



10. Мельник, В.М. Растрово-електронна стереомікрофрактографія: монографія / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – Луцьк: Ред.-вид. від. ВНУ ім. Лесі Українки, 2009. – 468 с.

11. Мельник, В.М. Цифрова обробка РЕМ-зображень / В.М. Мельник, А.В. Шостак, О.В. Мельник: міжвуз. зб. "Наук. нотатки". – Луцьк, 2007. – С. 299-304.

12. Шеннон, К.Э. Работы по теории информации и кибернетике: пер. с англ. / К.Э. Шеннон. – М.: ИЛ,

1963. – 829 с.

13. Шостак, А.В. Оцінка дисперсних ґрунтів та їх основних реологічних властивостей / А.В. Шостак // Містобудування та територіальне планування. – К., 2011. – Вип. 40. – С. 201-212.

14. Эрдоган, Ф. Теория распространения трещин. – В кн.: Разрушение; под ред. Г. Либовица. – Т. 2. Математические основы теории разрушения. – М.: Мир, 1975. – С. 521-615.

Надійшла 04.09.14

* * *

УДК 631.165:528.88

М. П. Слободяник

ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДЗЗ ТА ВЕГЕТАЦІЙНИМИ ІНДЕКСАМИ

Осуществлен общий анализ методологических подходов к прогнозированию урожайности сельскохозяйственных культур. Приводится пример мониторинга изменений состояния сельскохозяйственных угодий с использованием материалов ДЗЗ и вегетационного индекса NDVI.

General study of methodological approaches to the forecasting of crop yield has been carried out. An monitoring example of changes of agricultural land condition using materials of remote sensing of the Earth and vegetation index NDVI is provided.

Актуальність теми дослідження. Багато країн світу здійснюють агрометеорологічний моніторинг з метою оцінювання майбутнього врожаю сільськогосподарських культур. Державні структури потребують надійних продовольчих прогнозів. Попереднє оцінювання обсягів майбутнього врожаю – важливий засіб формування цін на ринку, інструмент планування, зменшення масштабів спекуляції і коливань цін, а також чинник, який визначає рівень доступності продовольства для багатьох людей.

Втрати врожаю і зниження якості продукції, викликані впливом шкідливих організмів, досягають 30 % і більше. Тому велике значення має довгострокове та своєчасне прогнозування появи шкідників на рівні допустимих порогів для організації дієвого захисту від них доступними технологічними засобами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження, пов'язані з застосуванням методів ДЗЗ для розв'язання питань моніторингу стану сільськогосподарських угідь та прогнозування їх урожайності, проводяться у світі вже три десятиліття.

В Україні цією проблемою вчені зацікавились у 1980 році. За останні 10-15 років в установах НАН України, НААН та Мінагрополітики України велися розрізнені дослідження. Інститут агроекології і природокористування НААН разом з ДП "Дніпрокосмос" Державного космічного агентства України (ДКАУ) розробив Концепцію науково-технічної

програми "Моніторинг агроресурсів і прогнозування їхнього стану з використанням даних ДЗЗ" (Агрокосмос) та низку науково-методичних і нормативних документів з обґрунтування, створення і функціонування мережі тестових аграрних полігонів, екологічного оцінювання агроландшафтів і систем землекористування. За підтримки Мінагрополітики та ДКАУ установи НАН України та фірма AG RapidEye (Німеччина) реалізували пілотний проект "Моніторинг аграрних ресурсів з використанням даних супутникової системи RapidEye" (AGRO-UA).

Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого виконує проект упровадження європейської системи прогнозування урожайності MARS/CGMS, розробленої в Об'єднаному дослідницькому центрі Європейської економічної комісії.

За останні роки до супутникового моніторингу аграрного потенціалу залучалось понад дванадцять українських установ та організацій. Але, незважаючи на значний обсяг проведених наукових досліджень, їх результати залишаються розпорошеними, точковими, мало пов'язаними між собою і не доведеними до технологічного системного застосування у виробничій діяльності АПК.

