

В.С. Антоненко, Р.В. Гаценко

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ И ПРОГНОЗ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В УКРАИНЕ ПО ДАННЫМ МНОГОСПЕКТРАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Представлены методы и результаты оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур, их надземной растительной массы, прогноза урожайности по отдельному полю на примере озимой пшеницы по данным многоспектральной съемки высокого разрешения с природоресурсных космических аппаратов; оценена возможность прогноза средней районной урожайности по данным съемки с метеорологического спутника NOAA (сканер HRPT).

Введение

В последнее время одним из важных источников получения гидрометеорологической информации являются данные спутниковой съемки, которые характеризуются надежностью, оперативностью их получения и масштабностью (мгновенный обзор как отдельных объектов земной поверхности на снимках высокого пространственного разрешения, так и обширных регионов на снимках низкого разрешения). Широкое применение получили данные спектрометрических измерений земной поверхности с метеорологических и природоресурсных искусственных спутников Земли LANDSAT (США), SPOT (Франция), РЕСУРС (Россия), IRS (Индия), NOAA (США). Многолетний опыт научного анализа спутниковой информации свидетельствует о принципиальной возможности использования данных многоспектральной спутниковой съемки для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур: определения структуры посевных площадей, параметров растительного покрова, состояния полевых культур и других информативных признаков. В то же время погрешности определения указанных характеристик по отдельным культурам, их устойчивость во времени в материалах различных исследователей существенно различаются. Это, на наш взгляд, является одной из веских причин медленного производственного

внедрения методов космического мониторинга посевов сельскохозяйственных культур.

Природоресурсные спутники типа „РЕСУРС“ могут производить съемку заданного массива полей с частотой не более 2-3 раза в месяц с высокой разрешающей способностью на местности (для сканера МСУ-Э это менее 45 м, для сканера МСУ СК - 175 м). При этом одним снимком можно охватить территорию, соответствующую по площади административному району (МСУ-Э) или значительной части административной области (МСУ-СК). На таком снимке хорошо различимы сельскохозяйственные угодья, что позволяет идентифицировать посевы с достаточной точностью и оценивать их состояние на конкретном поле.

В то же время с помощью метеорологических спутников NOAA, имеющих на своем борту радиометр AVHRR, можно получать многоспектральные снимки земной поверхности до 10-12 раз в сутки с пространственным разрешением 1,1×1,1 км. При этом приведенная к масштабу съемки площадь пиксела на многоспектральном изображении соответствует участку около 120 га, что соизмеримо со средними размерами сельскохозяйственного поля в степной зоне Украины. В лесостепной зоне он составляет 86 га [8]. Почти во всех случаях яркостные характеристики пиксела на изображении сканера при съемках лесостепной зоны могут принадлежать к различным классам объектов на местности, что обуславливает вероятность распознавания видов посевов на снимке и определения посевных площадей под исследуемой культурой с удовлетворительной точностью.

Одним из важных методических вопросов дистанционного зондирования является точность идентификации обследуемых посевов на спутниковом изображении и сходимости результатов восстановления спектральных отражательных характеристик объектов съемки с данными подспутниковых измерений. Его решение позволит оценить возможности использования разработанных ранее методик аэрофотометрических обследований состояния посевов основных сельскохозяйственных культур в Украине [1-6] для определения оценки их состояния и прогноза урожайности по данным многоспектральной спутниковой съемки.

В данной работе предпринята попытка оценить точность определения оценки состояния и количества растительной надземной массы посевов на примере озимой пшеницы по спектрометрическим

измерениям с космического аппарата (КА) высокого разрешения РЕСУРС, а также точность определения значений средней областной урожайности этой культуры по спутниковым данным с метеорологического КА NOAA (HRPT).

Методика экспериментальных исследований и материалы наблюдений

Для оценки возможности использования данных многоспектральной спутниковой съемки с целью создания действенной системы космического мониторинга посевов сельскохозяйственных культур было организовано и проведено три комплексных эксперимента в лесостепной (Киевская область) и степной (Днепропетровская область) зонах Украины с привлечением спутниковой, наземной и самолетной информации. Суть эксперимента состояла в проведении сопряженных во времени и пространстве спектрометрических измерений отдельных характеристик сельскохозяйственных посевов однотипной аппаратурой с космического аппарата, авиационного носителя (высота съемки 100 м) и в наземных маршрутных обследованиях. Полученные экспериментальные данные использованы при построении градуировочной характеристики спектрофотометра (ГХС) для наземного и самолетного спектрофотометров. Контрольные поля на местности подбирались таким образом, чтобы выборка (20 - 25 полей в широком диапазоне изменения надземной растительной массы) была репрезентативной для определения средней районной урожайности. По завершению каждого спектрофотометрического обследования производилось определение параметров растительного покрова на контрольных полях и данных комплекса метеорологических и агрометеорологических наблюдений. После уборки зерновых была зафиксирована урожайность посевов озимой пшеницы и ярового ячменя по каждому полю в районах съемки.

