



ISSN 2411-6602 (Online)

ISSN 1607-2855 (Print)

Том 11 • № 1 • 2015 С. 75 – 83

УДК 528.8:631

Технології дистанційного зондування Землі в задачах оцінки врожайності

В.І. Зацерковний^{1*}, І.М. Зінченко¹, С.В. Кривоберець², Є.К. Углицьких¹

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка

²Чернігівський національний технологічний університет

В статті наведено алгоритм оцінки врожайності культур за допомогою індексів NDVI. Дослідження проводились по території України на рівні областей. Запропонований алгоритм дозволяє проводити швидкий і якісний моніторинг полів для прогнозування урожайності.

ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ УРОЖАЙНОСТИ, Зацерковный В.И., Зинченко И.М., Кривоберец С.В., Углицких Е.К. — В статье приводится алгоритм оценки урожайности культур с помощью индексов NDVI. Исследования проводились почти по всей Украине на уровне областей. Предложенный алгоритм позволяет проводить быстрый и качественный мониторинг необходимых полей для дальнейшего прогнозирования урожайности.

REMOTE SENSING TECHNOLOGIES IN THE PROBLEMS OF THE ASSESSMENT OF CROP YIELDS, by Zatserkovnyi V.I., Zinchenko I.M., Kryvobereets S.V., Uglickih E.K. — The paper presents an algorithm for calculating crop yields using the index NDVI. The research was carried out at almost the whole Ukraine territory at the level of regions. The proposed algorithm allows a fast and qualitative monitoring of the required fields for predicting the crop yield.

Ключевые слова: NDVI; Landsat; ArcGIS; ENVI; мониторинг; вегетация; прогноз урожайности.

Key words: NDVI; Landsat; ArcGIS; ENVI; monitoring; vegetation; the forecast yield.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Систематичність космічних зйомок забезпечує ефективний моніторинг розвитку сільськогосподарських (с.-г.) культур, екологічний стан агроландшафтів, дозволяє отримувати точну і неупереджену статистику, оперативно оцінювати площі посівів с.-г. культур, істотно уточнювати оптимальні терміни і способи сівби с.-г. культур та оптимальний час збору врожаю, здійснювати моніторинг стану посівів та динаміку їх вегетації, прогнозувати урожайність та валові збори кожної культури за конкретними площами, забезпечувати фахівців прогнозними даними, здійснювати моніторинг посух і оцінку збитків, контроль раціонального землекористування, використання субсидій, оцінку заставної вартості землі. Крім того, застосування технологій ДЗЗ дозволяє здійснювати точне (прецизійне) землеробство (precision farming), здійснювати моніторинг ґрунтів на рівні господарства, забезпечувати варіабельне внесення добрив, суттєво знижувати витрати пального за рахунок впровадження космічних навігаційних систем тощо [1].

На сучасному етапі в умовах України практично відсутні працездатні технології прогнозу врожайності зернових культур, які інтегровані в с.-г. виробництво і ґрунтуються на математичних моделях і космічній інформації. Тому розробка відносно простих і одночасно ефективних алгоритмів для завчасної оцінки урожайності зернових культур і відповідно валових зборів за допомогою даних ДЗЗ є надзвичайно актуальною задачею.

2. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ПУБЛІКАЦІЙ

Існує два основних підходи до оцінки продуктивності зернових культур. Перший — використання статистичних і імітаційних моделей різного рівня деталізації, заснованих на експериментально визначених залежностях росту і розвитку культур від наборів метеорологічних даних: температури і вологості повітря і ґрунту, опадів, рівня фотосинтетичної активної радіації, дати посіву, вмісту поживних речовин у ґрунті тощо. На сьогодні відомо багато різних моделей, які можна класифікувати на фізико-статистичні або балансові, що ґрунтуються на регресійних залежностях (Козодеров В.В. [2], Кондранин Т.В. [2], Томмінг Х.Г., Шашко Д.І., Давітая Ф.Ф., de Wit С.Т. та інші); математико-статистичні або динаміко-регресійні, що засновані, зазвичай, на емпіричних залежностях нелінійного типу (Бондаренко М.Ф., Константинов А.Р., Уланова Є.С., Desai Р. та інші); комплексні динамічні імітаційні моделі

* Зацерковний Віталій Іванович; ✉ zvigis@mail.ru

(Біхеле З.Н., Молдау Х.Л., Росс Ю.К., Сиротенко О.Д., Полуектов Р.А., Williams J.R., Supit I., van Dierpen C.A. та інші).