Значний вклад у розвиток напрямку аналізу даних ДЗЗ та можливостей використання результатів моніторингу сільгоспугідь і прогнозування їх урожайності внесли такі вчені та дослідники: В. І. Зацерковний, С. В. Кривоберець, В. В. Сергієнко,

© М. П. Слободяник, 2014



В. С. Антоненко, Р. В. Гаценко, В. Н. Антонов, Л. А. Сладких, С. М. Андреев, Г. Я. Красовський, В. В. Соловей, В. І. Колесник, В. П. Петренкова, В. Ю. Чех, С. С. Кохан, Н. М. Кукуль, М. І. Ільїн, С. В. Скакун, О. М. Лавренюк, Т. М. Блекмер, Д. С. Счеперс, І. В. Бальченко, В. В. Казимир, В. П. Клименко та багато інших. Їхні праці становлять теоретичну та методологічну основу для розв'язання поставлених завдань.

Мета дослідження – охарактеризувати основні методи прогнозування врожайності сільськогосподарських культур з акцентом на переважне використання методів дистанційного зондування Землі та вегетаційних індексів.

Виклад основного матеріалу. Врожайність агрокультур залежить від агрокліматичних, ґрунтових та агротехнічних факторів, тому і методи її прогнозування базуються на накопиченні інформації про різні ресурси – агрометеорологічні, ґрунтові, статистичні та дані ДЗЗ.

Усі методи прогнозування врожайності можна розділити на такі, що ґрунтуються на оцінках фізичних особливостей навколишнього середовища, на методи прямого оцінювання вмісту хлорофілу та які використовують дані ДЗЗ [7].

Серед **методів, що ґрунтуються на оцінках фізичних особливостей навколишнього середовища**, найбільш поширені статистичні методи і метод механістичних моделей росту рослин.

Статистичні методи базуються на припущенні існування прямої залежності між характеристиками навколишнього середовища та врожайністю. Для виявлення такої залежності застосовуються методи лінійного і нелінійного регресійного аналізу, нейронні мережі; досліджуються залежності врожайності від агрохімічних властивостей ґрунту (рН, вміст органічних речовин, азоту, фосфору, калію, кальцію, магнію) та інших характеристик ґрунту: текстура, тип, глибина верхнього шару (ці характеристики первинні, від них залежать агрохімічні властивості), метеорологічних параметрів (опаді, температура, сонячна радіація). Статистичні методи рідко застосовуються на практиці через велику трудомісткість наземних вимірювань і складність виявлення залежностей.

Механістичні моделі розвитку рослин використовуються для дослідження процесу засвоєння ними вуглецю і приросту біомаси. Як правило, ріст рослин моделюється під впливом метеорологічних параметрів, особливостей ґрунту і складу внесених добрив. При цьому типовими вхідними даними є показники температури, кількості опадів та сонячної радіації, кількості й типу добрив, щільності насаджень, параметрів іригації та обробітку, типу, глибини верхнього шару та вмісту гумусу в ґрунті. Більшість моделей застосовують тільки для одного виду рослин, наприклад, SOYGRO – для бобових, CERES-Maize – для кукурудзи, CERES-Wheat – для пшениці, WARM – для рису.

Відомі також універсальні моделі для прогнозування врожайності сільськогосподарських куль-

тур: SUCROS, Stics, WOFOST. Переваги моделей росту рослин – їхня фізична обґрунтованість та нижчі вимоги до об'ємів калібрувальних даних у порівнянні зі статистичними моделями. Недоліки – складність обчислень, особливо при побудові універсальних моделей.

Методи прямого оцінювання вмісту хлорофілу засновані на наземних вимірюваннях цієї величини SPAD-датчиками [8] і відзначаються високим ступенем кореляції між показниками кількості хлорофілу і врожайністю різних сільськогосподарських культур. Але область застосування цих методів обмежена необхідністю проведення великої кількості наземних вимірювань.

Методи, які використовують дані ДЗЗ, можна розділити на два класи:

1) методи, котрі пов'язують урожайність та спектральні характеристики з використанням регресійних моделей і вегетаційних індексів;

2) методи, які використовують оцінки стану рослинності (такі як LAI і біомаса) за даними ДЗЗ для калібрування механістичних моделей зростання.

