

## Сільськогосподарські задачі

---

### Возможности прогнозирования урожайности зерновых культур на основе совместного использования многозональных космических снимков AVHRR NOAA и «Landsat TM» (на примере Киевской области)

В. И. Лялько, А. И. Сахацкий, А. Я. Ходоровский,  
Г. М. Жолобак, И. Я. Буянова

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины

#### ВВЕДЕНИЕ

Прогноз урожайности зерновых культур на региональном уровне — один из важнейших вопросов аграрной науки, от достоверности решения которого зависит эффективность политики государства по сельскому хозяйству, и ему всегда уделялось достаточно внимания. Прогноз осуществлялся разными методами, преимущественно по данным наземных исследований, что требовало значительных затрат сил, средств и времени.

В последние годы в разных странах для регионального прогноза урожайности широко используются материалы съемки сканером AVHRR со спутников серии NOAA, которые наиболее полно отвечают поставленной задаче. Для этого разрабатываются системы оптимального мониторинга вегетации растительности и надежной оценки урожайности [1—3, 6—9]. Например, с 1988 года на территории стран ЕС осуществляется программа по применению дистанционного зондирования для статистического учета в сельском хозяйстве, инициированная Главным Управлением сельского хозяйства совместно с Европейским статистическим управлением (Евростат). Эта программа известна как Проект MARS (Monitoring Agriculture by Remote Sensing — мониторинг сельского хозяйства с помощью дистанционного зондирования). Одним из практических приложений этой программы являются методы прогнозирования урожая, которые разработаны на основе компьютерной дешифровки космоснимков с

применением программного обеспечения (CGMS — Crop Growth Monitoring System) для контроля состояния посевов и оценки будущего урожая. Эта система была реализована в 1996 году и основана на агрометеорологических моделях, полученных, главным образом, по метеорологическим и агрономическим данным, а также данным о состоянии грунтов и дополнена космическими снимками низкого разрешения со спутника NOAA. С этого времени при поддержке Совместного исследовательского центра (Испра, Италия) ежегодно издается по шесть бюллетеней MARS, в которых дается текущая оценка урожая таких культур, как пшеница (твердая и мягкая), ячмень, кукуруза и рапс на зерно, подсолнечник, сахарная свекла и картофель. Методология использования снимков NOAA постоянно совершенствуется и дополняется с учетом как региональных особенностей конкретной страны, так и прогресса в технологии получения новых космоснимков, обеспечивающих пространственное разрешение, сравнимое с разрешением аэрофотоснимков.

Цель нашей работы — создание подобной системы прогноза урожайности зерновых культур, в частности озимой пшеницы в пределах Украины. Особенностью создаваемой системы будет максимальное использование дистанционных данных и минимально сопутствующей информации, которую трудно получить из открытых источников. Кроме того, она должна позволять работать в природных условиях Украины, когда мало безоблачных дней, из-за чего существующие методы неприменимы.

Для получения достоверной информации о возможности прогнозирования зерновых культур, как и любого другого биологического объекта, необходим как минимум трехлетний цикл наблюдений.

В Украине подобные работы с использованием съемок со спутников NOAA (пространственное разрешение 1.1 км) не проводились. Предыдущие исследования основывались на данных снимков высокого (20—30 м) и среднего (250 м) пространственного разрешения, при этом решались совсем другие задачи.

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МЕТОДА

Теоретической основой использования сканерных съемок AVHRR со спутника NOAA для прогноза урожайности есть известные зависимости природной продуктивности почв (NPP) от абсорбированной фотосинтетически активной радиации (APAR), которая просуммирована за период вегетации и умножена на определенный коэффициент  $E$ , учитывающий особенности почв и климата данного района.

Так, согласно [4] продуктивность почвы равна

$$P = E \int_0^t f_{\text{par}} \text{PAR} dt, \quad (1)$$

где  $f_{\text{par}}$  — часть фотосинтетически активной радиации (PAR), которая абсорбируется;  $P$  — продуктивность почвы в кг/га, 0 и  $t$  — начало и конец сезона вегетации. Согласно теоретическому и экспериментальному анализу связи между NDVI и APAR [10],  $f_{\text{par}}$  может быть заменена на NDVI, и тогда

$$P = E \int_0^t (a \cdot \text{NDVI} + b) \text{PAR} dt, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  — коэффициенты уравнения регрессии.