Первый эксперимент проведен 1 мая 1992 г. на территории Богуславского и Мироновского районов Киевской области. Получен снимок размером 1600×1200 элементов, выполненный аппаратурой МСУ–Э в трех спектральных каналах (0,5-0,6; 0,6-0,7 и 0,8-0,9 мкм) на российском спутнике "РЕСУРС-01". Предварительная обработка этой информации проведена в НПО "Планета". Разрешение на местности полученного изображения составляет 45×30м. Автомаршрутные и

самолетные обследования контрольных посевов с целью их идентификации выполнены 5 мая 1992 г.

Второй эксперимент проведен 10 мая 1992 г. на территории Софиевского района Днепропетровской области. Был получен снимок размером 1600×1200 элементов в трех спектральных каналах, как и в предыдущем случае, с российского спутника "РЕСУРС-01". Все процедуры предварительной обработки проведены в НПО "Планета".

Дополнительные самолетные и наземные спекрофотометрические наблюдения контрольных посевов озимой пшеницы (всего 25 полей) проводились 16 мая и 10 июня 1992 г.

Третий эксперимент проходил 2 июня 1995 г. на территории Барышевского района Киевской области. Съёмка данной территории проведена французским спутником "SPOT". Размер полученного снимка составил 1490×1333 элемента. Съёмка выполнена в трех спектральных каналах 0,51-0,59; 0,61-0,68 и 0,79-0,89 мкм аппаратурой HRV, установленной на данном спутнике. Разрешение по местности составило 20м×20м. Предварительная обработка материалов произведена фирмой "SPOTIMAG".

5-6 июня под этот эксперимент проведены автомаршрутные обследования контрольных полей с целью идентификации посевов в районе съёмки, определения надземной растительной массы посева и визуальной оценки состояния посева.

Спектрометрические данные со спутника NOAA по территории Киевской области получены станцией приема УкрНИГМИ за весенне-летний период 1996 и 1999 годов.

На исследуемой территории за эти же периоды получены агрометеорологические данные об общей зеленой и сухой массе озимой пшеницы, датах наступления основных фаз развития, высоте растений, оценке состояния посевов, их густоте, урожайности, а также данные о влагозапасах почвы, суммах эффективных температур на протяжении весенне-летней вегетации озимой пшеницы. Средняя по Киевской области урожайность в 1996 г. составила 34,8 ц/га; в исследуемых районах урожайность варьировала от 18,7 ц/га в Бородянском районе до 41,8 ц/га в Белоцерковском. В 1999 году средняя урожайность озимой пшеницы составляла 26,1 ц/га; по административным районам колебалась от 12,6 (Вышгородский) до 35,7 ц/га (Рокитненский).

Методика первичной обработки экспериментальных данных

Первичные многоспектральные изображения с КА в цифровом виде получены на магнитных носителях и впоследствии подверглись процедуре первичной обработки изображений. Комплекс первичной и тематической обработки спутниковых изображений производился по схеме, представленной в табл. 1.

Первичная обработка спутниковых данных включала калибровку и атмосферную коррекцию исходного изображения. Процесс калибровки заключался в пересчете пиксельных значений или уровней яркости N в значения спектральной яркости L_λ по следующей формуле:

$$L_\lambda = (N - N_0) / F, \quad (1)$$

где N_0 – значение “теневого сигнала”; F – спектральная чувствительность прибора, характерная для данного радиометра.

Значение отражательных характеристик R рассчитаны по формуле:

$$R = (\pi \cdot L_\lambda) / (S_\lambda \cdot \cos \vartheta), \quad (2)$$

где S_λ - внеатмосферный солнечный поток; ϑ - высота Солнца.

