

УДК 528.88.63

**В. И. Лялько, А. И. Сахацкий, Г. М. Жолобак, А. Я. Ходоровский,
Л. Д. Греков, И. Я. Буянова, В. В. Соколов, М. В. Ющенко**

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

**Опыт комплексирования многозональных
снимков NOAA/AVHRR и «Landsat-7»
для прогноза урожайности озимой пшеницы
(на примере районов Киевской области)**

Надійшла до редакції 08.10.03

Наведено теоретичну основу використання даних NOAA/AVHRR для прогнозування врожайності зернових культур. Дано обґрунтування особливостей розрахунку нормалізованого вегетаційного індексу NDVI зі супутників NOAA і застосування знімків «Landsat-7» для прогнозування врожайності озимої пшениці в межах досліджуваної території (Київська область, Україна). Виявлено, що на даному етапі досліджень лінійна регресійна залежність між сумою NDVI і врожайністю є більш надійною для складання прогнозу.

Для надежного прогноза урожайности озимой пшеницы необходим постоянный мониторинг состояния посевов. Данные спутников NOAA и «Landsat-7» могут составить основу для такого мониторинга. Снимки Landsat, имеющие высокое пространственное разрешение, обеспечивают информацию о расположении полей, занятых пшеницей, и об их состоянии в фиксированный момент времени. Снимки NOAA/AVHRR, обладающие высоким временным разрешением, позволяют проследить за динамикой изменения состояния посевов. Комплексирование этих данных с агрометеорологической информацией повышает надежность и достоверность прогнозов урожайности. Аналогичный подход используется в наиболее развитых странах мира. Методика работ основывается на вычислении значений нормализованного вегетационного индекса NDVI по суммарным декадным снимкам со спутника NOAA/AVHRR за период вегетации. Полученные значения индекса NDVI сопоставляются с имеющимися данными об урожайности пшеницы.

Методом регрессионного анализа устанавливается зависимость между значениями NDVI, а также агрометеорологическими данными и удельной урожайностью, что используется для прогноза.

Однако, как показал наш опыт работ, в пределах Киевского региона из-за значительной постоянной облачности количество снимков, пригодных для вычисления NDVI, ограничено в среднем не более 1-2 снимками в декаду. В связи с этим методика прогнозирования, основанная на использовании суммарных подекадных снимков, оказалась практически непригодной, и нами был разработан свой вариант методики.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Теоретической основой использования данных NOAA/AVHRR для прогнозирования урожайности являются работы, в которых обосновываются зависимости функциональной взаимосвязи природной

продуктивности почв (NPP) и абсорбированной фотосинтетически активной радиации (Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR), которая просуммирована за период вегетации и умножена на некоторый коэффициент E , учитывающий особенности почв и климат данного района.

Так, согласно [6] продуктивность почв определяется выражением

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

где f_{par} — часть фотосинтетически активной радиации (PAR), которая абсорбируется; P — продуктивность почв в кг/га, 0 и t — начало и конец сезона вегетации.

Далее, согласно данным работы [11], где теоретически и экспериментально проанализирована взаимосвязь между NDVI и APAR, f_{par} может быть заменена на NDVI:

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

где a , b — коэффициенты линейной регрессии.

На том основании, что E и PAR являются примерно константами для определенного района, в работе [7] была показана возможность оценки NPP только по данным NDVI. Согласно исследованиям [12] коэффициент E во многом определяется климатическими условиями, 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 [3, 5,

8—10]. Изучение вариаций урожайности и значений нормализованных вегетационных индексов позволило им установить зависимость между урожайностью и суммой накоплений NDVI за период вегетации с коэффициентом корреляции около 0.7.

Аналогичный подход, использующий сумму накоплений NDVI для прогноза урожайности проса в Сенегале, разрабатывается в работах [8—10], где делаются попытки максимально упростить модели прогноза, сохраняя при этом достаточно высокую надежность предсказания. Некоторые дополнительные параметры, кроме суммы накоплений NDVI за определенный период, например процент обрабатываемых земель, могут достаточно надежно определяться по данным дистанционного зондирования. Примером могут служить уравнения прогноза урожайности проса для районов Сенегала, где доля обрабатываемых земель превышает 22.5 %:

$$\begin{aligned} \text{Yield} &= \\ &= 774.1 (\sum \text{NDVI}_{1\text{romansept}-10\text{oct}} - \sum \text{NDVI}_{1\text{may}-31\text{may}}) - 1195, \\ &\quad (r^2 = 0.729). \end{aligned} \quad (3)$$

