

Использование данных дистанционного зондирования для моделирования продукционного процесса кукурузы

А.Д. Клещенко, Т.А. Найдина, Т.А. Гончарова

*Всероссийский научно-исследовательский институт
сельскохозяйственной метеорологии,
249038, Обнинск, пр. Ленина, 82,
e-mail: t-naidina@yandex.ru*

Данные дистанционного зондирования Земли использованы в новой динамической имитационной модели продукционного процесса кукурузы. На основе динамической модели разработан динамико-статистический метод прогноза урожайности кукурузы на зерно с целью использования в оперативной практике Росгидромета. Проведена оценка успешности метода прогноза урожайности с использованием и без использования спутниковой информации в динамической модели роста и формирования зерна кукурузы для субъектов Южного и Северо-Кавказского федеральных округов.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, NDVI, кукуруза, динамическая имитационная модель, урожайность, продукционный процесс.

Применение данных дистанционного зондирования Земли для решения сельскохозяйственных задач в последние годы представляет собой быстро развивающееся перспективное направление. По мере накопления спутниковой информации появилась возможность ее использования в динамических имитационных моделях продукционного процесса сельскохозяйственных культур.

Проведенные нами исследования по оценке возможностей использования вегетационного индекса NDVI для моделирования физиологических процессов растений в динамической модели «погода – урожай» показали, что величина NDVI достаточно адекватно отражает сезонный ход фотосинтеза сельскохозяйственных культур, и ее использование в применяемой для оперативных расчетов модели прогнозирования урожайности яровой пшеницы дало положительные результаты (Клещенко, Найдина, 2011). Это послужило основанием для использования данных дистанционного зондирования при моделировании продукционного процесса кукурузы в новой динамической модели оперативного прогнозирования урожайности кукурузы на зерно.

Кукуруза является одним из ценных сельскохозяйственных растений, она отличается от других зерновых культур высокой урожайностью и калорийностью зерна. По данным Росстата, за последние пять лет средний валовой сбор зерна кукурузы в Российской Федерации увеличился на 11...12 %.

Производство зерна кукурузы требует глубокой и всесторонней оценки влияния погодных условий на формирование урожая, изучения и объяснения причинно-следственных связей между гидрометеорологическими условиями среды и продуктивностью растения для своевременного прогноза урожайности зерна кукурузы, увеличения объема полезной продукции высокого качества и для разработки баланса зерна страны и отдельных территорий.

В оперативной практике Росгидромета для прогнозирования урожайности кукурузы на зерно сейчас используются регрессионные модели, разработанные Ю.И. Чирковым (Чирков, 1969), Л.В. Комоцкой (Комоцкая, Ломцова, 1991), И.В. Свисюк (Свисюк, 1991), А.И. Страшной (Страшная, 2009). Имея ряд недостатков, присущих всем регрессионным моделям, они остаются эффективным средством для решения агрометеорологических задач.

Наиболее известные динамические имитационные модели прогнозирования урожайности кукурузы, рассмотренные нами, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Динамические модели прогнозирования урожайности кукурузы

Название модели	Авторы	Страна
–	Галямин Е.П., Сиптиц С.О.	СССР
–	Полевой А.П., Наумова А.В.	СССР
–	Полевой А.П., Адаменко Т.И.	Украина
ALMANAC	Kiniry J.R. и др.	США
APSIM	McCown и др.	США
CERES-Maize	Jones C.A. и Kiniry J.R.	США
CORNF	Stapper M., Arkin G.F.	США
CORNGRO	Childs S.W. и др.	США
CORNMOD	Baker C.H., Horrocks R.D.	США
CUPID	J.M. Norman и Campbell	США
ELCROS	Winzeler H., Hunt L.A. и др.	Голландия
EPIC	Williams J.R. и др.	США
EWQTPR	Cabelguenne M., Debaeke	США
GAPS	Buttler	США
Hybrid-Maize	Yang H.S., Dobermann A.	США
MAIZE	Sinclair T.R., Muchow	США
QB-Maize	Sinclair T.	США
RZWQM	Ahuja и др.	США
SIMAIZ	Duncan и др.	США
VT-Maize	Newkirk K.M., Parker J.C	США
WOFOST	Huygen, Wolf J. и др.	Нидерланды