Атмосферная коррекция спутниковых данных проводилась по разработанной А.Кривобоком модели [9, 11], которая учитывает поглощение водяным паром и озоном, а также рассеивание на молекулах воздуха и аэрозоля солнечного излучения. Входными параметрами модели являются тип радиометра, геометрия съемки и данные стандартных метеорологических наблюдений. Модель определяет отражательные характеристики подстилающей поверхности на высоте полета спутника по следующей формуле:

$$\rho_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \left[(R - R_a) \frac{(1 - \bar{\rho} A_{SA})}{T_a(\mu_o) \exp(-\tau / \mu)} - \bar{\rho} \frac{T_a(\mu_o) t_a}{1 - \bar{\rho} A_{SA}} \right] \quad (3)$$

где $\bar{\rho}$ – среднее значение отражательных характеристик над территорией съемки; $F(\lambda)$ – функция спектрального отклика радиометра; R_a , R – соответственно не откалиброванные и откалиброванные отражательные характеристики атмосферы; A_{SA} – спектральное альbedo атмосферы; T_a – коэффициент пропускания атмосферы; μ_o , μ – косинус зенитного угла и

Таблица 1

Блок-схема обработки многоспектрального космического снимка для оценки состояния посевов
сельскохозяйственных культур

№ п/п	Исполняющая функция	Основная необходимая информация	Ожидаемый результат на выходе
1	2	3	4
1	Съемка и регистрация на магнитном носителе характеристик отражательной и излучательной способности подстилающей поверхности в <i>n</i> -ом числе спектральных диапазонов		Цифровое изображение
2	Радиационная, радиометрическая и геометрическая коррекция	Характеристика съемочной аппаратуры, передаточная функция атмосферы	Откорректированное изображение
3	Географическая привязка	Орбитальные данные, время съемки	Координаты пунктов изображения
4	Выделение границ квазиоднородных (по яркости) объектов	Критерии однородности	Маска границ
5	Формирование схемы полей	Геометрические характеристики полей	Предварительная схема полей
6	Расчет координат полей	Координаты углов изображения полей	Таблица координат полей
7	Согласование со схемой сельскохозяйственных посевов по материалам предыдущих съемок	Схема сельскохозяйственных посевов (полей) и материалы предыдущей съемки	Уточненная схема полей
8	Расчет яркости исследуемых объектов наблюдений	Схема и спектральные изображения	Таблица спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур

1	2	3	4
9	Расчеты спектральных признаков	Таблица тестовых объектов	Таблицы спектральных характеристик
10	Расчеты регрессионных связей (параметр = f , яркости)	Таблица тестовых объектов	Таблица коэффициентов функциональных связей
11	Группировка объектов по близости яркости	Таблица спектральных яркостей	Таблица спектральных признаков посевов сельскохозяйственных культур
12	Распознавание вида сельскохозяйственных культур по рассчитанным спектральным признакам	Таблица спектральных яркостей	Описание групп
13	Согласование результатов распознавания	Материалы распознавания	Окончательная схема растительных объектов
14	Оценка параметров посевов сельскохозяйственных культур по теоретическим и эмпирическим зависимостям	Коэффициенты функциональных зависимостей и таблица яркостей для каждого вида посевов сельскохозяйственных культур	Количественные характеристики параметров каждого растительного объекта наблюдений
15	Согласование параметров для каждого объекта наблюдений	Коэффициенты функциональных зависимостей и таблица яркостей для каждого типа растительности	Согласованные количественные характеристики параметров
16	Определение расхождений рассчитанных параметров посевов сельскохозяйственных культур с теоретическими (среднепогодными)	Среднепогодные количественные характеристики параметров посевов сельскохозяйственных культур	Таблица расхождений
17	Анализ параметров посевов сельскохозяйственных культур	Характеристики параметров поврежденных, больных и т. п. посевов	Выводы о состоянии посевов сельскохозяйственных культур

угла наблюдений; τ – оптическая толщина атмосферы; λ_1, λ_2 – длины волн спектральной полосы.

Эффективность атмосферной коррекции исследована по материалам спутниковой съемки и синхронным авиационным измерениям однотипной аппаратурой с высоты 100 м (КА «Ресурс», сканер МСУ-Э, 10 мая 1992 г. Днепропетровская обл., Софиевский р-н) [12]. В результате применения процедуры атмосферной коррекции средняя по абсолютной величине относительная погрешность δ определения СКЭЯ в красном диапазоне спектра уменьшилась более чем вдвое – с 31,8 до 14,6%, в инфракрасном диапазоне – почти на четверть – с 21,2 до 16,0%.

