

Использование данных дистанционного зондирования для моделирования физиологических процессов растений в динамических моделях прогнозирования урожая

А.Д. Клещенко, Т.А. Найдина

*ГУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
сельскохозяйственной метеорологии»,
249038, Обнинск, проспект Ленина 82
E-mails: t-naidina@yandex.ru*

Рассмотрены возможности использования данных дистанционного зондирования в динамических имитационных моделях прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур. Установлена взаимосвязь наземных и спутниковых данных. Показано, что вегетационный индекс NDVI пахотных земель достаточно хорошо отражает сезонный ход фотосинтеза сельскохозяйственных культур. Представлены результаты использования данных дистанционного зондирования в действующей динамической модели прогнозирования урожайности яровой пшеницы.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, динамическая имитационная модель, урожайность, вегетационный индекс NDVI, фотосинтез.

Введение

В настоящее время при оценке состояния посевов сельскохозяйственных культур все большее применение, наряду с наземной информацией, получают данные дистанционного зондирования. Как показывают исследования, большинство параметров сельскохозяйственных посевов, такие как листовой индекс, густота стояния растений, биомасса репродуктивных органов и др., оказывают влияние на отражательные характеристики посевов в отдельных участках спектра и, следовательно, могут быть восстановлены по измерениям указанных характеристик. Таким образом, существует возможность усовершенствования современных динамических имитационных моделей прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур. Усовершенствование моделей прогнозирования урожайности возможно путем замены расчетных параметров базовой модели на параметры, определяемые по измерениям со спутников Земли.

В ряде работ данные дистанционного зондирования используются в регрессионных моделях оценки состояния урожая (Антонов, Сладких, 2009), методах прогнозирования урожайности по году-аналогу (Толпин, Барталев и др., 2009) для контроля расчетных значений в модели биопродуктивности (Брыксин, 2009).

Целью данной работы является оценка возможности использования данных дистанционного зондирования для моделирования физиологических процессов сельскохозяйственных культур в динамических имитационных моделях прогнозирования урожайности.

Данные дистанционного зондирования получены со сканера MODIS (спутник TERRA). По орбитальным изображениям MODIS вычисляется вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Huete и др., 1999):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где NIR и RED – измеряемые яркости ближнего инфракрасного (0,75 – 1,3 мкм) и красного (0,60 – 0,75 мкм) каналов сканера MODIS.

Выбор NDVI в качестве спутниковой информации для использования в динамических имитационных моделях обусловлен следующими причинами: 1) сканер MODIS в указанных каналах имеет высокое пространственное разрешение (250 м); 2) NDVI позволяет уменьшить влияние таких характеристик окружающей среды, как условия освещения, высота Солнца, параметры атмосферы и др.; 3) наличием непрерывного десятилетнего ряда наблюдений среднеобластного NDVI; 4) получение и обработка NDVI осуществляется на единой методологической основе; 5) возможностью получения среднеобластного NDVI в оперативном режиме для прогнозирования урожая.

В данной работе использовалась спутниковая информация, представленная на сервере института космических исследований (ИКИ) РАН.

1. Установление взаимосвязи физиологических процессов растений с данными дистанционного зондирования

Вегетационные индексы NDVI представлены по субъектам РФ для пахотных земель и отдельно для озимых культур.

Чтобы установить связь между спутниковыми данными и наземными наблюдениями, в данной работе из NDVI всей пашни ($NDVI_{all}$) «выделены» NDVI яровых культур ($NDVI_{summ}$) по формуле (Найдина, 2010):

$$NDVI_{summ} = \frac{NDVI_{all} - NDVI_{wint} \cdot S}{1 - S}, \quad (2)$$

где S – доля площади, занимаемой озимыми культурами, в площади всех пахотных земель для конкретного года, $NDVI_{summ}$ – вегетационный индекс яровых культур, $NDVI_{wint}$ – вегетационный индекс озимых культур, $NDVI_{all}$ – вегетационный индекс пахотных земель.