Анализ существующих динамических моделей формирования урожая кукурузы показал, что все модели имеют свои уникальные особенности, и идеи, заложенные в них, могут быть использованы для разработки новой динамической имитационной модели продукционного процесса кукурузы с использованием спутниковой информации, но, ни одна из рассмотренных нами моделей не предполагала решения задач, связанных с агрометеорологическим обеспечением сельского хозяйства Российской Федерации, и поэтому, ни одна из них не может быть использована в этих целях без существенных доработок. В этом отношении исключением является модель продукционного процесса сельскохозяйственных культур «погода – урожай» (Сиротенко, 1981; Полевой, 1988), которая была принята в качестве базовой для создания новой динамической модели продукционного процесса кукурузы с использованием спутниковой информации.

В базовой модели для составления прогноза используется входная оперативная метеорологическая информация, которая сводится к двум элементам – средней декадной температуре воздуха и количеству осадков за декаду. Это позволяет использовать модель для разработки методов прогнозов урожайности и валового сбора сельскохозяйственных культур в оперативном режиме (Русакова и др., 2006).

Динамическая модель продукционного процесса кукурузы разрабатывалась нами в двух вариантах (Клещенко и др., 2011а):

- при расчете интенсивности фотосинтеза кукурузы использовались только метеорологические данные,
- при расчете интенсивности фотосинтеза кукурузы использовалась спутниковая информация (вегетационный индекс NDVI).

Структура созданной нами модели обеспечивает достаточно полное описание основных процессов жизнедеятельности культуры (включает количественное описание процессов фотосинтеза, дыхания и роста растения), учитывает биологические особенности кукурузы и ее взаимодействие с окружающей средой.

Основной составляющей продукционного процесса растений является фотосинтез. Интенсивность фотосинтеза зависит от освещенности, содержания CO_2 в воздухе, температуры, водоснабжения, обеспеченности элементами минерального питания и от биологических особенностей растения.

Кукуруза, являясь растением типа C_4 (ее фотосинтез протекает по циклу Хэтча и Слэка), отличается от распространенных в России сельскохозяйственных культур типа C_3 (фотосинтез которых протекает по циклу Кальвина) своей темновой фазой фотосинтеза. Кукуруза характеризуется очень низкой потерей CO_2 в результате фотодыхания, что способствует большей продуктивности растения, эффективность использования воды у нее вдвое выше, чем у растений типа C_3 (Алехина и др., 2005). Ход световой кривой фотосинтеза у кукурузы отличается от хода световой кривой растений типа C_3 , динамические модели которых в настоящее время применяются в разработанных динамико-статистических методах прогнозов, используемых в оперативной практике Росгидромета (для картофеля, яровой и озимой пшеницы, ярового ячменя и озимой ржи). У кукурузы насыщение происходит при более высокой интенсивности света. Для описания процесса фотосинтеза нами на основании предложенных Монси и Саэки (Monsi, Saeki, 1953), Будаговским (Будаговский и др., 1964) уравнений и с учетом модификаций принято следующее выражение:

$$P_0^j = \frac{42Q^j}{21\tau^j(1+cL^j)+Q^j}, \quad (1)$$

где P_0^j — интенсивность фотосинтеза фотосинтезирующих органов кукурузы при оптимальных условиях тепло- и влагообеспеченности в реальных условиях освещенности; Q — суммарная солнечная радиация; τ — продолжительность светлого времени суток; c — безразмерная эмпирическая постоянная; L — относительная площадь ассимилирующей поверхности растения; j — номер расчетной декады.

Суммарная солнечная радиация рассчитывается по формуле (Сивков, 1968):

$$Q^j = 12,66(S^j)^{1,31} + 315\left(\sin(h^j)\right)^{2,1}, \quad (2)$$

где S — продолжительность солнечного сияния; h — полуденная высота Солнца.