Учитывая, что  $E$  и  $\text{PAR}$  являются во многом константами для определенного района, показана возможность оценки NPP только по данным NDVI [5]. Согласно [11] коэффициент  $E$  определяется климатическими условиями, и в первую очередь водным стрессом. Учитывая эти предпосылки, ряд исследователей используют данные съемки со спутника NOAA для создания эмпирических моделей прогнозирования урожайности, в частности зерновых культур [1, 3, 8—9]. Так была установлена зависимость между урожайностью и суммой накопленных NDVI за период вегетации с коэффициентом корреляции около 0.7 [3, 8—9].

В настоящее время ведутся работы, которые должны повысить надежность корреляции спутниковой информации и урожайности. К примеру, делаются

попытки учета метеорологических факторов — осадков  $R_G$ , температуры воздуха  $T_a$ , температуры земли  $T_s$ , солнечной радиации  $T_s^2$  и анализируются возможности использования накопленных сумм NDVI ( $\Sigma \text{NDVI}$ ) за определенные периоды для отдельных видов сельскохозяйственных культур, типов почв и т. д. Для анализа зависимостей используется техника множественной линейной или нелинейной регрессии, а результаты представляются в виде конкретных уравнений.

Например, такое уравнение получено для района Costilla (Испания) [3]. Оно удачно описывает взаимосвязь урожайности зерновых культур со спектральными яркостями по снимкам AVHRR NOAA и агрометеорологическими данными:

$$\text{Yield (кг/га)} = \alpha + \beta \cdot \text{NDVI}_j + \gamma T_s^2 + \delta(T_s - T_a) + \varepsilon R_G, \quad (3)$$

где

$$\text{NDVI}_j = \frac{\sum_{1 \text{ June} - 31 \text{ July}} (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{January}})}{\text{num days}(1 \text{ June} - 31 \text{ July})}, \quad (4)$$

$$R_G = \frac{\sum_{1 \text{ May} - 10 \text{ July}} R_G}{\text{num days}(1 \text{ May} - 10 \text{ July})}, \quad (5)$$

$$T_s^2 = \frac{\sum_{20 \text{ April} - 10 \text{ July}} T_s^2}{\text{num days}(20 \text{ April} - 10 \text{ July})}, \quad (6)$$

$$T_s - T_a = \frac{\sum_{20 \text{ April} - 10 \text{ July}} (T_s - T_a)}{\text{num days}(20 \text{ April} - 10 \text{ July})}; \quad (7)$$

средние значения  $\alpha = 8970$ ,  $\beta = 3590$ ,  $\gamma = -81$ ,  $\delta = 2215$ ,  $\varepsilon = 63$ .

Параметры температуры и осадков, которые входят в уравнение, подчеркивают необходимость информации о водном стрессе, поскольку водные ресурсы обычно являются основным лимитирующим фактором в засушливых регионах. Используя подобное уравнение, можно получить карту прогнозируемой урожайности для всей области исследования.

Аналогичный подход, использующий сумму накопленных NDVI для прогноза урожайности проса на примере Сенегала, изложен в работах [6—9], где сделаны попытки максимально упростить модели прогноза, сохраняя при этом достаточно высокую надежность предсказания. Некоторые дополнительные параметры, кроме суммы накопленных NDVI за определенный период времени, такие как процент обрабатываемых земель, могут достаточно надежно определяться по данным дистанционного зондирования. Примером могут служить уравнения прогноза урожайности проса для районов Сенегала, где обрабатываемые земли составляют более 22.5 %:

$$\begin{aligned}
 Yield = & \\
 = 774.1 & \left( \sum NDVI_{1Sept.-10Okt.} - \sum NDVI_{1May-31May} \right) - \\
 & - 1195 \quad (r^2 = 0.729) \quad (8)
 \end{aligned}$$

В случае, если процент обрабатываемых земель составляет менее 22.5 %, имеется подобное уравнение, но оно менее надежно:

$$\begin{aligned}
 Yield = & \\
 = 3793.7 & \left( \sum NDVI_{1Sept.-10Okt.} - \sum NDVI_{1May-31May} \right) - \\
 & - 254 \quad (r^2 = 0.663). \quad (9)
 \end{aligned}$$

