
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМЫХ КУЛЬТУР УКРАИНЫ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Наталья Куссуль, Николай Ильин, Сергей Скакун, Алла Лавренюк

Аннотация: Оценка состояния растительности является одной из задач, для которой использование данных дистанционного зондирования Земли позволяет существенно снизить трудоемкость решения и получить качественно новые результаты. Решение в дальнейшем может быть использовано для задач прогнозирования урожайности, возникающих при экономическом планировании. В данной работе предлагаются методы оценки площади озимых культур и прогнозирования урожайности озимой пшеницы с использованием спутниковых данных.

Ключевые слова: прогнозирование урожайности.

ACM Classification Keywords: J.2 Physical sciences and engineering - Earth and atmospheric sciences, C.5.0 Computer system implementation – General.

Conference: The paper is selected from XIVth International Conference "Knowledge-Dialogue-Solution" KDS 2008, Varna, Bulgaria, June-July 2008

Введение

Задачи оценки состояния растительности и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур составляют основу современных исследований в области точного земледелия [1] и экономического планирования в аграрной промышленности [2]. Наиболее перспективные направления исследований связаны с ассимиляцией данных дистанционного зондирования Земли в существующие модели развития растений и созданием новых методов на их основе [3].

Прикладное значение оценки состояния и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур выделено в ряде международных и национальных программ. Так, оценка состояния растительности в контексте систем поддержки принятия решений для проблем устойчивого развития и экономической безопасности определена приоритетным заданием международной «системы систем» GEOSS [3]. В рамках реализации Common Agricultural Policy [4] Европейским союзом поддерживается проект MARS (Monitoring Agriculture through Remote Sensing techniques) [5], результатом которого является получение прогноза урожайности основных сельскохозяйственных культур (для злаковых заявлена точность более 1 ц/га [6]).

В Украине система мониторинга состояния сельскохозяйственных культур и прогнозирования урожайности на основе спутниковых данных разрабатывается в рамках программы «Аэрокосмические и наземные наблюдения в интересах устойчивого развития и безопасности» (GEOUA), формируемой по решению совместного заседания Президиума Национальной академии наук Украины (НАНУ) и Коллегии Национального космического агентства Украины (НКАУ) от 17.01.2007.

В данной работе представлены первые результаты работ по созданию системы мониторинга состояния и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур программы GEOUA.

Методы прогнозирования урожайности и оценки состояния растительности

Растения обладают уникальным спектром поглощения, определяемым наличием различных пигментов, содержанием воды и физической структурой листьев [7]. Спектр меняется с течением времени в зависимости от фазы развития, биологического вида, состояния окружающей среды и состояния

растения. Поэтому спектр поглощения принципиально может быть использован для задач оценки состояния растительности.

На уровне растительного покрова идентификация химических составляющих растений представляется сложной задачей, так как отражение сильно зависит от размеров, ориентации листьев, плотности растительности и характеристик среды, таких как тип грунта и угол падения лучей Солнца [7]. Несмотря на это, некоторые биохимические свойства растений могут быть восстановлены по спектру отражения растительного покрова. Известны успешные применения спектра отражения для идентификации вида растений [8], мониторинга содержания воды и характеристик удобрений в почве [9], задач фенологии растений [10], оценки площади листового покрова (leaf area index, LAI) [11], оценки биомассы [12].

Существующие методы прогнозирования урожайности можно разделить на методы на основе оценки физических факторов окружающей среды, методы на основе прямых оценок содержания хлорофилла и методы на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Среди методов на основе оценок физических параметров окружающей среды наиболее распространенными являются статистические методы и механистические модели роста растений.

Статистические методы прогнозирования урожайности на основе оценки физических факторов среды используют предположение о существовании простой зависимости между характеристиками окружающей среды и урожайностью. Для выявления такой зависимости были применены методы линейного и нелинейного регрессионного анализа, нейронные сети [13]; исследованы зависимости урожайности от состава почвы (СЕС, рН, содержание органических веществ, фосфора, кальция, магния, калия), характеристик почвы (текстура, тип, глубина верхнего слоя), метеорологических параметров (осадки, температура, солнечная радиация) [13]. Методы данного класса редко применимы на практике вследствие большой трудоемкости необходимых наземных измерений и сложности исследуемых зависимостей.