Одним з найпростіших методів цієї групи є використання механізму лінійної регресії для моделювання залежності врожайності від спектра поглинання рослинного покриву. Максимуми поглинання хлорофілу лежать у червоній і синій областях спектра, поверхня листя відбиває промені у ближньому інфрачервоному діапазоні. Аналізовані дані можуть бути використані як для оцінювання активності фотосинтезу рослин, так і для визначення врожайності. Недолік методу в сильній залежності яскравості в досліджуваних спектральних діапазонах від параметрів середовища, зокрема стану атмосфери, кута падіння світла, типу ґрунту. Для подолання цього недоліку частково може використовуватись функція автоматичної корекції зображень, яка передбачена в більшості сучасних ПС.

Крім того, застосовуються також вегетаційні індекси – відношення або різниця інтенсивності у двох і більше спектральних діапазонах. Ефективність застосування методу індексів також залежить від стану навколишнього середовища. Для підвищення надійності оцінювання стану рослинного покриву застосовуються індекси, стійкі до певного класу джерел шуму: perpendicular vegetation index (PVI), soiladjusted vegetation index (SAVI), transformed soiladjusted vegetation index (TSAVI), atmospherically resistant vegetation index (ARVI). Відомі приклади успішного застосування індексів green normalized vegetation index (GNDVI), green/NIR ratio (SR), photochemical reflectance index (PRI) для оцінювання стану рослинності та прогнозування врожайності. Для підвищення точності прогнозу зазвичай використовують сумарне значення індексів (наприклад, NDVI та SR) за сезон.

Найперспективнішими з точки зору адаптованості є методи, засновані на калібруванні моделей росту за даними ДЗЗ. Процес інтегрування даних ДЗЗ в механістичні моделі зростання передбачає два етапи – оцінювання параметрів рослинності



(як правило, LAI) за даними ДЗЗ і налаштування моделі за отриманими параметрами.

Спинимось докладніше на застосуванні найбільш широковідомого вегетаційного індексу NDVI (Normalised Vegetation Index).

Спостереження за динамікою розвитку сільськогосподарських культур за матеріалами ДЗЗ показали, що в спектральному просторі ознак кожна культура в певні терміни і в певній фазі розвитку утворює стійкий кластер (сукупність однорідних фотометричних точок) [3]. Хоча стан посівів і характеризується набором параметрів, але частково кількісною характеристикою стану посівів може служити нормалізований вегетаційний індекс NDVI.

NDVI можна розрахувати за будь-якими знімками високої, середньої чи навіть низької роздільної здатності, що мають спектральні канали в червоному (0,55-0,75 мкм) та інфрачервоному (0,75-1,0 мкм) діапазонах. Алгоритм розрахунку NDVI включено практично у всі пакети програмного забезпечення, призначені для оброблення даних дистанційного зондування Землі (ArcView Image Analysis, ERDAS Imagine, ENVI, Scanex MODIS Processor, ScanView та ін.). Нормалізований вегетаційний індекс чутливий до покриття поверхні рослинністю понад 15 %. Він мало залежить від стану атмосфери. А ще він характеризує щільність рослинності, дозволяє фермерам оцінити схожість і ріст рослин, продуктивність угідь. У певній точці зображення NDVI – це відношення різниці інтенсивності відбитого світла в інфра-

