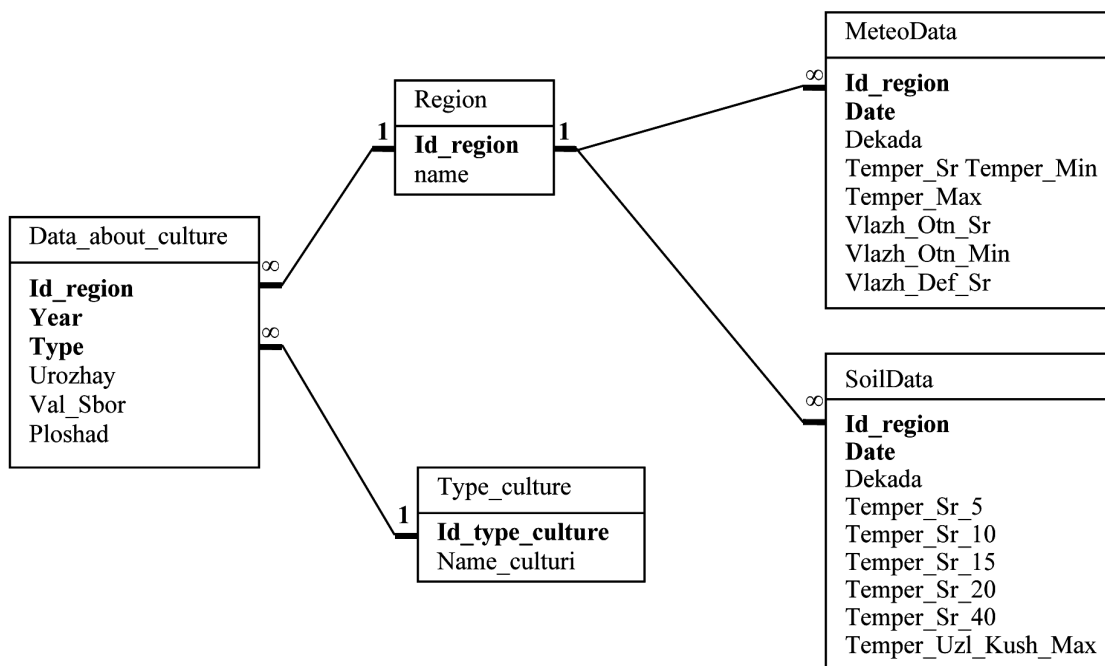


Рис. 2. Упрощенная концептуальная модель базы данных

наименьшая влагоемкость (%); влажность насыщения (%); максимальная гигроскопичность (%); коэффициент фильтрации (см/сут); данные по зимнему периоду: температура на поверхности почвы (°C); температура почвы на глубине узла кушения озимых; высота снежного покрова (см). База данных наполнена информацией, полученной с метеорологической станции г. Камень-на-Оби за 1991–2007 гг. и с «НПО Докучаево» (1927–2008 гг.).

Интерфейс оболочки. Интерфейс предназначен для формирования оперативных таблиц из базы данных (СБД). Он представляет собой отдельную программу, которая во взаимодействии с пользователем составляет SQL-запрос к СБД на извлечение данных и выполняет его, выводя заказанные данные пользователю на дисплей. Также в состав интерфейса входит алгоритм, реализующий математическую модель процесса промерзания почвы.