Механистические модели роста используются для исследования процесса усвоения углерода и прироста биомассы. Как правило, моделируется рост растений под влиянием метеорологических параметров, характеристик грунта и состава вносимых удобрений; типичными входными данными являются температура, количество осадков, количество солнечной радиации; количество и тип удобрений, плотность насаждений, параметры ирригации и обработки, тип, глубина верхнего слоя, содержание гумуса в почве. Большинство моделей применимы только к одному виду растений, например, SOYGRO для бобовых [14], CERES-Maize [15] для кукурузы, CERES-Wheat [16] для пшеницы, WARM для риса [17]. Известны также универсальные модели SUCROS (Simple and Universal Crop growth Simulator [18]), STICS (Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard [19]), WOFOST [20]. Преимущества механистических моделей – физическая обоснованность и меньшие требования к объемам калибровочных данных по сравнению со статистическими моделями. Среди недостатков рассматриваемых моделей – вычислительная сложность.

Методы на основе прямых оценок содержания хлорофилла основаны на наземных измерениях SPAD датчиков [21]. Была обнаружена высокая степень корреляции между количеством хлорофилла и урожайностью для различных сельскохозяйственных культур. Область применения методов ограничена в связи с необходимостью большого количества наземных измерений.

Методы на основе данных дистанционного зондирования Земли можно разделить на два класса: а) методы, связывающие урожайность и спектральные характеристики с использованием регрессионных моделей и вегетационных индексов; б) методы, использующие оценки состояния растительности (такие как LAI и биомасса) по данным ДЗЗ для калибровки механистических моделей роста.

Одним из простейших методов является использование линейной регрессии для моделирования зависимости урожайности от спектра поглощения растительного покрова [22]. Пики поглощения хлорофилла лежат в красной и синей областях спектра, поверхность листьев отражает в ближнем инфракрасном диапазоне; рассматриваемые данные могут быть использованы для оценки активности

фотосинтеза растений, и, следовательно, урожайности. Недостаток метода связан с сильной зависимостью яркости в исследуемых спектральных диапазонах от параметров среды, в частности атмосферы, угла падения света, типа почвы [7].

Для преодоления недостатков предыдущего метода применяются индексы (vegetation indices, VI) – отношение или разность интенсивности в двух и более спектральных диапазонах. Эффективность методов на основе индексов также зависит от состояния окружающей среды. Для повышения эффективности оценки состояния растительного покрова разработаны индексы, устойчивые к определенному классу источников шума: perpendicular vegetation index (PVI), soil-adjusted vegetation index (SAVI), transformed soil-adjusted vegetation index (TSAVI), atmospherically resistant vegetation index (ARVI) [23]. Известны успешные примеры применения индексов green normalized vegetation index (GNDVI), green/NIR ratio (SR), photochemical reflectance index (PRI) для задач оценки состояния растительности и прогнозирования урожайности. Для повышения точности прогноза в работах [24,25] предложено использовать суммарное значение индексов (рассматривались NDVI, SR) за сезон.

Наиболее перспективными с точки зрения адаптируемости являются методы на основе калибровки моделей роста по данным ДЗЗ. Процесс интеграции данных ДЗЗ в механистические модели роста состоит из двух этапов – оценки параметров растительности (как правило, LAI) по данным ДЗЗ и настройки модели на основе полученных параметров. Так, в работе [26] индекс weighted difference vegetation index (WDVI) применен для оценки LAI на основе моделей SAIL и PROSPECT. Полученный LAI использован для калибровки модели SUCROS для исследования урожайности сахарной свеклы. В работе [27] приведены результаты калибровки модели SUCROS по данным ERS SAR для прогнозирования урожайности сахарной свеклы, картофеля и озимой пшеницы. Модель CROPGRO для сои была адаптирована с использованием индекса NVI в работе [28]. Известны результаты настройки модели CERES-Wheat по данным LAI [29]. В результате настройки для рассмотренных моделей ошибка прогноза снизилась в 2-3 раза.