В соответствии с приведенной в табл. 1 схемой обработки получено классифицированное изображение, на котором идентифицированы поля с посевами озимой пшеницы с соответствующими спектральными характеристиками в красном и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Последующая процедура обработки изображения заключалась в определении надземной растительной массы посева по градуировочным характеристикам спектрофотометра, построенным в полевых условиях в достаточно синхронные со съемкой сроки.

В качестве характеристик спектральной отражательной способности исследуемых объектов использовались нормированные на отношение СКЭЯ эталона значения отношения СКЭЯ системы “почва – растительность” K_{np} и почвы K_n :

$$K_{np} = (\rho_{\lambda_{ик}} / \rho_{\lambda_k})_{np} \cdot (\rho_{\lambda_{ик}} / \rho_{\lambda_k})_{э\tau}^{-1}; \quad (4)$$

$$K_n = (\rho_{\lambda_{ик}} / \rho_{\lambda_k})_n \cdot (\rho_{\lambda_{ик}} \cdot \rho_{\lambda_k})_{э\tau}^{-1}, \quad (5)$$

где $(\rho_{\lambda_{ик}} / \rho_{\lambda_k})_{np}$, $(\rho_{\lambda_{ик}} / \rho_{\lambda_k})_n$, $(\rho_{\lambda_{ик}} / \rho_{\lambda_k})_{э\tau}$ – соответственно отношения СКЭЯ системы “почва-растительность” (np), почвы (n) и эталона ($э\tau$) в ближней инфракрасной ($ик$) и красной ($к$) областях спектра.

Нормирование отношения СКЭЯ исследуемых объектов на отношение СКЭЯ эталона позволяет в первом приближении привести результаты наблюдений к однородным условиям освещенности.

Отношение СКЭЯ системы “почва – растительность” K_{np} в многочисленных исследованиях определяется как относительный вегетационный индекс RVI (ratio vegetation index). В практике

спектрометрических исследований также широко используется нормализованный индекс отношения NDVI, $(NDVI = (\rho_{лик} - \rho_{лк}) / (\rho_{лик} + \rho_{лк}))$. В соответствии с многочисленными исследованиями информативности указанных индексов с помощью RVI достаточно надежно идентифицируется растительность в начальные периоды вегетационного роста. В то же время этот индекс в значительной мере подвержен влиянию атмосферы. Нормализованный вегетационный индекс отношения NDVI чувствителен к растительному покрову при покрытии почвы растительностью более 15 % и менее зависим от состояния атмосферы.

Результаты оценки состояния посевов и прогноз урожайности по снимкам высокого разрешения

Результаты сравнительного анализа определения оценки состояния посевов озимой пшеницы по многоспектральным спутниковым изображениям различными методами классификации объектов представлены в табл. 2. Приведены материалы оценок по количественным значениям спектральных характеристик посева (пороговый метод) и по данным текстурного анализа каждого поля в соответствии с описанной методикой [10]. Фактическое состояние посевов оценивалось аэровизуальным методом [7, 14].

Таблица 2

Сравнение погрешности оценки состояния посевов озимой пшеницы различными методами классификации объектов по спутниковым изображениям высокой разрешающей способности на местности в 1992г., Киевская обл., КА “Ресурс-01”, сканер МСУ-Э (45м)

Территория космической съемки	Качественная оценка состояния	Часть полей (%) по данным			Относительная погрешность (%) оценки состояния посевов по материалам спутниковых изображений	
		аэровизуальных наблюдений	обработки спутниковых изображений с использованием материалов		надземной массы	текстурного анализа
			надземной массы	текстурного анализа		
Мироновский район	Отличное	19	15	17	21,0	10,5
	Хорошее	41	35	38	14,6	7,4
	Удовлетворительное	40	50	45	25,0	12,5
Богуславский район	Отличное	15	11	14	26,7	6,7
	Хорошее	31	30	35	13,3	12,9
	Удовлетворительное	54	59	51	12,0	5,6

Анализ данных табл. 2 свидетельствует о высокой сходимости визуальных оценок состояния с данными методики текстурного анализа изображения отдельного поля. Следует отметить более низкие погрешности оценок состояния в Богуславском районе, чем в Софиевском или Мироновском, что подтверждается значениями коэффициентов вариации C_V спектральных коэффициентов энергетической яркости K_{np} по отдельному полю.