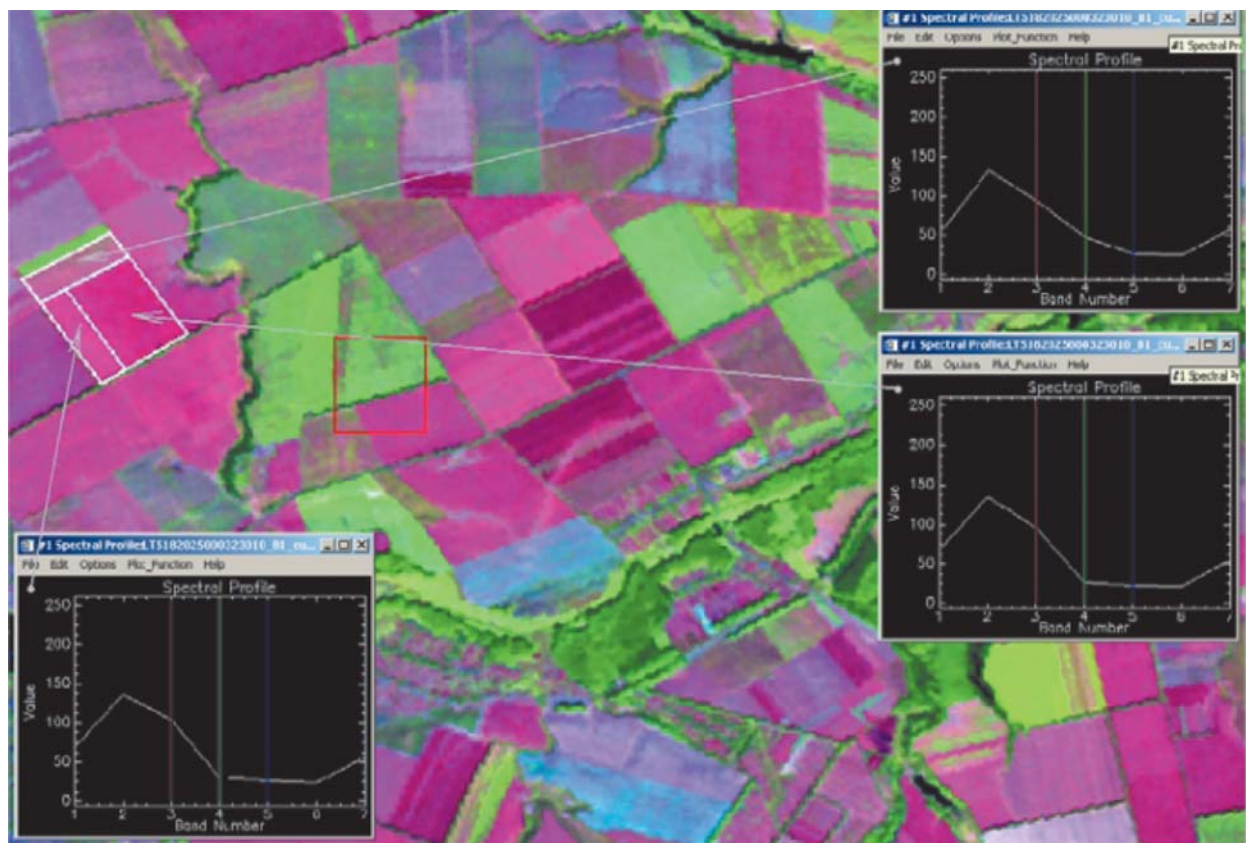
червоному і червоному діапазонах спектра до їх суми: $NDVI = \frac{r\ NIR - r\ red}{r\ NIR + r\ red}$ [5].

Значення NDVI змінюються в діапазоні від -1 до +1. Для зеленої рослинності відображення в червоному спектрі завжди менше, ніж у ближньому інфрачервоному через поглинання світла хлорофілом, тому значення NDVI для рослинності не можуть бути менше 0. Більшість супутників знімає відразу в декількох спектральних діапазонах (видимому, ближньому і середньому інфрачервоному, тепловому), що дозволяє будувати спектральні профілі для кожної культури на різних стадіях вегетації (мал. 1) [8].

Розрахунок індексу для кожного пікселя космічного знімка по червоній та ближній інфрачервоній спектральних зонах дозволяє отримати вихідне індексно-картографічне зображення, а класифікація за кількома спектральними каналами – виявляти відмінності для культур, які мають однаковий індекс вегетації (мал. 2) [8].

При появі сходів та у вегетаційний період росту й розвитку культур значення NDVI зростають, а з настанням періоду дозрівання вміст хлорофілу знижується і, відповідно, знижуються значення NDVI. Це добре видно на графіку (мал. 3), отриманому в результаті опрацювання даних із супутників Terra, SPOT-2 та SPOT-4 [2].