На первом этапе была установлена связь дистанционных измерений с началом и окончанием периода вегетации сельскохозяйственных культур для территории Краснодарского края.

Построены графики связи NDVI пашни с датами образования наибольшей площади листовой поверхности (фаза «колошение/цветение» у зерновых культур, фаза «закрытие междурядий» у овощей) сельскохозяйственных культур с 2001 по 2010 год. Для каждого года период максимальных значений NDVI пахотных земель включает в себя даты образования наибольшей площади листовой поверхности всех сельскохозяйственных культур (рис. 1).

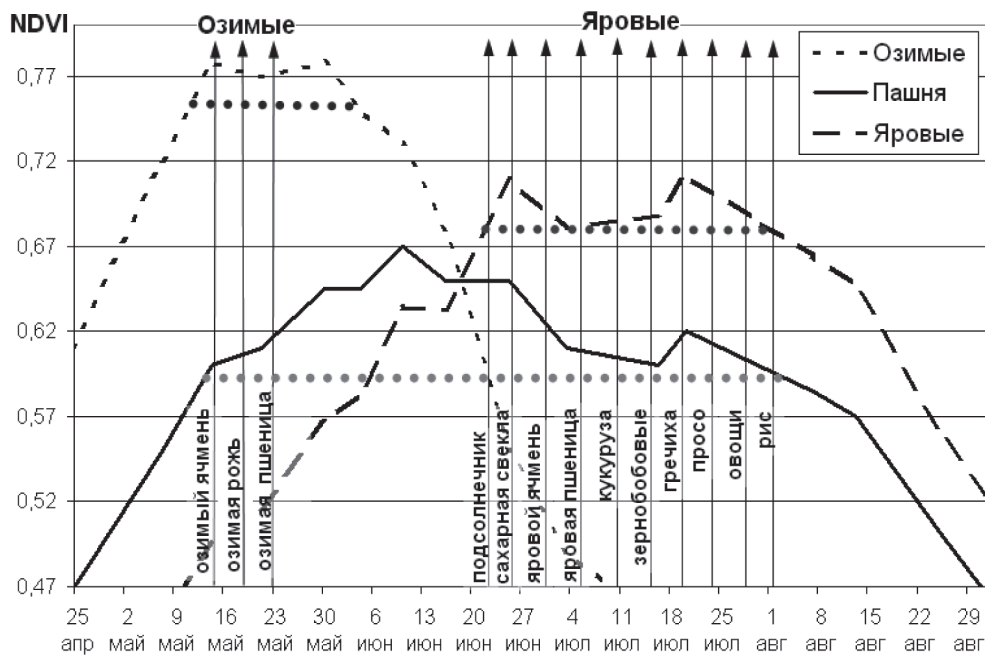


Рис. 1. Связь NDVI с датами наличия наибольшей площади листовой поверхности сельскохозяйственных культур в Краснодарском крае в 2005 году

На рисунке 1 видно, что NDVI пашни хорошо отражает динамику роста листовой поверхности или, другими словами, сезонный ход интенсивности фотосинтеза любой сельскохозяйственной культуры, что позволяет использовать значения вегетационных индексов пахотных земель в блоке расчета фотосинтеза в динамических моделях продукционного процесса сельскохозяйственных культур (Найдина, 2010).

2. Использование данных дистанционного зондирования в динамических моделях прогнозирования урожайности

Используемая базовая модель формирования урожая сельскохозяйственных культур включает количественное описание процессов фотосинтеза, дыхания и роста (Полевой, 1988).

Урожайность растений в первую очередь зависит от размеров ассимилирующей поверхности культуры в период вегетации и от интенсивности фотосинтеза растения.

Листовой индекс, или относительная площадь ассимилирующей поверхности растений, от которой зависит эффективность использования ФАР и, в конечном счете, интенсивность суммарного фотосинтеза посевов, в значительной мере определяет продуктивность растений.