Однако, если при этом знать процент обрабатываемых земель (AGRIPRC), что весьма точно можно установить дистанционными методами, может быть получена более надежная модель:

$$\begin{aligned}
 Yield = & \\
 = 3881.1 & \left( \sum NDVI_{1Sept.-10Okt.} - \sum NDVI_{1May-31May} \right) + \\
 & + 25.0AGRIPRC - 531 \quad (r^2 = 0.763). \quad (10)
 \end{aligned}$$

Неоспоримым преимуществом таких моделей является то, что нет необходимости использовать значительные объемы наземных данных по агрометеорологическим наблюдениям. Во многих случаях такие данные либо трудно собрать, либо их вовсе не существует.

## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

Изложенные ниже результаты исследований являются итогом первого этапа работ, целью которого была оценка возможностей использования спутниковых съемок низкого пространственного разрешения (порядка 1 км) для прогноза урожайности озимой пшеницы на примере Киевской области. Оценка урожайности дается на уровне административных районов.

В работе использованы данные сенсора AVHRR со спутника NOAA. По этим данным вычислялся индекс NDVI для дальнейшего его интегрирования за период вегетации и сопоставления с архивными данными об урожайности. Основное внимание уделялось накоплению исходных данных — спутниковой и наземной информации и их начальной обработке. Для апробирования методических приемов по обработке информации первоначально рассматривались данные об урожайности озимой пшеницы только в 1996 и 1999 гг. Выбор именно этого времени съемки обусловлен тем, что урожайность 1996 г. близка к средней многолетней, а в 1999 г. — была самой низкой за последние 10 лет. Кроме того, были получены снимки за 2001 год, которые предоставлены Украинским центром менеджмента земли и ресурсов, (г. Киев) для апробации методики. Как известно, в 2001 году был получен самый

высокий урожай зерновых за последние 10 лет (39.8 млн т).

В целом система оценки урожайности зерновых на базе съемок со спутника NOAA состоит из следующих стадий:

- организация сбора снимков NOAA AVHRR на протяжении всего вегетационного периода;
- подготовка специального программного обеспечения для обработки снимков AVHRR NOAA;
- создание баз данных в ГИС для проведения пространственного анализа;
- подготовка программного обеспечения для построения моделей прогноза урожайности и собственно прогноз урожайности.

В качестве программного обеспечения, позволяющего провести точную геометрическую и радиометрическую коррекцию снимков, а также для вычисления индекса NDVI применялся программный продукт «ERDAS Imagine».

Для проведения работ были сформированы следующие наборы данных:

1. Все снимки NOAA, которые не содержат значительной облачности в пределах исследуемого района за период апрель — сентябрь 1996 и 1999 года.

2. Цифровые топографические карты района исследований масштаба 1:500000, 1:200000 и для некоторых участков 1:25000.

3. Статистические данные по урожайности зерновых по 25 районам Киевской области в 1996 г. и 1999 г.

4. Агрометеорологические данные.

5. Карта почв Киевской области.

Вся информация была переведена в цифровые форматы для использования в ГИС системах MapInfo и ArcView.

## 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При обработке снимков со спутников NOAA выявилась следующая особенность, свойственная Киевской области — количество снимков, где облачность минимальная и позволяет проводить измерения NDVI, было сравнительно незначительным. За весенне-летний вегетационный период (четыре месяца) таких снимков было получено: семь в 1996 г. и восемь в 1999 г. Остальные снимки оказались неприемлемыми из-за значительной облачности. В связи с этим методики, базирующиеся на использовании суммарных подекадных снимков NOAA для данного региона, неприемлемы.