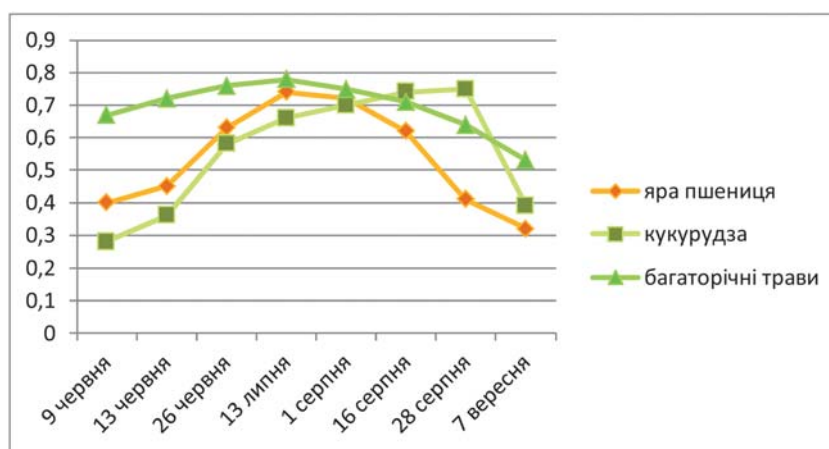
Зменшення значень NDVI в період активної вегетації (до настання фази молочної стиглості таких сільгоспкультур, як, наприклад, кукурудза та яра пшениця) свідчить про стресовий стан посівів.



Мал. 1. Спектральні профілі виділених полів, побудовані за знімками Landsat (використано сім каналів видимого та інфрачервоного діапазонів)



Мал. 2. Значення вегетаційного індексу різних культур, отримані за знімком Landsat (два з трьох полів, виділених на мал. 1, мають однакові значення NDVI)



Мал. 3. Сезонний хід значень вегетаційного індексу на полях ярої пшениці, кукурудзи і багаторічних трав

Це може бути пошкодження посівів унаслідок стихійних явищ (град, зливи, посуха, пожежі), а також ураження шкідниками, такими як хлібна смугаста блішка, ячмінна шведська муха тощо. Збільшення значень NDVI на парових полях свідчить про їх засміченість (при зростанні значень NDVI до 0,3700 і вище на парах вже необхідно проводити агротехнічні заходи з боротьби із бур'янами).

Висновки. Кількісні характеристики, отримані в результаті оброблення мультиспектральних знімків, дозволяють виявити проблемні зони пригніченої рослинності. Вони дають можливість приймати найбільш оптимальні рішення, спрямовані на підвищення врожайності. Ділянки з різним станом рослинності або об'ємом зеленої фітомаси на знімках відображаються різними кольорами. За допомогою статистичного оброблення карт NDVI, крім визначення кількості фітомаси, можна виділити площі під посівами різних сільськогосподарських культур.

Застосування даного підходу до прогнозування

дозволяє системно оцінювати врожайність, дає можливість своєчасно виділяти проблемні ділянки сільськогосподарських угідь і оперативно видавати рекомендації щодо їх раціонального використання та покращення стану. Маючи достовірний прогноз, можна знизити фізичні втрати врожаю завдяки, наприклад, своєчасній боротьбі зі шкідниками, а також зменшити фінансові затрати, скажімо, на закупівлю необхідних матеріалів за оптимальними цінами. Можна навести багато прикладів, коли екологічно безпечні технології одночасно є і економічно вигідними. Застосування методів ДЗЗ та вегетаційних індексів може стати інструментом для вибору найкращого шляху розвитку агроєкосистеми, обходячи небажані тенденції, що призводять до зниження продуктивності, зростання собівартості продукції та зниження ефективності господарювання.