Оценка площади сельскохозяйственных культур

Одним из основных параметров в задачах экономического планирования является прогноз урожая, определяющийся урожайностью и площадью полей сельскохозяйственных культур. Необходимые статистические данные о площади полей в ряде задач недоступны – вследствие трудоемкости получения или недостаточной точности статистических источников. Методы на основе данных ДЗЗ позволяют преодолеть недостатки наземных методов оценки площади сельскохозяйственных культур.

В данной работе предлагается метод оценки площади озимых культур на территории Украины. Метод основан на анализе временного ряда индекса EVI [30]. В основу положено предположение о наличии достаточного количества хлорофилла в озимых культурах в период прекращения роста (вторая половина ноября) для идентификации на фоне грунта и других растений. Схема алгоритма построения карты полей озимых культур для территории Украины приведена на рис. 1.

Выделение полей под озимой культурой производится на основе пороговой фильтрации причем пороговые значения индивидуальны для административных единиц Украины. Доступные статистические данные Министерства статистики о площадях посевных территорий озимых культур в 2005-2007 гг. были использованы для нахождения пороговых значений индекса EVI (данные Terra/MODIS, продукт MOD13A2, вторая половина декабря), таких, что площадь посевных территорий (данные Terra/MODIS, продукт MOD12Q1) со значением индекса EVI большим порогового имела наименьшее отклонение от площади под озимыми культурами. В дальнейшем использовано среднее по годам пороговое значения для каждой области. При настройке по 2005-2006 гг. и верификации на данных 2007 г. отклонение от статистических данных не превышало 9.1 %.

Полученная данным методом карта полей под озимыми культурами в дальнейшем использована для прогнозирования урожайности. Результаты оценки для 2008 г. приведены на рис. 2.

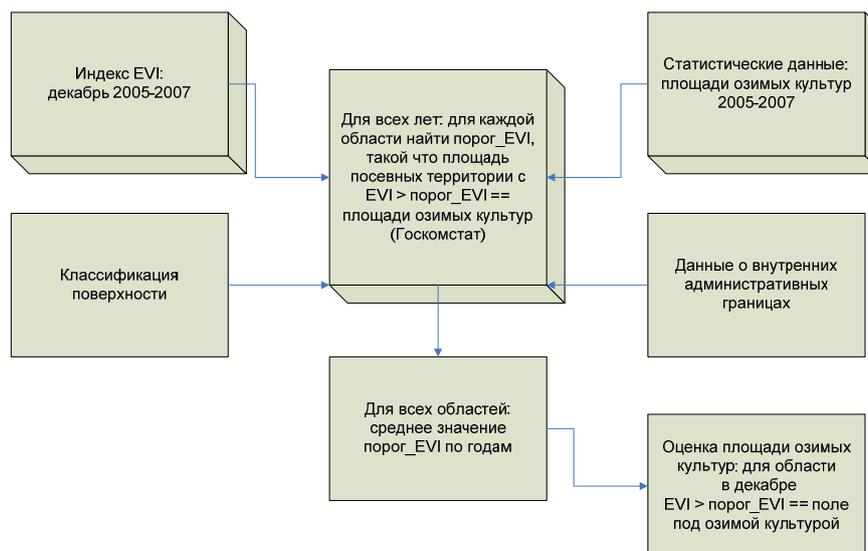


Рис. 1. Оценка площади озимых культур



Рис. 2. Оценка территорий под озимыми культурами (Украина, 2008 г.)