В случае, если доля обрабатываемых земель составляет менее 22.5 %, имеется менее надежное уравнение

$$\begin{aligned} \text{Yield} &= \\ &= 3793.7 (\sum \text{NDVI}_{1\text{sept}-10\text{oct}} - \sum \text{NDVI}_{1\text{may}-31\text{may}}) - 254, \\ &\quad (r^2 = 0.663). \end{aligned} \quad (4)$$

Неоспоримым преимуществом таких моделей является то, что нет необходимости использовать объемные массивы наземных агрометеорологиче-

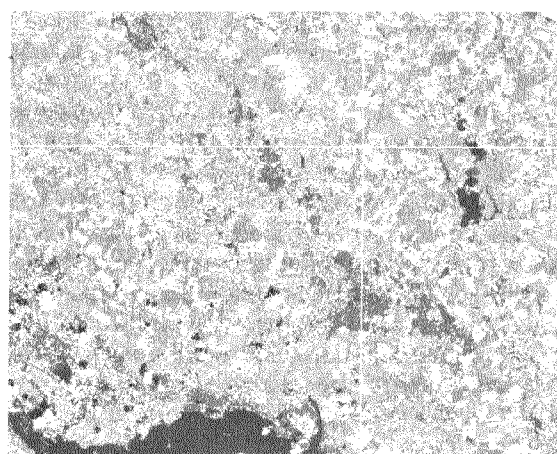
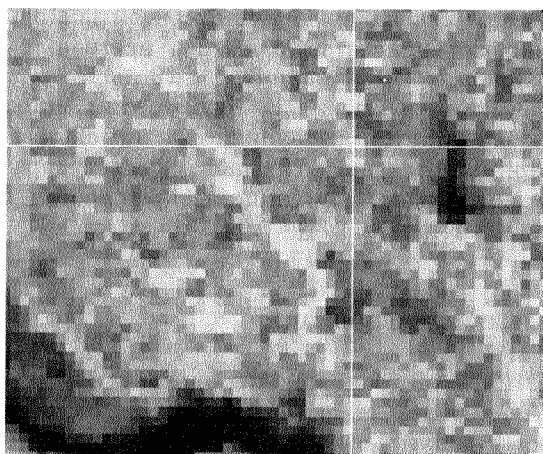


Рис. 1. Фрагмент снимка NOAA-16 (13.05.02) (а), совмещенного с классифицированным снимком «Landsat-7» (21.05.2002) (б), для определения спектральных характеристик посевов озимой пшеницы (Барышевский район)

ских данных. Во многих случаях такие данные либо трудно собрать, либо их вовсе нет.

Как видно из приведенных уравнений, при дистанционном мониторинге важным является установление сроков наблюдения за посевами.

В основу наших работ положены материалы съемок NOAA/AVHRR за апрель—июль 2001 и 2002 гг. и снимки «Landsat-7» (18.05.01 г., 21.05.02 г.) Киевского региона, а также сведения об урожайности озимой пшеницы в пределах конкретных хозяйств. Для определения пространственного расположения полей озимой пшеницы была проведена классификация с обучением снимков «Landsat-7» с помощью программного продукта ERDAS Imagine 8.4 с использованием заверочных наблюдений на тестовых участках. Анализ снимков NOAA/AVHRR, привязанных к классифицированному снимку «Landsat-7» и к векторизованной схеме землепользования, дал возможность установить динамику изменений спектральных характеристик пшеницы на конкретных полях на протяжении вегетационного цикла (рис. 1).

Для прогнозирования урожайности озимой пшеницы нами были использованы значения NDVI, рассчитанные для периода от весеннего возобновления вегетации до фазы колошения. Первый показатель NDVI получен со снимков NOAA-16/AVHRR (01.04.01, 02.04.02) и соответствует заключительному периоду возобновления вегетации озимой пшеницы. Он характеризует состояние растений, которые уже отросли и окрепли после перезимовки.

Второе значение NDVI получено со снимков NOAA-16/AVHRR (08.05.01, 04.05.02), которые сделаны во время выхода озимой пшеницы в трубку после появления над поверхностью почвы нижнего узла соломины. Пройденное с первоначального периода время соответствует активному росту злаков за счет повышения темпов поглощения основных элементов питания под воздействием генетических и гормональных факторов. Увеличение размеров листовых пластинок обуславливает формирование 40 % проективного покрытия. Происходит активный синтез фотосинтетических пигментов, что обеспечивает довольно высокую спектральную яркость посевов озимой пшеницы на снимках «Landsat-TM», сделанных в середине мая. В данное время немало ярче на этих снимках только поля с многолетними бобовыми травами. До фазы выхода в трубку в растениях озимой пшеницы происходят важные для будущего урожая процессы — формируются колосковые бугорки, что соответствует III и IV этапам морфогенеза [2]. Количество колосковых бугорков непосредственно зависит от уровня сформированности вегетативных органов и их метаболитической активности.