Література

1. Андреев, С.М. Метод оценки плодородия почв по материалам космических съёмок (на примере Татарбунарского района Одесской области) / С.М. Андреев, Г.Я. Красовский, В.В. Соловей // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В.И. Вернадского. Сер. "География". – 2011. – Т. 24. – № 3. – С. 16-23.
2. Антонов, В.Н. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ / В.Н. Антонов, Л.А. Сладких // Геоматика. – 2009. – № 4. – С. 50-53.
3. Антоненко, В.С. Оценка состояния посевов и прогноз урожайности озимой пшеницы в Украине по данным многоспектральной космической съёмки / В.С. Антоненко, Р.В. Гаценко // Наук. пр. УкрНДГМІ. – 2005. – Вип. 254. – С. 55-71.
4. Зацерковний, В.І. Використання ГІС та ДЗЗ для моніторингу сільськогосподарських земель / В.І. Зацерковний, С.В. Кривоберець, В.В. Сергієнко // Чернігів. наук. часопис. Сер. 2. Техніка і природа. – 2011. – № 2. – С. 40-48.
5. Колесник, В.І. Применение ДЗЗ и ГИС-технологий для прогнозирования урожайности зерновых / В.І. Колесник, В.П. Петренкова, В.Ю.Чех // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В. И. Вернадского. Сер. "География". – 2003. – Т. 16. – № 2. – С. 73-80.
6. Кохан, С.С. Застосування вегетаційних індексів нормалізованої різниці та зваженої різниці при визначенні стану сільськогосподарських культур / С.С. Кохан // Доп. Нац. акад. наук України. – 2012. – № 2. – С. 135-140.
7. Куссуль, Н.Н. Оценка состояния растительности и



прогнозирование урожайности озимых культур Украины по спутниковым данным / Н.Н. Кукуль, Н.И. Ильин, С.В. Скакун, А.Н. Лавренко // International Book Series "Information Science and Computing". – 2008. – С. 103-109.

8. *Мозговий, Д.К.* Використання багатоспектральних супутникових знімків для класифікації посівів сільгоспкультур / Д.К. Мозговий, О.В. Кравець // Екологія та ноосферологія. – 2009. – Т. 20. – № 1-2. – С. 54-58.

9. *Blackmer, T.M.* Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn / T.M. Blackmer, J.S. Schepers // Journal of production agriculture. – 1995. – P. 56-60.

Інтернет-джерела

10. *НААН.* Науково-методичний і координаційний центр з наукових проблем розвитку АПК України. – Реж. доступу: <http://www.uaan.gov.ua>

11. *Космічна система "СІЧ-2": завдання та напрями використання.* – Реж. доступу: http://www.nkau.gov.ua/pdf/SICH2_small.pdf

12. *Бальченко, І.В.* Сучасні методи управління станом аграрної системи / І.В. Бальченко, В.В. Казимир, В.П. Клименко. – Реж. доступу: <http://vistnic.stu.cn.ua/index.pl?task=arcl&j=6&id=36>

Надійшла 24.09.14

* * *

До уваги авторів

1. Матеріали до "Вісника геодезії та картографії" подаються у текстовому редакторі Microsoft Word з дотриманням таких вимог: параметри сторінки А4; всі поля на сторінці по 2 см; розмір шрифту 10 пт; інтервал одинарний; автоматичні переноси не застосовувати; абзац починати за допомогою клавіші "ENTER".

2. Формули набираються у редакторі формул програми Microsoft Word. Розміри шрифту для формул: звичайний – 10 пт, великий індекс – 7 пт, малий індекс – 6 пт, великий символ – 11 пт, малий символ – 8 пт. **Ширина формули не повинна перевищувати 8 см.**

3. Малюнки, фото та схеми подаються **окремими файлами у графічному вигляді** у форматах *.eps (векторний), *.tif, *.jpg (растровий) з роздільною здатністю не менше 300 dpi, у моделі СМҮК. Графічні зображення, вставлені в Microsoft Word або в інші редактори, **не приймаються!**

4. Розмірність малюнків і таблиць (ширина/висота): 80 / до 230 мм, 130 / 230 мм, 170 / до 230 мм. Розмір шрифту для таблиць – 10 пт. Кожна таблиця повинна мати заголовок.

5. До статті мають входити такі елементи: шифр УДК; резюме та назва статті українською, російською та англійською мовами; основний текст відповідно до вимог ВАК України; список літератури, укладений за правилами стандартів і в алфавітному порядку; відомості про авторів (прізвище, повне ім'я та по батькові, посада в установі, де працює (вчиться) автор, вчений ступінь, вчене звання, домашня і службова адреси, телефон, електронна пошта, інтернет-сторінка для зв'язку).

6. Стаття і додатки подаються в електронному вигляді або пересилаються електронною поштою на адресу visnykgeodez@gmail.com, nv@gki.com.ua.

Редакція