Оценка возможности использования многоспектральной спутниковой съемки высокого пространственного разрешения для прогноза урожайности по площади различной генерализации (отдельное поле – хозяйство – административный район) производилась по данным комплексного эксперимента в Софиевском р-не Днепропетровской обл. (эксперимент № 2). На рис.1 представлены графики связи K_{np} с надземной растительной массой по данным авиационных съемок (рис.1а) и многоспектральной спутниковой съемки (рис. 1б).

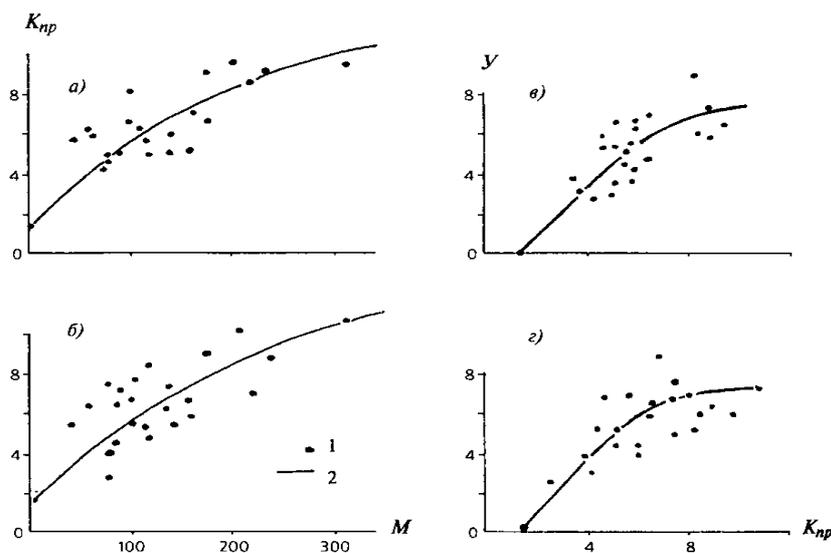


Рис. 1. Связь отношений СКЭЯ K_{np} посевов озимой пшеницы с надземной растительной массой посева M , ц/га (а, б), связь урожайности зерна Y_{ϕ} , ц/га с K_{np} посевов (в, г) по данным самолетных спектрометрических обследований (а, в) и многоспектральной спутниковой съемки (б, г) с КА «РЕСУРС», сканер МСУ – Э.

10-14 мая 1992 г., Днепропетровская обл., Софиевский р-н, контрольные поля озимой пшеницы; 1- экспериментальные данные, 2 – сглаженная кривая

Как видно из графиков, связь эта достаточно тесная ($\eta = 0,79$) и аналитически может быть описана уравнением, используемым для аппроксимации градуировочных характеристик спектрофотометра [1, 3]:

$$K_{np} = \frac{\alpha_i K_{p,i} \mathcal{E}_i}{K_{p,i} + \alpha_i \mathcal{E}_i} + K_n; \quad \mathcal{E}_i \in M, M', N, L, LH \quad (6)$$

где α_i – параметр уравнения, характеризующий угол наклона градуировочной кривой в точке $K_{np} = K_n$; K_p – расчетное значение отношения СКЭЯ предельно плотного растительного покрова, полностью экранирующего почву (так называемое плато насыщения градуировочной кривой); K_n – значение отношения СКЭЯ почвы в посеве.

Основным преимуществом данного уравнения по сравнению с предложенной в [13] экспоненциальной формулой является простота определения параметров этого уравнения.

Соответственно для расчета растительной массы по спутниковым данным высокого пространственного разрешения предлагается использовать уравнение, полученное ранее В.Антоненко [2, 4]:

$$M = k \frac{K_p^* (K_{np}^* - K_n)}{\alpha^* [K_p^* - (K_{np}^* - K_n^*)]}, \quad (7)$$

где k – коэффициент перехода от ц/га к кг/м^2 или т/га .

Зная на момент обследования состояния посева сумму накопленных от возобновления вегетации эффективных температур воздуха выше 5°C $\sum T_{5, \vartheta}$, с помощью полученных зависимостей можно определить значения α^* и $K_{p,i}^*$ на j -й день вегетации. Названный показатель суммы эффективных температур используется в качестве биологического времени. По измеренным значениям отношения СКЭЯ посева K_{np}^* (предварительно приведенным к высоте солнца $h_\odot = 30^\circ$) и почвы K_n рассчитывается надземная растительная масса M на единице площади на этот день. Для представленной на рис. 1,б зависимости параметры модели α и K_{np}^* равны соответственно 0,024 га/ц и 20,6.