Уравнение (1) применимо для расчета интенсивности фотосинтеза кукурузы в биологически оптимальных условиях среды. Для расчета фотосинтеза в реальных условиях среды (в онтогенезе) необходимо учесть влияние внешних факторов и фазы развития растений.

Хорошо известно, что фотосинтетическая активность листьев различна на разных этапах онтогенеза отдельного листа и растения в целом. У молодых листьев фотосинтетический аппарат сформирован не полностью и не обеспечивает высокой интенсивности фотосинтеза, присущей зрелым листьям. В базовой модели изменение фотосинтеза кукурузы в онтогенезе учтено через функцию, которая описывает интенсивность фотосинтеза i -го органа в зависимости от физиологического возраста растения. Таким образом, для реальных условий среды, уравнение (1) имеет вид (Полевой, 1988):

$$P_\tau^j = P_0^j \alpha_i^j \psi^j \gamma^j, \quad (3)$$

где α — онтогенетическая кривая фотосинтеза; ψ — функция влияния температуры воздуха на интенсивность фотосинтеза; γ — функция влияния суммы осадков на интенсивность фотосинтеза.

В первом варианте модели онтогенетическая кривая α была изменена с учетом сумм температур, оптимальных именно для кукурузы. Во втором варианте модели, с использованием спутниковой информации, эта кривая была заменена декадными значениями NDVI в течение вегетационного периода. Значения NDVI близки к онтогенетической кривой интенсивности фотосинтеза, и, что наиболее важно, ход NDVI лучше отражает важнейшую закономерность роста растений: в начальный период темпы роста растения, а значит и интенсивность фотосинтеза, низкие (Клещенко и др., 2011б). Кроме того, включение в модель NDVI позволяет учитывать в оцениваемый период вегетации важнейший фактор — текущее состояние посевов кукурузы. Погодные условия и состояние посевов в модели рассматриваются комплексно и во взаимосвязи.

Учет влияния температуры воздуха на интенсивность фотосинтеза осуществляется через функцию ψ , посредством которой учитываются пороговая и оптимальная для роста и развития кукурузы температуры воздуха. Для кукурузы температурная кривая аппроксимировалась следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} T^j < T_{optMIN}^j : \psi = 0,25 \sin \left(\frac{T^j - T_{min}^{lim}}{T_{optMIN}^j - T_{min}^{lim}} \right) + 0,79, \\ T^j > T_{optMAX}^j : \psi = 0,24 \sin \left(\frac{T_{max}^{lim} - T^j}{T_{max}^{lim} - T_{optMAX}^j} \right) + 0,82, \\ T_{optMIN}^j \leq T^j \leq T_{optMAX}^j : \psi = 1, \end{array} \right. \quad (4)$$

где T — средняя декадная температура воздуха, °C; T_{optMIN}^j и T_{optMAX}^j — соответственно минимальная и максимальная оптимальная для фотосинтеза кукурузы температура воздуха в j -й декаде, °C; T_{min}^{lim} и T_{max}^{lim} — соответственно минимальная и максимальная пороговая для фотосинтеза кукурузы, температура воздуха °C.

В модели используется средняя декадная температура воздуха, которая несколько отличается от дневной температуры воздуха. Для большей части периодов роста, оптимальной для кукурузы в модели принята декадная температура воздуха, равная 17...26 °C (при этом дневная температура может колебаться от 14 до 42 °C). При падении средней декадной температуры ниже 10 °C (дневная температура воздуха при этом в некоторые дни может быть ниже 8 °C) и повышении ее до 33 °C и выше (при дневной температуре больше 49 °C) формирование урожая кукурузы прекращается.

В настоящее время в связи с сокращением объемов наблюдений за влажностью почвы и дефицитом влажности воздуха, оперативных данных по этим параметрам недостаточно, поэтому в динамической имитационной модели оценивается сумма осадков за текущую декаду с учетом увлажнения предшествующего периода. Функция влияния суммы осадков на интенсивность фотосинтеза рассчитывается путем кусочно-линейной интерполяции. Потребности во влаге в разные фазы развития кукурузы различные. В ранний период, от образования 3–4 листов до начала интенсивного прироста стеблей, кукуруза хорошо переносит недостаток влаги и даже засуху, в то время как дефицит влаги в период от начала стеблевания до цветения приводит к потере урожая зерна 50 % и более, постоянные дожди во время цветения растения также отрицательно влияют на урожайность. Влияние влагообеспеченности на интенсивность фотосинтеза в различные периоды развития растения учтено в модели в соответствии с биологическими особенностями кукурузы.