Была проведена геометрическая и радиометрическая коррекция собранных снимков NOAA и разработана процедура опроса спектральных яркостей

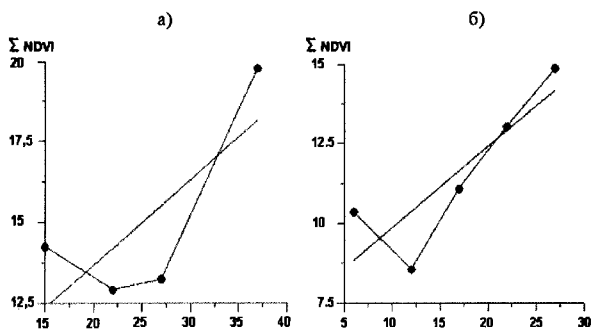


Рис. 1. Зависимость усредненной аккумулятивной суммы нормированного разностного вегетационного индекса (SIGMA NDVI) от урожайности: а — для 1996 г. ( $\Sigma NDVI = 0.2631125(Yield) + 8.402$  ( $r^2 = 0.577$ )), б — для 1999 г. ( $\Sigma NDVI = 0.253355(Yield) + 7.314625$  ( $r^2 = 0.734$ ))

снимков для опорных точек с известными координатами, что позволило затем провести сопоставление наземных и спутниковых данных.

Обработка имеющихся данных дала возможность установить зависимость между усредненным суммарным значением NDVI ( $\Sigma NDVI$ ) за основной период вегетации, продолжительностью около 70 дней (последняя декада апреля — первая декада июля) и усредненной урожайностью (Yield). Эти взаимосвязи для 1996 г. и 1999 г. применительно к районам Киевской области аппроксимируются линейной зависимостью (рис. 1). Анализ зависимостей указывает на необходимость дифференцированного подхода к районам, которые имеют среднюю урожайность более 20 ц/га, отделяя их от тех, которые имеют урожайность 10—20 ц/га. Районы с урожайностью менее 10 ц/га, как правило, плохо вписываются в данные закономерности. Видимо, это связано с тем, что в пределах районов развиты супесчаные и суглинистые почвы, обедненные гумусом и обладающие существенно другими отражательными характеристиками. Следовательно, поиск закономерностей изменчивости урожайности необходимо проводить для территорий с однородными природными условиями, что согласуется с выводами и других исследователей.

Учитывая недостатки обработки снимков AVHRR NOAA предварительного этапа, на котором не определялись конкретные участки формирования посевов зерновых культур, нами начаты работы, которые ставят своей целью более качественную обработку снимков, а именно такая обработка должна, во-первых, определять по данным NOAA пиксели снимков, которые охватывают площади посевов зерновых культур (в первую очередь озимой пшеницы), во-вторых, провести на основе данных именно этих пикселей прогнозирование урожайности

зерновых культур. Таким образом, решаются задачи распределения площадей посевов зерновых культур и прогнозирования урожайности на различных фазах вегетации.

В качестве опорного полигона для отработки методики решения этих задач нами использовалась южная часть Киевской области, и в частности, Мироновский район, где собраны многочисленные данные полевых наблюдений. На данную территорию, кроме серии снимков AVHRR NOAA, также были заказаны снимки высокого пространственного разрешения (30 м/пкл) «Landsat TM» (18.05.2001 г.) и «Landsat TM» (19.06.2001 г.).

Используя программный продукт «ERDAS Imagine 8.4» и наземные наблюдения тестовых участков, была проведена классификация снимков «Landsat TM» по методу максимальной вероятности. В результате классификации были установлены площади посевов зерновых культур, в первую очередь, озимой пшеницы, ржи и ячменя.

Как показала наземная заверка на тестовых участках в Мироновском районе, где проводились полигонные исследования, эти классы растительности выделяются с достаточно высокой надежностью (более 90 %), по космоснимку «Landsat TM», который был сделан 18 мая 2001 года. Надежность классификации указанных классов по снимку «Landsat TM», который был сделан в июне (19.06.2001), несколько ниже. В некоторых случаях яровые зерновые культуры были ошибочно отнесены к озимым. Но хорошо выделяются другие сельскохозяйственные культуры — сахарная свекла, подсолнечник, кукуруза, которые на майском снимке совершенно не различались и были отнесены к одному классу — чистых паров и почв с редкой растительностью (всходы свеклы, подсолнечника, гречихи, кукурузы).

Далее было проведено совмещение классифицированного космоснимка «Landsat TM» (18.05.2001) с фрагментом снимка AVHRR NOAA, который был сделан 16.05.2001 г., т. е. в тот же момент вегетации зерновых культур (рис. 2, 3).