Другий підхід заснований на використанні регресійних залежностей між очікуваною продуктивністю зернових культур і різними супутниковими спектральними параметрами (Бартальов С.А. [3], Коробов Р.М., Tucker C.J., Hatfield J.L. та інші).

При цьому розглядається залежність характеристик зернових культур (листовий індекс, урожайність тощо) від вегетаційних індексів (BI), зокрема від нормалізованого BI — NDVI [4].

3. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є розробка алгоритму, призначеного для прогнозової оцінки врожайності зернових культур з використанням супутникових даних в умовах України.

Для розв'язку поставленої задачі використовувались методи системного аналізу, математичного моделювання, технології обробки космічних знімків.

4. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Як свідчить проведений авторами аналіз, спроби побудови моделей, що відбивають зв'язок урожаю з природними і антропогенними факторами на основі даних багатофакторного аналізу, не дають бажаного результату. Причиною цього є неможливість врахувати в емпіричних моделях реальну мінливість погодних умов та інших факторів, що впливають на врожайність (вологість ґрунту, вміст у ґрунті доступних для рослин елементів живлення тощо), які змінюються в широких межах. Єдиним шляхом подолання наявних протиріч є використання технологій ГІС і ДЗЗ [5].

Технології ДЗЗ (рис. 1) є інструментом, який забезпечує розв'язання трьох основних задач, що обумовлюють успіх в умовах сучасного ринку: наявність своєчасної об'єктивної інформації, здатність приймати ефективні управлінські рішення і можливість реалізувати ці рішення на практиці.

С.-г. виробництво практично в усьому світі відрізняється нестабільністю. Різкі коливання клімату, що проявляються в останні роки поряд з низькою інтенсивністю вирощування культур, призводять до підвищеної нестабільності с.-г. виробництва в Україні. В умовах подібної нестабільності високе значення набуває одержання об'єктивної інформації про стан с.-г. виробництва, у тому числі завчасне прогнозування і точна оцінка об'ємів виробництва с.-г. продукції, без яких як органам державної влади, так і суб'єктам с.-г. виробництва практично неможливо оперативно реагувати на зміну кон'юнктури аграрного ринку і згладжувати його коливання.

Великі перспективи для швидкого одержання об'єктивної інформації про стан посівів с.-г. культур, забезпеченість рослин азотним живленням, прогнозування врожаю мають методи дистанційної діагностики, які дозволяють приймати обґрунтовані рішення щодо корекції заходів по догляду за посівами, раціонального використання агротехнічних ресурсів та завчасного формування ринкових цін на с.-г. продукцію.

Треба відзначити, що сьогодні в Україні основною інформацією, що використовується при проведенні різних оцінок с.-г. виробництва, в тому числі стану посівів, є результати звітів різних регіональних респондентів і інформація наземних вибірових вимірювань. Так, наприклад, основним джерелом інформації для складання прогнозів урожайності слугують результати польових обстежень стану посівів с.-г. культур, які декілька разів за сезон вегетації здійснює рідка мережа агрометеорологічних станцій і постів. Посіви обстежуються на обмеженій кількості полів, а їх результати екстраполюються на територію усієї країни. Як наслідок, якість оцінки стану посівів на рівні країни або окремих регіонів є недостатньо високою, а одержання інформації на рівні країни — недостатньо оперативним. Все це значно знижує якість прогнозів виробництва с.-г. продукції.

Об'єктивна інформація про стан рослин у кожний період їхнього розвитку потрібна не тільки для управління продукційним процесом — вона стане в нагоді й під час прогнозування врожаю, вирішення численних проблем зі збиранням урожаю, формування цін на вирощувану продукцію тощо [6].

Для визначення стану вегетації за даними ДЗЗ традиційно використовують параметр, що називається *індексом вегетації*. Вегетаційний індекс (BI) — це показник, що розраховується в результаті операцій з різними спектральними діапазонами (каналами) ДДЗ і який має відношення до параметрів рослинності в даному пікселі знімка. Ефективність BI визначається особливостями відбиття; ці індекси виведені в основному емпірично. Основне припущення з використання BI полягає в тому, що деякі математичні операції з різними каналами ДЗЗ можуть дати корисну інформацію про рослинність. Це підтверджується безліччю емпіричних даних. Друге припущення — це ідея, що відкритий ґрунт на знімку буде формувати в спектральному просторі пряму лінію (так звану ґрунтову лінію) [7].