Суммарный фотосинтез посева за светлое время суток рассчитывается по формуле (Полевой, 1988):

$$P^j = \varepsilon P_{\tau}^j L^j \tau^j. \quad (5)$$

Значение суммарного фотосинтеза во многом зависит от относительной площади листовой поверхности (листового индекса) кукурузы. Использование спутниковой информации в модели более адекватно отражает ход листового индекса LAI (Leaf Area Index). Так, значение листового индекса кукурузы в год максимальной урожайности кукурузы на зерно в Ставропольском крае (2003) с использованием вегетационного индекса NDVI в модели выше, чем значение листового индекса без использования NDVI (рис. 1).

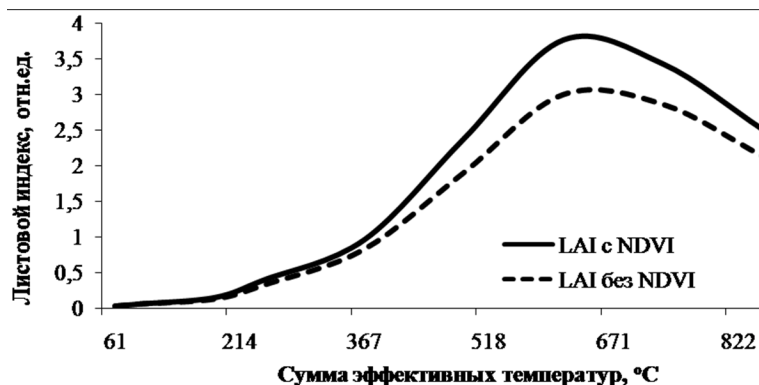


Рис. 1. Сезонный ход листового индекса в Ставропольском крае в 2003 г.

Часть ассимилированного в процессе фотосинтеза углерода затрачивается на дыхание. Общепринятым при моделировании дыхания является подход, основанный на разделении дыхания на дыхание роста и дыхание поддержания структур. Затраты на дыхание R определяются по выражению:

$$R^j = \alpha_r^j (c_1 M^j + c_2 P^j), \quad (6)$$

где M — сухая биомасса посева; c_1 и c_2 — коэффициенты, характеризующие затраты на поддержание структур и рост.

Моделирование продукционного процесса кукурузы сводится к определению прироста общей биомассы и биомассы отдельных органов растений за определенные интервалы времени.

При определении приростов биомассы ($\Delta M^j / \Delta t$) учитываются основные физиологические процессы растения: фотосинтез и дыхание:

$$\frac{\Delta M^j}{\Delta t} = P^j - R^j, \quad (7)$$

где P^j — суммарный фотосинтез посева, R^j — затраты на дыхание.

Решающее значение при моделировании процесса формирования урожая имеет оценка прироста биомассы отдельных органов, для описания скорости изменения сухой биомассы (в течение вегетационного периода) которых принята следующая система уравнения (Полевой, 1988):

$$\left. \begin{aligned} m_i^{j+1} &= m_i^j + \left(\beta_i^j \frac{\Delta M^j}{\Delta t} - \upsilon_i^j m_i^j \right) n, \\ m_p^{j+1} &= m_p^j + \left(\beta_p^j \frac{\Delta M^j}{\Delta t} + \sum_i^{l,s,r} \upsilon_i^j m_i^j \right) n, \end{aligned} \right\} i \in l, s, r, \quad (8)$$

где m_i — общая сухая биомасса отдельных органов (l — листья, s — стебли, r — корни, p — репродуктивные органы); β_i — функция распределения «свежих», вновь созданных ассимилятов; υ_i — функция перераспределения между органами «старых», ранее запасенных ассимилятов; n — число дней в расчетной декаде; j — номер расчетной декады.