В динамических моделях рост площади листьев посева определяется расчетным путем: при положительном приросте биомассы листьев по формуле (Полевой, 1988):

$$L^{j+1} = L^j + \frac{\Delta m_l^j}{\Delta t} \frac{1}{Z_l} \quad \text{при} \quad \frac{\Delta m_l^j}{\Delta t} \geq 0, \quad (3)$$

где Z_l – удельная поверхностная плотность листьев, j – номер расчетной декады, Δm_l^j – прирост биомассы листьев.

При отрицательном приросте биомассы, т.е. при «старении» уравнение расчета относительной площади листовой поверхности растений имеет следующий вид:

$$L^{j+1} = L^j - \frac{\Delta m_l^j}{\Delta t} \frac{1}{Z_l k_s} \quad \text{при} \quad \frac{\Delta m_l^j}{\Delta t} < 0, \quad (4)$$

где k_s – параметр, характеризующий критическое значение уменьшения фитомассы листьев, при котором начинается ее отмирание.

В данной работе вместо расчетного значения относительной площади листьев посева используется измеренное значение вегетационного индекса NDVI за каждую декаду текущего года в связи с тем, что: 1) листовой индекс, как и NDVI, является безразмерной величиной и определяется как отношение суммарной площади листьев растений к площади почвы, на которой растут сельскохозяйственные культуры, 2) значения вегетационного индекса NDVI хорошо коррелируют со значениями листового индекса (Евтюшкин, Рычкова, 2004).

При исследовании взаимосвязи NDVI с листовым индексом были использованы данные наземных наблюдений площади листовой поверхности кукурузы, по результатам полевых опытов с 2003 по 2007 год на опытной станции Кубанского государственного аграрного университета, расположенной в центральной зоне Краснодарского края (Шиленко, Сысенко и др., 2007).

После приведения значений площади листовой поверхности к размерности i^2 / i^2 и осреднения для различных уровней плодородия почвы и густоты стояния растений, было получено 20 фактических значений листового индекса, соответствующие 20-ти значениям по Краснодарскому краю за 2003 – 2007 годы (рис.2).