Анализ совмещенного изображения показал принципиальную возможность детального сопоставления сигнатур по пикселям космоснимка AVHRR NOAA для разных классов растительности, и в первую очередь зерновых культур с распределением площадей их посевов. При таком сопоставлении наблюдаются существенные отличия по спектральным яркостям у различных классов растительности. Чистые пары и посевы с низким проективным покрытием имеют отрицательные значения NDVI. Площади, занятые озимой пшеницей и многолетними травами, характеризуются положительными и более высокими величинами этого индекса и отличаются в среднем на 0.4 ед. по сравнению с парами.

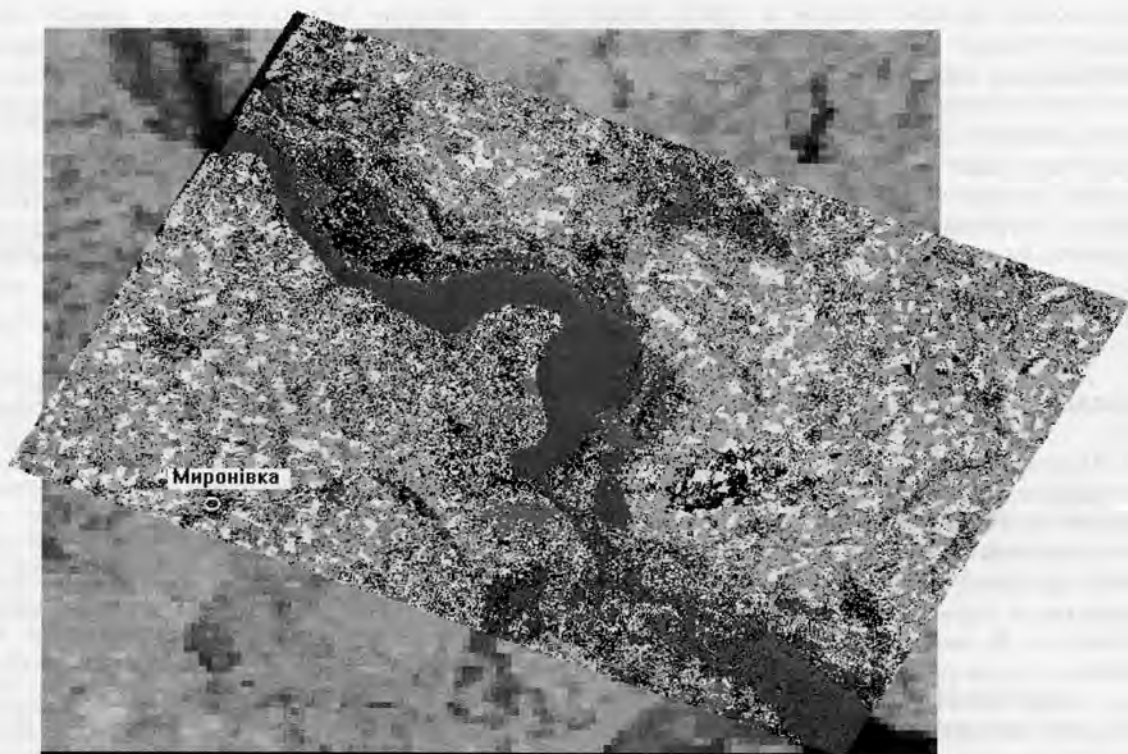


Рис. 2. Совмещение фрагмента классифицированного снимка «Landsat TM» (18.05.2001 г.) (повернут под углом) с фрагментом снимка AVHRR NOAA (16.05.2001 г.) южных районов Киевской области. Светлые участки на изображении «Landsat TM» — площади озимой пшеницы



Рис. 3. Увеличенное совмещенное изображение фрагмента классифицированного снимка «Landsat TM» (18.05.2001 г.) с фрагментом снимка AVHRR NOAA (16.05.2001 г.) района детальных полигонных исследований (Мироновский район Киевской области). Светлые участки — поля озимой пшеницы

Для посевов ярового ячменя и гороха характерны промежуточные значения NDVI. Эти различия спектральных характеристик растительности позволяют оптимистично оценивать возможность обработки снимков AVHRR NOAA с целью решения следующих задач: 1) надежно установить площади, которые заняты посевами озимой пшеницы, 2) построить регрессионные модели, которые должны значительно повысить качество и надежность прогнозирования урожайности зерновых культур на региональном уровне.