Просмтр данных

Метео данные
 Почвенные данные
 Данные о культуре

| Район | Дата | Декада | Тв ср. гр.С | Тв min, гр.С | Тв max, гр.С | Tn Max, гр.С | Tn Min, гр.С | От. влаж. ср. % | От.вл |
|-------|------------|--------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-------|
| 1 | 01.10.1992 | 1 | 2 | -0,5 | 5,7 | 17,1 | -3,6 | 86 | |
| 1 | 02.10.1992 | 1 | 1,3 | -4,6 | 9,9 | 11,5 | -8,1 | 76 | |
| 1 | 03.10.1992 | 1 | 3,9 | -1,6 | 11,6 | 18 | -4,5 | 67 | |
| 1 | 04.10.1992 | 1 | 5,5 | -1,6 | 14,2 | 19 | -5,5 | 65 | |
| 1 | 05.10.1992 | 1 | 5,9 | -0,5 | 13,5 | 16,2 | -3,4 | 66 | |
| 1 | 06.10.1992 | 1 | 6,1 | 0,9 | 10,7 | 16,5 | -3,1 | 73 | |
| 1 | 07.10.1992 | 1 | 3,6 | 1 | 8,5 | 8,2 | 1,5 | 91 | |
| 1 | 08.10.1992 | 1 | 0,7 | -2,7 | 4,6 | 9 | -4 | 70 | |
| 1 | 09.10.1992 | 1 | 2,5 | -2 | 10,2 | 14,9 | -5 | 74 | |
| 1 | 10.10.1992 | 1 | 5,9 | 1,6 | 12,7 | 15,2 | -1,1 | 62 | |
| 1 | 11.10.1992 | 2 | 9,5 | 2,5 | 15,8 | 23 | 0 | 53 | |
| 1 | 12.10.1992 | 2 | 9,4 | 2,3 | 17 | 21 | -3 | 63 | |
| 1 | 13.10.1992 | 2 | 12,1 | 10,9 | 14,6 | 18 | 5 | 72 | |
| 1 | 14.10.1992 | 2 | 8,4 | 3,8 | 15,8 | 21 | -2 | 71 | |
| 1 | 15.10.1992 | 2 | 9,6 | 3,2 | 19,4 | 19,5 | -2 | 71 | |
| 1 | 16.10.1992 | 2 | 1,3 | -1 | 14,5 | 12,6 | -6 | 76 | |
| 1 | 17.10.1992 | 2 | -3,8 | -7 | -0,8 | 7,9 | -11,5 | 74 | |
| 1 | 18.10.1992 | 2 | -5,1 | -11,1 | 0,3 | 8,5 | -11,5 | 84 | |

Рис. 3. Просмотр данных БД

Файл базы данных копируется в директорию установленной оболочки. В программе предусмотрена ситуация отсутствия этого файла, тогда при запуске появляется сообщение.

В основном диалоговом окне программы пользователю доступны, только при наличии файла базы данных, пункты меню: «Выход», «Редактирование», «Расчеты», «Справка». В противном случае эти кнопки не активны. Меню «Редактирование» содержит следующие подпункты: «Просмотр данных», «Правка данных», «Печать данных». «Выход» закрывает приложение. «Просмотр данных» позволяет просматривать данные в табличном виде, но не редактировать их. Вид окна представлен на рисунке 3. Опция «Правка данных» позволяет редактировать БД.

В меню «Расчеты» пункты также становятся активными лишь после загрузки БД. Для расчета глубины промерзания почвы нужно нажать кнопку «Расчет глубины» в главном диалоговом окне программы.

4.2. Результаты численных расчетов. На первом этапе исследования были рассмотрены относительно упрощенные варианты модели расчета глубины промерзания ξ почвы.

1) $\xi = at^{1/2} + b$, где коэффициенты a и b определяются методом наименьших квадратов. Средняя относительная погрешность расчета глубины промерзания в холодный период составила 27,8%, а для периода оттаивания – 0,69%. Использование упрощенной модели дает результаты с большой погрешностью. Дальнейшие исследования показали, что некоторые из входящих параметров не должны быть постоянными.

Данная модель не учитывает специфику и физический механизм протекающих процессов, условия их взаимодействия и влияние внешних по отношению к рассматриваемой системе факторов. Кроме того, глубина промерзания почвы зависит только от времени t , прошедшего с начала промерзания, поэтому не может быть принята в качестве базовой для решения задач исследования.