Вид ростовых функций зависит от суммы эффективных температур, с которой начинается рост початка, а также от суммы эффективных температур, необходимой для завершения роста каждого органа растения кукурузы.

На рис. 2 показаны расчетные значения динамики биомассы отдельных органов растения кукурузы в динамической имитационной модели с использованием спутниковой информации. Для сравнения пунктирной линией показаны расчетные значения динамики биомассы репродуктивных органов (початков) кукурузы без использования спутниковой информации в модели. При введении в модель вегетационного индекса NDVI масса репродуктивных органов кукурузы увеличилась, что положительно влияет на прогноз урожайности, так как по предварительным данным в 2011 г. в Кабардино-Балкарской Республике наблюдалась самая высокая за последние 20 лет урожайность кукурузы на зерно (50,7 ц/га).

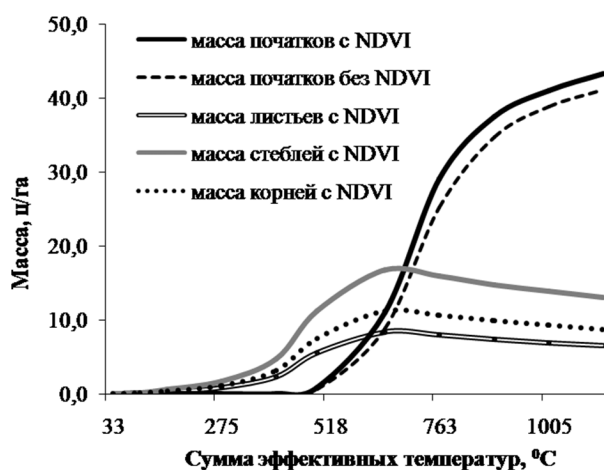


Рис. 2. Динамика накопления биомассы вегетативных и репродуктивных органов кукурузы

При создании метода прогноза урожайности кукурузы на зерно используется методология динамико-статистического прогнозирования (Полевой, 1988). Прогноз урожайности при этом рассматривается как сумма двух прогнозов — прогноза тенденции урожайности и прогноза отклонений урожайности от тренда.

Тенденция отражает влияние на урожайность уровня технологии возделывания кукурузы, смену сортов, изменение доз удобрений и т. д. Она находится путем экстраполяции временного ряда урожайности с помощью метода гармонических весов или как среднее значение за несколько предшествующих лет.

Отклонение от тенденции рассчитывается по динамической модели продукционного процесса кукурузы и позволяет количественно характеризовать условия формирования урожая кукурузы, оценивает степень отличия складывающихся (на дату составления прогноза) агрометеорологических условий формирования урожая кукурузы от многолетних, на фоне которых формируется тенденция урожайности. Оно находится как отношение биомассы репродуктивных органов в конкретном году к биомассе репродуктивных органов, рассчитанных в модели по средним многолетним данным.

Для прогнозирования урожайности Y используется выражение:

$$Y = Y_{t+1} \frac{m_p}{m}, \quad (9)$$

где Y_{t+1} — тенденция урожайности сельскохозяйственной культуры на прогнозируемый год; m_p — биомасса репродуктивных органов в конкретном году; m — биомасса репродуктивных органов, рассчитанная в модели по средним многолетним данным.

Прогноз урожайности кукурузы на зерно составляется 21 июня и уточняется 21 июля (в установленные Росгидрометом сроки), но прогнозировать урожайность возможно с раз-

личной заблаговременностью, так как оценка условий формирования урожая ((m_p/m)) рассчитывается еженедельно в период вегетации.

Ввиду того, что основные площади, занимаемые кукурузой, сосредоточены на юге европейской территории Российской Федерации, динамическая модель продукционного процесса кукурузы и методики прогноза урожайности кукурузы на зерно разработаны для семи субъектов Северо-Кавказского и Южного федеральных округов, на долю которых приходится 82...85 % валового сбора зерна кукурузы в России.