Прогнозирование урожайности озимой пшеницы для территории Украины

Для прогнозирования урожайности на текущем этапе применен метод на основе вегетационных индексов. Преимуществом предлагаемого метода является относительно небольшое количество входных данных, небольшая вычислительная сложность и достаточно высокая точность. Среднее значение индекса EVI на территории полей под озимыми культурами области в 2005-2007 гг. использованы для линейного регрессионного анализа. Карты полей получены методом, описанным в предыдущем разделе. Схема алгоритма прогнозирования урожайности озимой пшеницы на территории Украины приведена на рис. 3.

Индекс EVI продукта MOD13A2 доступен с 16 дневным временным разрешением. Для каждого 16 дневного периода была построена зависимость урожайности от значения EVI в 2005-2007 гг. Полученные зависимости в дальнейшем использованы для прогнозирования урожайности в 2008 г.

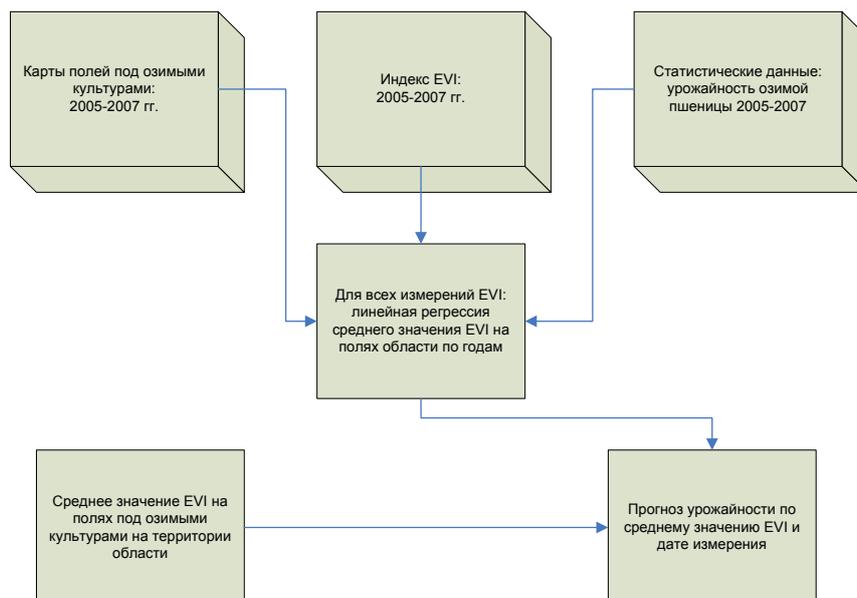


Рис. 3. Прогнозирование урожайности озимой пшеницы на территории Украины

При верификации метода на статистических данных урожайности 2007 г. ошибка прогноза составляет 13.4-17.2 %.

Прогнозируемые значения урожайности озимой пшеницы 2008 г. приведены в табл. 1.

Табл. 1. Прогноз урожайности озимой пшеницы в Украине, 2008 г.

Область	Урожайность, ц/га
АР Крым	22.1
Винницкая	31.3
Волынская	23.6
Днепропетровская	27.2
Донецкая	25.5
Житомирская	24.2
Закарпатская	29.3
Запорожская	27.5
Ивано-Франковская	22.4
Киевская	29.7
Кировоградская	32.1
Луганская	19.5
Львовская	27.2
Николаевская	29.1
Одесская	24.9
Полтавская	27.6
Ровенская	21.7
Сумская	20.6
Тернопольская	24.3
Харьковская	23.5
Херсонская	27.2
Хмельницкая	18.9
Черкасская	32.4
Чернивецкая	27.2
Черниговская	23.1
Средняя урожайность	25.7

Результаты прогнозирования CGMS

Для территории Украины доступны результаты прогнозирования европейской системы CGMS, поддерживаемой в рамках проекта MARS [5]. Прогнозируемое среднее значение урожайности пшеницы в 2008 г. для Украины составляет 28 ц/га. Отклонение предложенного метода от прогноза CGMS составляет 8.3 %.