2) Модель $\xi = \beta t^{1/2}$, где

$$\beta = \frac{a_3^{1/2}}{\left\{ -\tilde{A} \left[\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6} \tilde{A} \right) + \frac{1}{2} \frac{L^* a_3}{\lambda_3 T^*} + \sqrt{\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6} \tilde{A} \right)^2 - \frac{1}{6} \frac{L^* a_3}{\lambda_2 T_c}} \right] \right\}^{1/2}},$$

хотя и учитывает некоторые метеорологические и почвенные факторы, но имеет те же недостатки, что и первая модель. Ошибки расчетов по данной модели составляют от 16 до 30%.

$$\xi(t_{k+1}) = -H(t_{k+1}) - \frac{q_T(t_k)\Delta t}{L^*} +$$

$$3) \sqrt{\left[\xi(t_k) + H(t_{k+1}) \right]^2 - \frac{2\lambda_2 T_c \Delta t}{L^*(t_{k+1})} + \left[\frac{q_T(t_k)\Delta t}{L^*(t_{k+1})} \right]^2}.$$

Данную модель можно назвать численной, но таковой она является лишь в отношении изменения искомой величины во времени. В остальном же модель использует аналитическое описание процесса.

Для апробации моделей глубины промерзания почвы использовались материалы наблюдений Каменской метеорологической станции. Для расчета из литературных источников [4–7] были взяты типичные по порядку величин следующие значения параметров: $T^* = 10^0 C$; $\lambda_2 = \lambda_3 = 10^{-3}$ кал/(см град с); $c_3 = 1$ кал/(см³град); $L^* = L\rho_W(W - u_H)$ и c_2 являются переменными величинами. T_c принимается равной температуре воздуха.

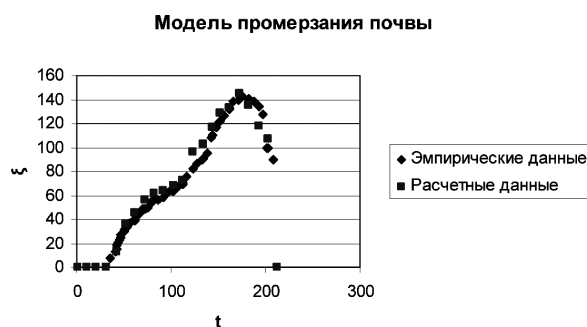


Рис. 4. Динамика глубины промерзания почвы

На рисунке 4 представлены результаты расчета по модели и фактические данные глубины промерзания почвы. Средняя относительная погрешность расчетной глубины промерзания с октября 1993 г. по апрель 1994 г. составила 1,8%. Таким образом, с учетом приведенных результатов можно полагать, что рассматриваемая модель позволяет достаточно хорошо вести расчет глубины промерзания почвы в течение всего зимнего периода.

В перспективе планируется решить следующий ряд задач:

- с помощью методов распознавания образов провести типизацию метеорологических ситуаций декад осеннего, зимнего и весеннего периодов с целью получения поэтапных оценок урожайности озимых зерновых культур;
- построить модели рисков для оценки потерь урожая дифференцированно по типам неблагоприятных условий;
- применить технологию определения года-аналога для формирования предполагаемого погодного сценария конкретного года, расчета возможных траекторий формирования урожая и соответствующие ему множества возможных значений потенциально-го урожая и/или максимально допустимого урожая озимых зерновых культур.

Библиографический список

1. Алтайский край. Город и село. 2009, №10. [Электронный ресурс]. – Заглавие с экрана. Режим доступа: <http://agro22.ru>
2. Иванова, О.А. Расчет глубины промерзания почвы в модели прогноза перезимовки озимых культур в условиях Алтайского края / О.А. Иванова, М.Н. Стрижов, Л.А. Хворова // Известия АлтГУ. – Барнаул, 2009, №1.
3. Гусев, Е.М. Формирование режима и ресурсов почвенных вод в зимне-весенний период / Е.М. Гусев. – М., 1993.
4. Павлов, А.В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы / А.В. Павлов. – Новосибирск, 1980.
5. Палагин, Э.Г. Методика расчета на ЭВМ термического режима почвы и прогноза перезимовки озимых зерновых культур: метод. пособие / Э.Г. Палагин, В.А. Моисейчик. – Л., 1978.
6. Палагин, Э.Г. Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур / Э.Г. Палагин. – Л., 1981.
7. Полуэктов, Р.А. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смолья, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж. – СПб., 2006.