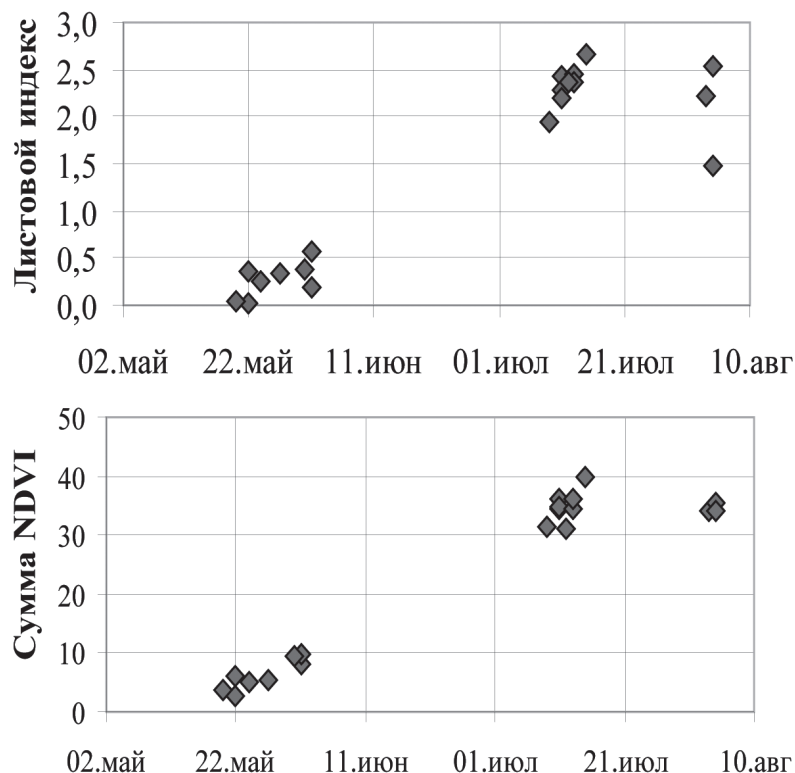


Рис. 2. Сезонный ход листового и вегетационного индексов в Краснодарском крае

Коэффициент корреляции относительной площади листовой поверхности с вегетационным индексом $NDVI$ пахотных земель без учета вида культур составил $-0,05 \pm 0,24$, а с вегетационным индексом $NDVI$ яровых культур $-0,90 \pm 0,10$. Следовательно, для расчета листового индекса, по мнению авторов, можно использовать искусственный безразмерный показатель относительной площади листовой поверхности кукурузы – $NDVI$ яровых культур ($NDVI_{summ}$). В данной работе была получена следующая формула расчета листового индекса:

$$L = 12,36 \cdot NDVI_{summ} - 6,09. \quad (5)$$

Для исследования взаимосвязи вегетационного и листового индексов, $NDVI_{summ}$ был просуммирован от начала всходов до фазы «выметывание метелки», т.е. от начальной до конечной фазы положительного прироста биомассы листьев.

При отрицательном приросте биомассы листьев (после фазы «выметывание метелки») для описания роста их ассимилирующей поверхности от полученной суммы $NDVI_{summ}$ за каждый день периода вегетации вычитались приращения $NDVI_{summ}$. Таким образом, для расчета листового индекса при положительном приросте биомассы листьев использовалась величина $\sum NDVI_i$, рассчитанная по формуле:

$$\sum NDVI_i = \sum NDVI_{i-1} + NDVI_i, \quad (6)$$

При отрицательном приросте биомассы, т.е. при «старении» листьев величина $\sum NDVI_i$ рассчитывалась следующим образом:

$$\sum NDVI_i = \sum NDVI_{i-1} - (\max NDVI - NDVI_i). \quad (7)$$

На рисунке 3 представлена зависимость листового индекса кукурузы от суммы $NDVI$ яровых культур (6), (7) в Краснодарском крае. Коэффициент корреляции площади листовой поверхности с полученным рядом $\sum NDVI_i$ яровых культур равен $0,98 \pm 0,05$.

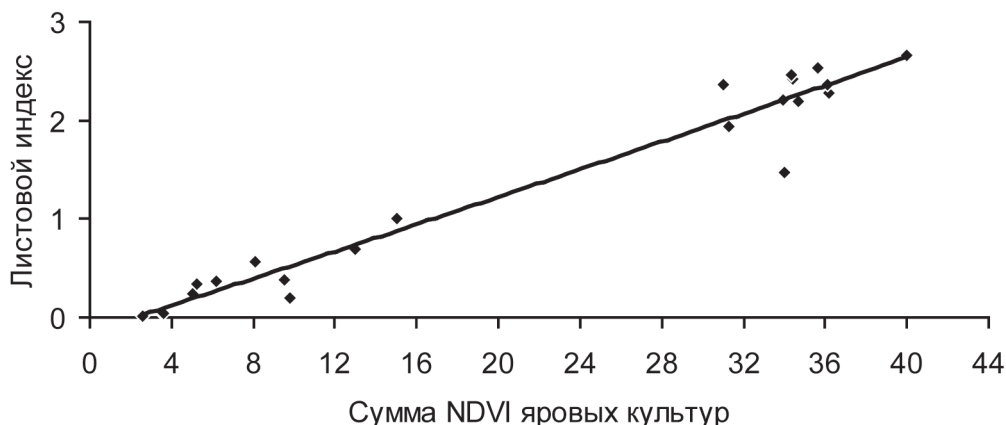


Рис. 3. Зависимость листового индекса кукурузы от суммы $NDVI$ яровых культур в Краснодарском крае

Ход листового индекса кукурузы хорошо согласуется с ходом суммарного NDVI яровых культур в течение периода вегетации кукурузы.