Выводы

В работе предложены методы оценки площади полей озимых культур и прогнозирования урожайности озимой пшеницы на основе данных дистанционного зондирования Земли. Оценка площади полей озимых культур основана на анализе временного ряда индекса EVI в предположении о наличии достаточного количества хлорофилла в озимых культурах в период прекращения роста (вторая половина декабря) для идентификации на фоне грунта и других растений. При настройке по 2005-2006 гг. и верификации на данных 2007 г. отклонение от статистических данных не превышало 9.1 %. Дальнейшее направление исследований связаны с адаптацией метода для весенних сельскохозяйственных культур.

Для прогнозирования урожайности среднее значение индекса EVI на территории полей под озимыми культурами области в 2005-2007 гг. использованы для линейного регрессионного анализа. При верификации метода на статистических данных урожайности 2007 г. ошибка прогноза не превышает 17.2 %. Для повышения точности прогноза в дальнейшем предполагается использовать полученные результаты для калибровки механистической модели роста WOFOST.

Литература

- [1] Whelan, B.M., McBratney, A.B. The "Null Hypothesis" of Precision Agriculture Management // Precision Agriculture, Volume 2, Number 3. - 2000. - 265-279 p.
- [2] Mohamed, A.A.; Sharifi, M.A.; Keulen, H. van. An integrated agro-economic and agro-ecological methodology for land use planning and policy analysis // Journal of Applied Earth Observation and Geo information. 2. - 2000. - 87-103 p.
- [3] GEOSS 10-Year Implementation Plan: Reference Document // ESA Publication Division. – 2005. – 209 p. ISSN 0379-6566, ISBN 92-9092-986-3
- [4] The common agricultural policy. - Directorate-General for Agriculture and Rural Development European Commission. - 2006. - 24 p. ISSN 1681-7206, ISBN 92-79-00398-4.
- [5] MARS project, <http://www.marsop.info/>.
- [6] Report from the Commission to the Council and the European Parliament on implementation of Decision No 1445/2000/EC on the application of aerial-survey and remote-sensing techniques to the agricultural statistics - COM(2007) 552 final. - Brussels, 27.9.2007.
- [7] Campbell, J. B. Introduction to remote sensing. - New York: Guilford Press. - 2002.
- [8] Serpico S. B., L. Bruzzone, and F. Roli. An experimental comparison of neural and statistical non-parametric algorithms for supervised classification of remote-sensing images // Pattern recognition letters 17(13) - 1996. - 1331-1341 p.
- [9] Lelong, Camille C. D., P. C. Pinet, and H. Poilvé. Hyperspectral imaging and stress mapping in agriculture: A case study on wheat in Beauce (France) // Remote sensing of environment 66(2). - 1998. - 179-191 p.
- [10] Railyan, V. Y., and R. M. Korobov. Red edge structure of canopy reflectance spectra of triticale // Remote sensing of environment 46(2). - 1993. - 173-182 p.
- [11] Aparicio, N., D. Villegas, J. L. Araus, J. Casadesus, and C. Royo. Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat // Crop science 42. - 2002. - 1547-1555 p.
- [12] Serrano, L., I. Filella and J. Penuelas. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies // Crop Science 40(3). - 2000. - 723-731 p.
- [13] Drummond, S. T., K. A. Sudduth, A. Joshi, S. J. Birrell, N. R. Kitchen. Statistical and neural methods for site-specific yield prediction // Transaction of the ASAE 46(1). - 2003. - 5-14 p.
- [14] Wilkerson, G. G., J. W. Jones, K. J. Boote, K. T. Ingram, and J. W. Mishoe. Modeling soybean growth for crop management // Transaction of the ASAE 26. - 1983. - 63-73 p.