Проверка модели (7) на независимом материале показала, что средняя погрешность между фактическими и рассчитанными по спутниковым данным значениями растительной массы составляла 19 ц/га,

средняя относительная погрешность по абсолютной величине – 18%. Значения фитомассы при этом колебались от 45 до 317 ц/га.

Для расчета урожайности зерна озимой пшеницы с конкретного поля по надземной растительной массе, определение которой производилось по спутниковым данным высокого пространственного разрешения (Днепропетровская обл., фаза появления нижнего узла соломины), предлагается использовать эмпирическую модель вида:

$$Y = 82,7 \frac{M_j}{M_{opt}} e^{\left[-0,80 \left(\frac{M_j}{M_{opt}} - 0,40 \right) \right]^2}, \quad (8)$$

где M_j и M_{opt} – фитомасса посева, рассчитанная по спутниковым данным и оптимальная для данного периода вегетации масса [6] соответственно.

По данным о растительной массе за 10 мая рассчитанное значение средней урожайности в Софиевском районе составляло 32 ц/га, фактическое – 28 ц/га. Средняя относительная погрешность расчета урожайности, равная 14,3%, подтверждает возможность прогноза (расчета) средней по отдельному хозяйству (средней районной) урожайности озимой пшеницы по данным многоспектральной съемки высокого пространственного разрешения. Такой прогноз может быть получен как непосредственно через рассчитанные значения K_{np} , так и опосредованно через определение надземной растительной массы посева по измеренному значению K_{np} . Возможность расчета урожайности зерна озимой пшеницы на конкретном поле непосредственно по измеренным со спутника спектральным отражательным характеристикам посева подтверждается графиками связи урожайности на поле Y с K_{np} по данным многоспектральной спутниковой съемки высокого пространственного разрешения (рис.1,2). Приведенные связи достаточно тесные, и в первом приближении могут быть аппроксимированы уравнением, аналогичным виду (6). Средняя относительная погрешность расчета урожайности зерна на отдельном поле по спутниковым определениям K_{np} в данном эксперименте составила 21,8%.

Прогноз урожайности по данным съемки с метеорологического КА NOAA

Для расчета средней урожайности U_p озимой пшеницы в районе по данным спутниковой съемки пространственного разрешения 1,1 км с КА NOAA (HRPT) в различные периоды весенне-летней вегетации по изложенной в [6] схеме, использованы осредненные значения NDVI (табл. 3) по массиву полей.

Таблица 3

Средние значения вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы в различные периоды весенне-летней вегетации по данным съемки с метеорологического спутника NOAA (AVHRR) 1999 г. в административных районах Киевской области

Административный район	Значения вегетационного индекса NDVI на дату, ($\Sigma T_{эф} > 5^{\circ}\text{C}$)			
	3 мая (215-231°)	22 мая (317-348°)	29 мая (403-439°)	5 июля (1021-1067°)
Вышгородский	0,0397	0,072	-	-
Бородянский	-	0,115	0,102	0,255
Макаровский	0,045	0,102	0,086	0,333
Бориспольский	0,046	-	-	0,3025
Броварской	0,0413	-	-	-
Васильковский	0,0507	0,186	0,087	0,331
Фастовский	0,0355	0,108	0,084	0,453
Обуховский	0,049	0,153	-	0,358
Белоцерковский	0,0517	0,18	0,131	0,329
Кагарлыкский	0,0496	-	-	0,188
Богуславский	0,0401	0,182	-	0,136
Рокитненский	-	0,162	0,13	0,185
Мироновский	-	-	-	0,138
Таращанский	-	0,179	0,159	0,227
Ставищенский	-	0,149	0,118	0,215
Володарский	-	0,175	0,119	0,255
Тетиевский	-	0,175	0,153	0,214
Сквирский	-	0,139	0,144	0,295

Первоначально для оценки фитомассы посевов озимой пшеницы значения K_{np} и NDVI, рассчитанные по материалам многоспектральной спутниковой съемки, были включены как независимые переменные в модель множественной регрессии. Однако это не привело к значительному

увеличению коэффициента корреляция ($r = 0,79$ для линейной модели и $R = 0,81$ для множественной регрессии). Это объясняется тем, что между параметрами модели K_{np} и NDVI существует достаточно тесная корреляция.