Модель обрабатывалась на средних многолетних данных, затем были проведены авторские испытания с 2002 по 2010 г. В табл. 2 представлены значения парных коэффициентов корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями урожайности кукурузы на зерно для двух методов: с использованием и без использования вегетационного индекса NDVI в динамической модели продукционного процесса кукурузы. Для сравнения приведены инерционный и климатологический прогнозы урожайности.

Под инерционным прогнозом урожайности (см. табл. 2) подразумевается прогноз, составленный на основании предположения, что прогнозируемое значение урожайности будет таким же как и в прошлом году. Под климатологическим подразумевается метод прогноза, при котором в качестве прогнозируемого значения принимается среднее многолетнее значение урожайности или расчет его по тренду (при наличии последнего). Среднее многолетнее значение рассчитывается по материалам 25–30-летнего периода наблюдений. В качестве прогнозируемого значения урожайности по тренду на год прогноза принимается среднее арифметическое из фактических наблюдений за последние пять лет (Методические указания..., 1991).

Как видно из табл. 2, использование спутниковой информации в динамической модели улучшает качество прогнозов урожайности кукурузы на зерно.

Таблица 2. Оценка успешности методов прогноза урожайности кукурузы

Субъект Российской Федерации	Прогноз								
	дата	испытываемый				инерционный		климатологический	
		с NDVI		без NDVI		коэффициент корреляции	средняя ошибка прогноза, %	коэффициент корреляции	средняя ошибка прогноза, %
		коэффициент корреляции	средняя ошибка прогноза, %	коэффициент корреляции	средняя ошибка прогноза, %				
Краснодарский край	21/06	0,91±0,16	7,4	0,72±0,26	14,1	-0,07±0,38	44,4	0,00±0,38	35,0
	21/07	0,98±0,07	3,1	0,94±0,12	7,2				
Ростовская область	21/06	0,98±0,06	10,6	0,87±0,19	23,0	0,41±0,34	66,1	-0,36±0,35	67,2
	21/07	0,99±0,05	6,2	0,93±0,14	18,9				
Ставропольский край	21/06	0,87±0,19	9,3	0,72±0,26	10,3	-0,15±0,37	52,7	-0,07±0,38	32,6
	21/07	0,97±0,09	4,5	0,92±0,15	6,2				
Волгоградская область	21/06	0,97±0,09	13,6	0,76±0,25	51,2	0,51±0,33	57,9	-0,14±0,37	126,4
	21/07	0,99±0,03	3,2	0,91±0,16	30,6				
Кабардино-Балкарская Республика	21/06	0,88±0,18	9,3	0,77±0,24	12,9	0,17±0,37	16,6	-0,73±0,26	27,1
	21/07	0,98±0,08	2,7	0,87±0,19	9,1				
Республика Северная Осетия-Алания	21/06	0,97±0,09	5,5	0,92±0,15	7,9	0,66±0,28	22,8	0,77±0,24	18,3
	21/07	0,99±0,06	3,3	0,90±0,17	10,6				
Республика Дагестан	21/06	0,93±0,14	6,2	0,80±0,23	5,4	0,44±0,34	16,0	0,46±0,34	18,4
	21/07	0,92±0,15	4,3	0,95±0,12	2,7				

Для проведения производственных испытаний и дальнейшего использования в оперативной работе для Северо-Кавказского УГМС был создан пользовательский интерфейс, позволяющий отредактировать входные данные, составить прогноз по двум методам (с использованием и без использования данных дистанционного зондирования в динамической имитационной модели). Кроме того, пользовательский интерфейс позволяет в автоматическом режиме оценить оправдываемость методов прогноза урожайности после получения данных о фактической урожайности кукурузы на зерно в прогнозируемом году (рис. 3).