Зависимость листового индекса L кукурузы от NDVI яровых культур в Краснодарском крае выражается регрессионным уравнением, которое можно, на наш взгляд, использовать при разработке динамической модели прогнозирования урожая кукурузы для территории Краснодарского края:

$$L = 0,07 \cdot \sum NDVI_{summ} - 0,16. \quad (8)$$

На графике представлены фактические и рассчитанные по данному уравнению (8) значения листового индекса кукурузы в Краснодарском крае (рис. 4).

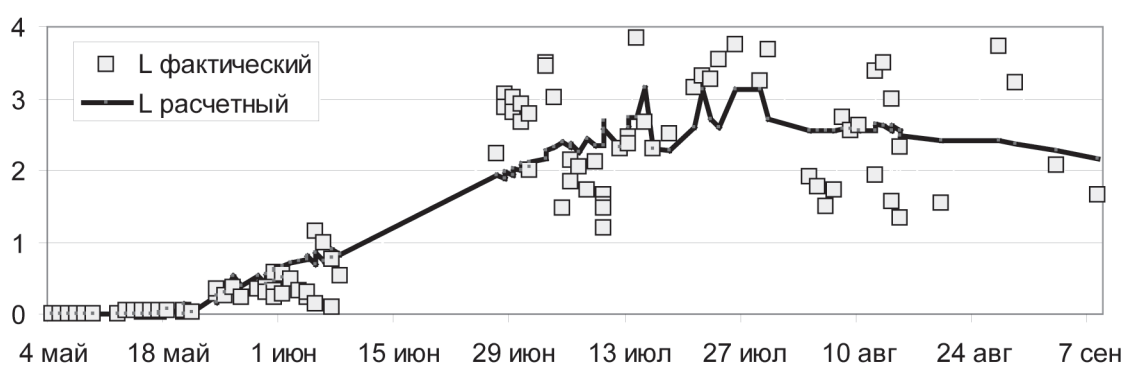


Рис. 4. Фактическое и расчетное значение листового индекса кукурузы в Краснодарском крае

Такой расчет не является универсальным, т.к. отсутствуют фактические данные относительной площади листовой поверхности в течение вегетационного периода для других территорий произрастания и других сельскохозяйственных культур.

Рассмотрим расчет фотосинтеза в динамической модели прогнозирования урожая. Изменение фотосинтеза в онтогенезе в модели учтено через функцию, которая описывает интенсивность фотосинтеза листьев в зависимости от физиологического возраста растения. Эта функция называется «онтогенетической кривой фотосинтеза» и описывается выражением (Полевой, 1988):

$$\alpha^j = e^{-\ln \alpha_0 \left(\frac{\sum T - \sum T_m}{\sum T_m} \right)^2}, \quad (9)$$

где $\sum T$ – сумма эффективных температур нарастающим итогом; $\sum T_m$ – сумма эффективных температур, при которой наблюдается максимальная интенсивность фотосинтеза листьев; α_0 – начальная интенсивность фотосинтеза по отношению к максимально возможной на начало вегетации при $\sum T = 0$.

Значения относительного показателя интенсивности фотосинтеза и NDVI близки. И, кроме того, ход NDVI лучше отражает важнейшую закономерность роста растений, а именно, ход NDVI показывает, что в начальный период темпы роста, а значит и интенсивность фотосинтеза, низкие (Найдина, 2010).

Для оценки возможности включения вегетационного индекса в уравнение для расчета интенсивности фотосинтеза была использована динамико-статистическая модель прогнозирования урожайности яровой пшеницы в Краснодарском крае, которая в настоящее время используется в оперативной работе.

В действующей модели среднее отклонение фитомассы репродуктивных органов от фактического значения за 2001 – 2010 годы составляет 9,5 %. При замене значений, снятых с онтогенетической кривой фотосинтеза, ежедекадными индексами NDVI среднее отклонение от факта составило 7 %.

При использовании NDVI отклонения урожайности не превысили 13% от фактического значения, и при этом в 2003 г. (год минимального урожая яровой пшеницы) и в 2008 г. (год максимального урожая яровой пшеницы) прогнозы стали «оправдавшимися».