- [15] Ritchie, J. T., U. Singh, D. C. Godwin, and T. Hunt. A User's guide to CERES maize-v2.10. - International fertilizer development centre. - Muscle Shoals, AL. - 1989.
- [16] Ritchie, J. T., and S. Otter. Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model // USDA-ARS, ARS-38. - 1985. - 159-175 p.
- [17] Confalonieri, R., Acutis, M., Donatelli, M., Bellocchi, G., Mariani, L., Boschetti, M., Stroppiana, D., Bocchi, S., Vidotto, F., Sacco, D., Grignani, C., Ferrero, A., Genovese, G. WARM: a scientific group on rice modelling // Rivista Italiana di Agrometeorologia, 2. - 2005. - 54-60 p.
- [18] Spitters, C. J. T., H. van Keulen, and D. W. G. van Kraalingen. A simple and universal crop growth simulator: SUCRO87 // Simulation and Systems Management in Crop Protection, edited by R. Rabbinge, S. A. Ward, and H. H. van Laar. - Simulation Monographs 32 (Wageningen: Pudoc) - 1989. - 147-181 p.
- [19] Brisson, N., B. Marry, D. Ripoché, M. H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J. M. Machet, J. M. Meynard, and R. Delécolle. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. 1. Theory and parameterization applied to wheat and corn // Agronomie 18. - 1998. - 311-346 p.
- [20] Supit I., A.A. Hooijer, C.A. van Diepen. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Volume 1: Theory and Algorithms. - EUR 15956. - Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. - 1994. - 146 p.
- [21] Blackmer, T. M. and J. S. Schepers. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn // Journal of production agriculture 8. - 1995. - 56-60 p.
- [22] Ball, S. T. and B. E. Frasier. Evaluating the association between wheat yield and remotely-sensed data // Cereal research communications 21(2-3). - 1993. - 213-219 p.
- [23] Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote sensing of environment 25. - 1988. - 295-309 p.
- [24] Hayes, M. J. and W. L. Decker. Using satellite and real-time weather data to predict maize production // International Journal of Biometeorology 42(1). - 1998. - 10-15 p.
- [25] Maselli, F., S. Romanelli, L. Bottai and G. Maracchi. Processing of CAC NDVI data for yield forecasting in the Sahelian region // International Journal of Remote sensing 21(18). - 2000. - 3509-3523 p.
- [26] Clevers, J. G. P. W., C. Büker, H. J. C. van Leeuwen, and B. A. M. Bouman. Framework for monitoring crop growth by combining directional and spectral remote sensing information // Remote sensing of environment 50(2). - 1994. - 161-170 p.
- [27] Bouman, B. A. M., D. W. G. van Kraalingen, W. Stol, and H. J. C. van Leeuwen. An agroecological modeling approach to explain ERS SAR radar backscatter of agricultural crop // Remote sensing of environment 67(2). - 1999. - 137-146 p.
- [28] Mathew, S. S., J. O. Paz, and W. D. Batchelor. Integrating remotely sensed images to improve spatial crop model calibration. - ASAE paper No. 00-3039. - Milwaukee, Wisconsin:ASAE. - 2000.
- [29] Dente, L., Satalino, G., Mattia, F., Rinaldi, M. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield // Remote Sensing of Environment 112. - 2008. - 1395-1407 p.
- [30] Huete, A., Justice, C., Leeuwen, W. MODIS vegetation index (MOD 13). Algorithm Theoretical Basis Document, http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf.

Информация об авторах

Куссуль Наталья Николаевна - Институт космических исследований НАН и НКА Украины, профессор, доктор технических наук, заведующий отделом, проспект Академика Глушкова 40, 03680 Киев, Украина; e-mail: inform@ikd.kiev.ua

Ильин Николай Иванович - Институт космических исследований НАН и НКА Украины, младший научный сотрудник; проспект Академика Глушкова 40, 03680 Киев, Украина; e-mail: inform@ikd.kiev.ua.

Скакун Сергей Васильевич - Институт космических исследований НАН и НКА Украины, кандидат технических наук, научный сотрудник; проспект Академика Глушкова 40, 03680 Киев, Украина; e-mail: inform@ikd.kiev.ua.

Лавренюк Алла Николаевна - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», кандидат технических наук, доцент, проспект Победы 37, 03056 Киев, Украина; e-mail: inform@ikd.kiev.ua