Параметрами, которые характеризуют этот уровень в данный период, являются размер листовых пластинок и содержание в них хлорофилла, которые одновременно прямо пропорционально связаны с величиной NDVI. Поэтому уже на этом этапе при помощи дистанционных методов можно различить посевы с разным потенциалом урожайности.

Третье значение NDVI рассчитано со снимков NOAA-16/AVHRR (16.05.01, 13.05.02), сделанного в начале колошения озимой пшеницы. В межфазный период выхода в трубку — колошения в растения наиболее интенсивно поступают азот и фосфор, достигают своего максимального размера вегетативные органы, а в колосках формируются цветы. В это время посевы озимой пшеницы имеют наибольшую фитомассу и наибольшую листовую поверхность, которая обеспечивает проективное покрытие до 80 % [1]. Показатели NDVI посевов озимой пшеницы, которая находится в фазе колошения, также достигают своего наивысшего значения.

После колошения и цветения начинается активное пожелтение нижних листьев и стеблей растений. Это обусловлено оттоком из них ассимилятов и продуктов гидролиза сложных полимеров в колос, где появились зерновки - новые мощные аттрагирующие центры, вызывающие усиление передвижения питательных веществ. Поэтому во время налива зерна значения NDVI посевов озимой пшеницы уменьшаются. Но в забурьяненных посевах бурьяны выделяются зеленым цветом среди желтеющих растений озимой пшеницы. Из-за этого спад NDVI над ними будет менее резким. Таким образом, для того, чтобы избежать неоднозначной трактовки во время расчета регрессионных зависимостей прогнозированной урожайности, нами было использовано суммарное значение NDVI, полученное за период активного роста растений озимой пшеницы от возобновления весенней вегетации до начала колошения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами были определены значения NDVI посевов озимой пшеницы по космическим снимкам NOAA-16/AVHRR в границах Мироновского, Барышевского и Яготинского районов Киевской области в пределах сроков, обоснованных в разделе «Методика исследований». Полученные индексы были сопоставлены с урожайностью озимой пшеницы в конкретных хозяйствах этих районов, где площади посевов этой культуры составляют не менее 500 га. При этом рассматривались различные виды регрессионных зависимостей для поиска среди них наибо-

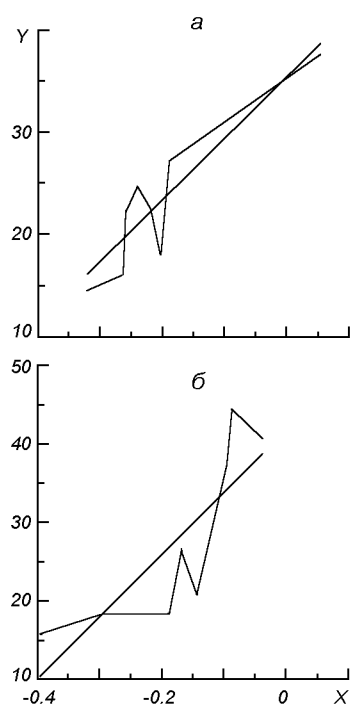


Рис. 2. Линейная корреляционная зависимость между урожайностью Y (ц/га) озимой пшеницы для хозяйств Барышевского района и значением $X = \sum \text{NDVI}$: *а* — по космоснимкам NOAA-16/AVHRR 01.04.01 г., 08.05.01 г., 16.05.01 г. ($Y = 59.8732X + 35.1644$, $r^2 = 0.828$); *б* — по космоснимкам NOAA-16/AVHRR 02.04.02 г., 04.05.02 г., 13.05.02 г. ($Y = 79.3002X + 41.6236$, $r^2 = 0.670$)

лее прогностически надежных. Проведенный нами анализ показал наличие тесной корреляционной связи между заверочными данными по урожайности озимой пшеницы и суммарными значениями NDVI, которые рассчитывались по данным космической съемки со спутников NOAA. Показано, что наибольшей надежностью для прогнозирования урожайности в пределах полигона исследований является зависимость, которая учитывает значения NDVI, полученные в течение следующих трех декад: 1) первая декада апреля — период восстановления вегетации озимой пшеницы; 2) вторая декада мая — фаза выхода в трубку; 3) третья декада мая — переходной период от выхода в трубку к фазе колошения. Полученные данные относительно первого срока расчета NDVI в целом согласуются с результатами и других исследователей [4]. Линейная регрессионная зависимость на данном этапе исследований оказалась более предпочтительной для прогнозирования урожайности, но это требует проверки на большем количестве данных (рис. 2).