Для указанных периодов были исследованы графики связи NDVI с фактической урожайностью Y_{ϕ} по всем районам Киевской области. Анализ полученных зависимостей (табл. 4) свидетельствует о ее линейности (коэффициент корреляции $r = 0,46-0,79$ в зависимости от периода вегетации (NDVI с Y_{ϕ})).

Таблица 4

Средняя районная урожайность зерна Y_p озимой пшеницы в Киевской области в различные периоды весенне-летней вегетации, рассчитанная по данным съемки с метеорологического спутника NOAA (AVHRR) (1999 г.) и ее относительные погрешности $|\delta|$

Административный район	Дата космической съемки, ($\Sigma T_{\phi} > 5^{\circ}\text{C}$)								Y_{ϕ} , ц/га
	3 мая (215 - 231°)		22 мая (317 - 348°)		29 мая (403 - 439°)		5 июля (1021-1067°)		
	Y_p , ц/га	$ \delta $, %	Y_p , ц/га	$ \delta $, %	Y_p , ц/га	$ \delta $, %	Y_p , ц/га	$ \delta $, %	
Вышгородский	19,2	52,3	12,4	1,6	-	-	-	-	12,6
Бородянский	-	-	20,8	20,2	23,2	34,1	25,2	45,7	17,3
Макаровский	25,5	41,7	2,8	2,8	19,9	10,6	31,7	76,1	18,0
Бориспольский	26,7	29,0	-	-	-	-	28,7	38,6	20,7
Броварской	20,8	1,9	-	-	-	-	-	-	21,2
Васильковский	32,0	8,5	33,0	11,9	20,1	31,9	31,6	7,1	29,5
Фастовский	13,5	43,3	19,4	18,5	19,4	18,5	38,6	20,2	23,8
Обуховский	30,0	11,5	24,1	28,9	-	-	33,4	1,5	33,9
Белоцерковский	32,8	0,6	32,2	1,2	28,0	14,4	31,2	4,3	32,6
Кагарлыкский	31,3	9,0	-	-	-	-	19,1	44,5	34,4
Богуславский	19,6	31,5	32,3	12,9	-	-	14,5	49,3	28,6
Рокитненский	-	-	28,5	20,2	27,9	21,8	18,8	47,3	35,7
Мироновский	-	-	-	-	-	-	14,6	48,2	28,2
Таращанский	-	-	32,0	6,8	33,0	10,4	23,2	22,1	29,9
Ставищенский	-	-	25,9	0,8	25,7	0,0	21,6	16,0	25,7
Володарский	-	-	30,4	16,5	25,8	1,1	25,3	3,1	26,1
Тетиевский	-	-	30,4	8,2	31,5	12,1	21,7	22,8	28,1
Сквирский	-	-	24,5	15,2	30,7	6,2	28,3	2,1	28,9
Средняя $\delta _{cp}$, %		22,9		11,8		14,7		28,1	
Наибольшая		52,3		28,9		34,1		49,3	
Наименьшая		0,6		0,8		0,0		1,5	

Наиболее тесная связь прослеживается в период перед колошением (1999г.) и фазой колошения и цветения (1996 и 1999гг.). Менее тесная связь отмечается в фазе появления нижнего узла соломины и совсем слабая – в фазе восковой спелости. Значения относительной погрешности расчета δ средней районной урожайности U_p по вегетационным индексам колеблются в разные периоды съемки от 0 до 52%.

Наименьшие колебания $|\delta|$ в пределах 1-29% отмечены при съемке 22 мая, наибольшие – от 1 до 49-52% – 3 мая и 5 июля.

Осредненные по району съемки значения относительной погрешности расчета урожайности $|\delta|_{cp}$ равны соответственно в межфазный период от выхода в трубку до появления нижнего узла соломины – 15,1 % (1996г.) и 22,9 % (1999 г.); в период перед колошением – 11,8 % (1999 г.); в фазе колошения – 14,7 % (1999 г.); в фазе цветения – 10,3 % (1996 г.) и в фазе восковой спелости – 28,1 % (1999 г.). Приведенные данные свидетельствуют о наибольшей информативности состояния посевов озимой пшеницы для использования датчиков многоспектральной спутниковой съемки в период ее колошения-цветения.