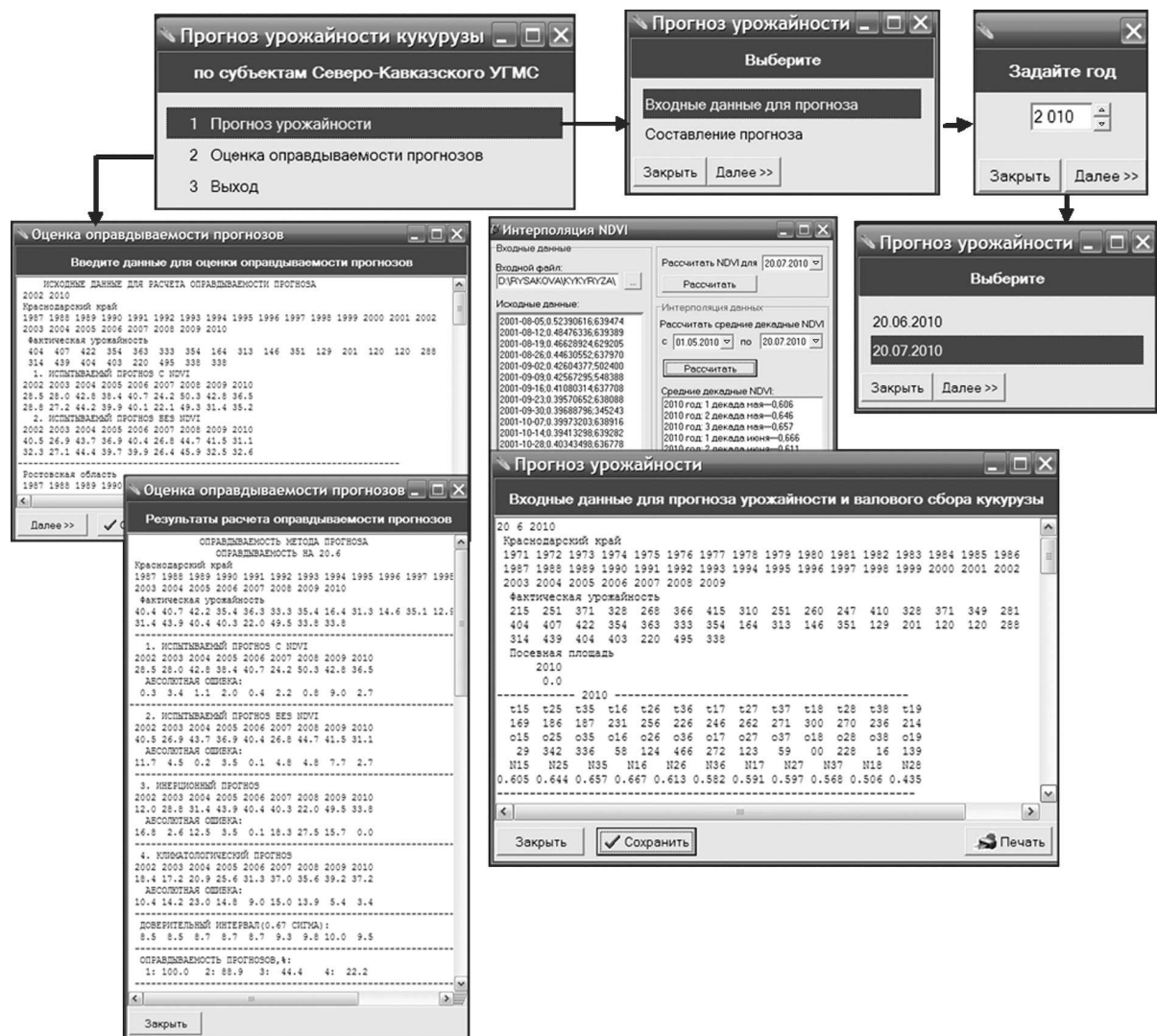


Рис. 3. Пользовательский интерфейс

Таким образом, создана новая динамическая имитационная модель продукционного процесса кукурузы с использованием и без использования спутниковой информации (вегетационного индекса NDVI), на основе которой разработаны динамико-статистические методы прогноза урожайности кукурузы на зерно для субъектов Северо-Кавказского и Южного федеральных округов.

Результаты авторской проверки модели на данных 2002 – 2010 гг. в обоих случаях показали хорошую оправдываемость метода прогноза урожайности кукурузы. Однако использование данных дистанционного зондирования для прогнозирования урожайности кукурузы на зерно является более эффективным: средняя ошибка испытываемых прогнозов для семи субъектов Российской Федерации с использованием только метеорологической информации составила 15,0 %, а с использованием вегетационных индексов NDVI для расчета интенсивности фотосинтеза в модели — 6,4%.