Заключение

Исследование возможностей использования данных дистанционного зондирования для моделирования физиологических процессов растений в динамических имитационных моделях прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур позволило сделать следующие выводы:

- 1) величина NDVI достаточно адекватно отражает сезонный ход фотосинтеза всех сельскохозяйственных культур;
- 2) ход NDVI хорошо согласуется с кривой интенсивности фотосинтеза;
- 3) для территории Краснодарского края были получены зависимости листового индекса кукурузы от вегетационного индекса NDVI (5) и (8),
- 4) использование NDVI в блоке расчета фотосинтеза в действующей модели прогнозирования урожайности яровой пшеницы дало положительные результаты;
- 5) замена теоретической кривой «сезонного хода фотосинтеза» на измеренные значения вегетационного индекса, привела к повышению оправдываемости в годы с экстремальными условиями.

Полученные результаты дают основание полагать, что вегетационный индекс NDVI может быть использован как во вновь создаваемых динамических моделях прогнозирования урожайности, так и в действующих моделях при их усовершенствовании.

Литература

1. Антонов В.Н., Сладких Л.А. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ. – Геоматика, 2009, №3.
2. Брыксин В. М. Разработка математической модели и программных средств оценки урожайности зерновых культур в условиях Западной Сибири: автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук. – Барнаул, 2009. 22 с.
3. Евтюшкин А.В., Рычкова Н.В. Изучение динамики вегетационного индекса сельскохозяйственной зоны Западной Сибири по данным NOAA и подспутниковых полигонных измерений // В сб.: Информационные технологии и космический мониторинг. Материалы 3-й научно-практической конференции «Электронная Россия». – Екатеринбург, «Издательство Баско», 2004. С. 54 – 61.
4. Найдина Т. А. Использование спутниковой информации в динамических моделях прогнозирования урожая сельскохозяйственных культур.// Всб.: Материалы XIV Междунар. науч. конф., по-

- свящ. памяти генерал. конструктора ракет.-космич. систем академика М. Ф. Решетнева. – Красноярск, 2010. С. 197 – 198.
5. *Полевой А. Н.* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л., Гидрометеоздат, 1988. 320 с.
 6. *Сысенко И. С., Азаренко А. М., Рудяга А. С.* Рост, развитие и урожайность зерна кукурузы в зависимости от приемов ее возделывания на выщелоченном черноземе Западного Предкавказья. – Научный журнал КубГАУ, 2007 №31(7).
 7. *Толпин В.А., Барталев С.А., Матвеев А.М., Лупян Е.А.* Возможности анализа архивов спутниковых данных для выбора годов аналогов в системе дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель агропромышленного комплекса (СДМЗ АПК) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2009, вып. 6, т. II. С. 560 – 571.
 8. *Шиленко П. Ю.* Влияние системы основной обработки почвы, доз удобрений и гербицидов на продуктивность кукурузы на выщелоченных черноземах Западного Предкавказья: автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата с.-х. наук. – Краснодар, 2006.
 9. *Huete A., Justice C., van Leeuwen W.* Modis vegetation index (MOD13). Algorithm theoretical basis document. Verion 3. April, 1999. 120 с.

Use of remotely-sensed data for modeling of physiological process of plants in the simulation models of forecasting of productivity of agricultural crops

A. D. Kleshenko, T. A. Naidina

*All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology,
249038, Obninsk, 82 Lenin's avenue
E-mails: t-naidina@yandex.ru*

The opportunities to use of the remotely-sensed data in the simulation models of forecasting of productivity of agricultural crops are considered. The interrelation of the ground and satellite data is established. It is shown, that normalized difference vegetation index (NDVI) of arable lands well enough reflects a seasonal course of photosynthesis of agricultural crops. The equation of calculation of the leaf area index on the satellite data for grain crops is obtained. The results to use of the remotely-sensed data in the working simulation model of forecasting of productivity of spring wheat are submitted.

Keywords: remotely-sensed data, simulation model, productivity, normalized difference vegetation index (NDVI), photosynthesis.