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют, на наш взгляд, о достаточно широких возможностях использования спутниковой информации. Материалами многоспектральной съемки с природоресурсных космических аппаратов обеспечиваются оценки и прогнозы урожайности озимой пшеницы по отдельному полю. Данные метеорологических спутников NOAA (режим HRPT), полученные в межфазный период от появления нижнего узла соломины до начала фазы молочной спелости позволяют прогнозировать среднюю областную урожайность озимой пшеницы в Украине.

* *

Наведено результати оцінки точності визначення стану посівів сільськогосподарських культур, їх надземної рослинної маси, прогнозу врожайності по окремому полю на прикладі озимої пшениці за даними багатоспектральної зйомки високої роздільної здатності з природоресурсних космічних апаратів, оцінки прогнозу середньої районної

врожайності за даними зйомки з метеорологічного супутника NOAA (режим HRPT).

* *

1. Антоненко В.С., Гойса Н.И., Мацкевич С.В. и др. Пространственно-временная изменчивость спектральных коэффициентов яркости посевов озимой пшеницы и ее учет при дистанционной оценке состояния посевов // Труды УкрНИГМИ. – М.: Гидрометеиздат, 1989. – Вып. 234. – С.96 - 107.
2. Антоненко В.С., Гойса Н.И., Бенедичук Л.Э. и др. Спектральные коэффициенты яркости посевов озимой пшеницы как показатели продуктивности // Труды УкрНИГМИ. – М.: Гидрометеиздат, 1990. – Вып. 238. – С.81-89.
3. Антоненко В.С., Гаценко Р.В., Бенедичук Л.Э. Временная изменчивость спектральных коэффициентов яркости посевов ярового ячменя и ее учет при аэрофотометрических обследованиях состояния посева // Труды УкрНИГМИ. – М.: Гидрометеиздат, 1992. – Вып. 244. – С.116-128.
4. Антоненко В.С., Гаценко Р.В. Методика интерпретации результатов аэрофотометрических обследований посевов ярового ячменя на Украине // Труды УкрНИГМИ. – М.: Гидрометеиздат, 1992. – Вып. 244. – С. 128-141.
5. Антоненко В.С. Оценка состояния посева озимой пшеницы в осенний период вегетации по данным аэрофотометрических обследований и спутниковой съемки // Метеорология, климатология и гидрология. – Одесса: ОГНИ, 1999. – Вып. 36. – С.158-169.
6. Антоненко В.С. Теоретические и методические вопросы интерпретации дистанционных спектрофотометрических обследований посевов основных полевых культур в Украине // Метеорология, климатология и гидрология. – Одесса: ОГНИ, 1997. – Вып. 34. – С.162-183.
7. Дмитренко В.П. Об основах аэровизуальных агрометеорологических наблюдений // Труды УкрНИГМИ. – М.: Гидрометеиздат, 1969. – Вып. 84. – С. 104-115.
8. Дмитренко В.П., Короткова А.Я. Определение минимального числа полей при аэровизуальных обследованиях // Труды УкрНИГМИ. – М.: Гидрометеиздат, 1971. – Вып. 102. – С. 120-131.
9. Кривобок А.А., Антоненко В.С. Алгоритми атмосферної корекції супутникових зображень земної поверхні // Обробка сигналів і зображень

та розпізнавання образів: Праці другої Всеукр. міжнар. конф., Київ, 20-24 грудня 1994 р.– Київ, 1994. – С. 123-124.

10. *Кривобок А.А.* Оценка состояния единичного посева сельскохозяйственной культуры по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения // Метеорология, климатология и гидрология: Межведомственный научный сборник Украины. – Одесса: Астропринт, 2001. – Вып. 34. – С. 184-195.
11. *Кривобок А.А.* Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых данных // Наук. праці УкрНДГМІ. – 1998. – Вип. 246. – С. 140-150.
12. *Кривобок А.А.* Использование многоспектральной спутниковой информации для идентификации посевов сельскохозяйственных культур // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2000. – Вип. 248. – С. 190-198.
13. *Рачкулик В.И., Ситникова М.В.* Использование спектральной отражательной способности почвенно-растительных объектов для оценки их состояния // Аэрокосмические методы в почвоведении: Матер. совещ. ВАСХНИЛ, Почв. ин-т. – М., 1989. – С. 62-63.
14. Руководство по проведению авиамаршрутных агрометеорологических обследований / Под редакцией *Б.И. Огородникова.* – М.: Гидрометеоиздат, 1971.– 104 с.

*Украинский научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, Киев*