В дальнейшем предполагается проведение производственных испытаний динамико-статистических методов прогноза урожайности кукурузы на зерно по территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов с использованием и без использования спутниковой информации, также планируется разработка динамико-статистических методов прогноза урожайности кукурузы по субъектам УГМС СЧО, Приволжского УГМС и УГМС Республики Татарстан.

Литература

1. *Алехина Н.Д., Балнокин Ю.В., Гавриленко В.Ф.* и др. Физиология растений: Учебник для студ. вузов / Под ред. И.П. Ермакова. М.: Изд. центр «Академия», 2005. 640 с.
2. *Будаговский А.И., Ничипорович А.А., Росс Ю.К.* Количественная теория фотосинтеза и ее использование для решения научных и практических задач физической географии // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1964. № 6. С. 13–27.
3. *Клещенко А.Д., Найдина Т.А.* Использование данных дистанционного зондирования для моделирования физиологических процессов растений в динамических моделях прогнозирования урожая // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 170–178.
4. *Клещенко А.Д., Найдина Т.А., Гончарова Т.А.* (2011а) Использование данных дистанционного зондирования для моделирования продукционного процесса кукурузы / 9-я Открытая Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 358. [Электрон. текст]. 1 опт. диск (CD-ROM).
5. *Клещенко А.Д., Найдина Т.А., Гончарова Т.А.* (2011б) Применение спутниковых данных для прогнозирования урожая кукурузы на территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов / 5-й Международ. конф. «Земля из космоса — наиболее эффективные решения»: Тез. М.: Бином, 2011. С. 151–152.
6. *Комоцкая Л.В., Ломцова О.Н.* Усовершенствование метода долгосрочного прогноза урожайности зерна кукурузы в Черноземной зоне РСФСР // Гидрометеорол. научно-исслед. центра СССР: Тр. 1991. № 325.
7. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. М.: Госкомгидромет, 1991. С. 98–107.
8. *Найдина Т.А.* Использование спутниковой информации в моделях биопродуктивности зерновых культур для расчета интенсивности фотосинтеза // Труды ИПГ. 2011. С. 189–194.
9. *Полевой А.Н.* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 320 с.
10. *Русакова Т.И., Лебедева В.М., Грингоф И.Г., Шкляева Н.М.* Современная технология поэтапного прогнозирования урожайности и валового сбора зерновых культур // Метеорология и гидрология. 2006. № 7. С. 101–108.
11. *Свисюк И.В.* Агрометеорологические прогнозы, расчеты, обоснования. Л.: Гидрометеоиздат, 1991.
12. *Сивков С.И.* Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 232 с.
13. *Сиротенко О.Д.* Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 167 с.
14. *Страшная А.И.* Развитие методов агрометеорологических прогнозов урожайности зерна кукурузы // Агрометеорология XXI века: Материалы Международной научной конф. М.: Изд-во РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2009. С. 131–143.
15. *Чирков Ю.И.* Агрометеорологические условия и продуктивность кукурузы. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 251 с.
16. *Monsi M., Saeki T.* Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion // J. Japanese Botan. 1953. V. 14. N. 1. P. 22–52.

Use of remotely-sensed data for modeling crop production of maize

A.D. Kleshenko, T.A. Naidina, T.A. Goncharova

*National Research Institute of Agricultural Meteorology,
249038, Obninsk, Lenin's Av., 82,
e-mail: t-naidina@yandex.ru*

Remotely-sensed data was used in new dynamic simulation model of crop production of maize. On the basis of the simulation model the dynamic statistical method for the purpose of predicting the yield of grain maize was developed for using in the operational practice of Hydromet. The efficiency of the method of forecasting crop yields with and without the satellite information in the simulation model of growth and forming of maize grain was estimated for regions of the South and the North Caucasus federal district.

Keywords: remotely-sensed data, NDVI, maize, simulation model, productivity, crop production.