В настоящее время нами проводятся аналогичные работы и в других районах Киевской области.

Кроме того, накопление агрометеорологической информации относительно вариаций осадков и температур позволит построить более сложные зависимости, которые будут учитывать агрометеорологические данные. Но необходимо отметить, что в этом случае прогнозирование будет зависеть от определенного набора сопутствующей информации помимо данных дистанционного зондирования, что в некоторых случаях может существенно препятствовать оперативности прогнозирования. Поэтому, не отклоняя в будущем возможность использования дополнительных агрометеорологических данных, необходимо значительное внимание уделить прогнозированию урожайности на основе только дистанционной информации.

ВЫВОДЫ

Нами установлено, что для прогнозирования урожайности озимой пшеницы в пределах полигона исследований достаточно надежной является зависимость, которая учитывает сумму значений NDVI, выведенных из космоснимков NOAA за период активного роста растений озимой пшеницы от возобновления весенней вегетации до начала колошения.

На данном этапе исследований линейная регрессионная зависимость была более предпочтительной для прогнозирования урожайности. Полученные данные свидетельствуют о принципиальной возможности прогноза урожайности озимой пшеницы, как с учетом агрометеорологических данных, так и только на основании дистанционной информации. Реализация такого подхода сможет обеспечить независимый прогноз урожайности озимой пшеницы для принятия соответствующих решений на государственном уровне.

1. Васюхина Т. М., Винниченко Н. К. Определение видов и состояния сельскохозяйственных культур по материалам многозональной аэрофотосъемки // Некоторые результаты исследования природных ресурсов с помощью самолетных и полигонных средств. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1980.—С. 64—72.
2. Куперман Ф. М. Морфофизиология растений. Морфофизиологический анализ этапов органогенеза различных жизненных форм покрытосеменных растений. — М.: Высшая школа, 1984.—240 с.
3. Bullok P. R. Operational estimates of Western Canada grain production using NOAA AVHRR LAC data // Can. J. Remote Sensing.—1992.—18, N 1.—P. 23—28.
4. Dabrowska-Zielinska K., Kogan F., Ciolkosz A., et al. Modelling of crop growth conditions and crop yield in Poland using AVHRR-based indices // Int. J. Remote Sensing.—2002.—23, N 6.—P. 1109—1123.

5. 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 // Proc. of the 19th EARSeL Symposium on Remote Sensing in the 21st Century/Valladolid/ Spain / 31 May—2 June, 1999. — Rotterdam: Millpress, 2000.—P. 47—54.
6. Kumar K., Monteith G. L. Remote sensing of crop growth // plants and the daylight spectrum / Ed. by H. Smith. — London: Acad. Press, 1981.—P. 133—144.
7. Prince S. D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data // Int. J. Remote Sensing.—1991.—6, N 7.—P. 1313—1330.
8. Rasmussen M. S. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data reduction of environmental and inter annual variability // Int. J. Remote Sensing.—1997.—18, N 5.—P. 1059—1077.
9. 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. Remote Sensing.—1998.—19, N 1.—P. 97—117.
10. Rasmussen M. S. Developing simple, operational, consistent NDVI — vegetation models by applying environmental and climatic information. Part 11: Crop yield assessment // Int. J. Remote Sensing.—1998.—19, N 1.—P. 119—139.
11. Ruimy M. S., Saugier B., Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely-sensed data // J. Geophys. Res.—1994.—D3.—P. 5263—5283.
12. Steven M. D., Demetriades-Shah T. H. Spectral indices of crop productivity under condition of stress // Advances in Digital Image Processing: Int. J. of Remote Sensing Soc.—1987.—18.—P. 593—601, 3431—3442.

AN EXPERIENCE ON COMPLEX USING OF MULTIBAND NOAA/AVHRR AND LANDSAT-7 IMAGES FOR A WINTER WHEAT YIELD FORECAST (FOR THE CASE OF THE KYIV REGION)

V. I. Lyalko, A. I. Sakhatskii, G. M. Zholobak,
A. Ya. Khodorovskii, L. D. Grekov, I. Ya. Buianova,
V. V. Sokolov, M. V. Yuschenko

A theoretical basis of the use of NOAA/AVHRR data for a cereal crop forecast is presented. The substantiation of some features of calculation of AVHRR-based normalised difference vegetation index (NDVI) and the use of Landsat-7 images for a winter wheat yield forecast within the limits of the Kyiv region (Ukraine) is given. It is found that a linear regression relationship between the sum of NDVI and productivity is more preferable for performing a forecast at the given stage of studies.