## ВЫВОДЫ

1. Использование спутниковых данных, в частности снимков AVHRR NOAA, позволяет получить быстрый и достаточно надежный прогноз урожайности зерновых культур, что необходимо для принятия решений в области экономики сельского хозяйства и планирования продовольственной безопасности. В настоящее время ряд стран ведут работы по усовершенствованию системы оптимального мониторинга вегетации растительности, что позволит одновременно проводить надежную оценку урожайности.

2. Системы прогнозирования урожайности, согласно литературным данным, базируются главным образом на использовании снимков AVHRR NOAA и определении индекса NDVI с последующим его интегрированием для периода вегетации и сопоставления с архивными данными по урожайности и агрометеорологической информацией.

3. Системы оценки урожайности, основанные на суммарных подекадных значениях индекса NDVI, в условиях Киевской области неприменимы из-за малого количества безоблачных дней.

4. Установлена зависимость между усредненным суммарным значением NDVI за основной период вегетации (апрель—июль) и средней урожайностью озимой пшеницы. Показано, что характер этой зависимости разный в районах с урожайностью менее 10 ц/га, 10—20 ц/га и более 20 ц/га. Это связано с отличиями природных условий в этих районах.

5. Анализ полноформатных данных AVHRR NOAA за 2001 г. свидетельствует о возможности применения их как для установления площадей,

которые заняты посевами озимой пшеницы, так и для построения регрессионных моделей, что должно значительно повысить качество и надежность прогноза урожайности зерновых культур на региональном уровне.

Таким образом, в условиях Киевской области и всей Украины для регионального прогноза урожайности озимой пшеницы можно использовать материалы многозональной съемки сканером AVHRR со спутников NOAA, но это требует решения целого ряда вопросов методики.

1. Bochenek Z. Operational use of NOAA data for crop condition assessment in Poland. In Proc. of the 19th EARSeL Symposium on Remote Sensing in the 21 st Century/Valladolid/ Spain/ 31 may — 2 jun 1999: 2000.—P. 387—392.
2. Bullok P. R. Operational estimates of Western Canada grain production using NOAA AVHRR LAC data // Canadian Journal of Remote Sensing.—1992.—18, N 1.—P. 23—25.
3. Illera P., Delgado J. A., Fernandez Unzueta & A, Fernandez Manso A. A. Integration of NOAA-AVHRR and meteorological data in a GIS-Application for vegetation monitoring in Castilla y Leon, Spain. In Proc. of the 19th EARSeL Symposium on Remote Sensing in the 21 st Century/Valladolid/ Spain/ 31 may — 2 jun 1999.— 2000.—P. 47—54.
4. Kumar K. and Monteith G. L. Remote sensing of Crop Growth, In Plants and the Daylight Spectrum, edited by Smith, H. (London: Academic Press), 1981.—P. 133—144.
5. Prince S. D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data // Int. J. of Remote sensing.—1991.—6.—P. 1313—1330.
6. Rasmussen M. S. Assessment of millet yield and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR // Int. J. of Remote sensing.—1992.—18.—P. 3431—3442.
7. Rasmussen M. S. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data reduction of environmental and inter annual variability // Int. J. of Remote sensing.—1997.—18.—P. 1059—1077.
8. Rasmussen M. S. Developing simple, operational, consistent NDVI-vegetation models by applying environmental and climatic information: Part 1. Assessment of net primary production // Int. J. of Remote sensing.—1998.—19.—P. 97—117.
9. Rasmussen M. S. Developing simple, operational, consistent NDVI — vegetation models by applying environmental and climatic information. Part 11: Crop yield assessment // Int. J. of Remote sensing.—1998.—19.—P. 119—139.
10. Ruimy M. S., Saugier B. and Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely-sensed data // J. Geophys. Res.—1994.—D3.—P. 5263—5283.
11. Steven M. D. and Demetriades-Shah T. H. Spectral indices of crop productivity under condition of stress. In Advances in Digital Image Processing, (Nottingham: Int. J. of Remote Sensing Society).—1987.—18.—P. 593—601, 3431—3442.