Відомо, що кожний фізичний об'єкт краще поглинає електромагнітне випромінювання (ЕМВ) в певному спектрі, а в іншому спектрі — краще відбиває. Так, фотосинтетичний пігмент хлорофіл, що присутній в зелених листках рослин, поглинає діапазон хвиль від 0,4 до 0,7 мкм. Клітинна ж структура листків сильно відбиває ЕМВ в ближньому інфрачервоному (БІЧ) діапазоні (від 0,7 до 1,1 мкм). Таким

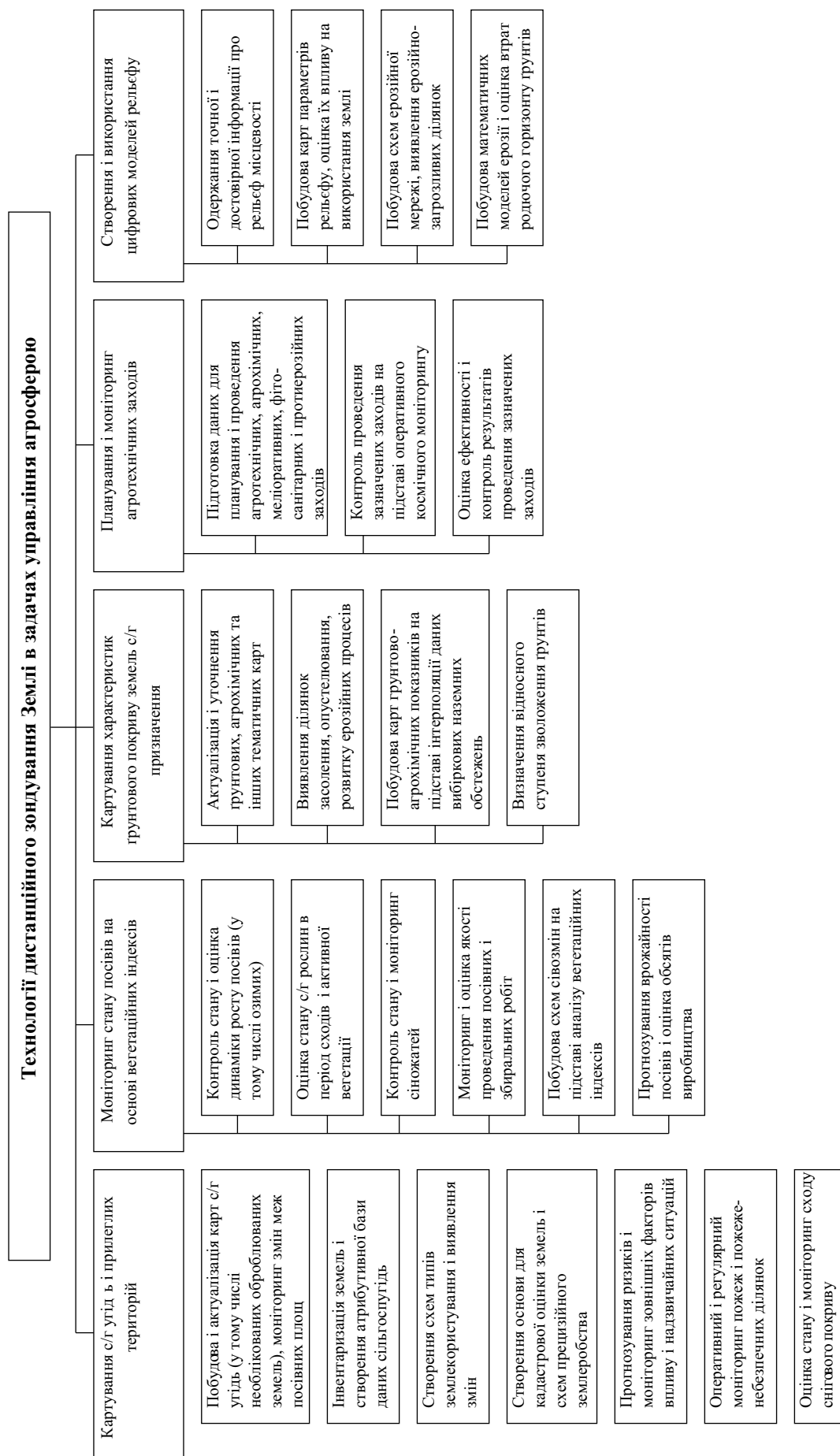


Рис. 1. Технології дистанційного зондування Землі в задачах управління агросферою

Таблиця 1. Індекси, що розраховуються за значеннями коефіцієнтів відбиття в широких спектральних діапазонах [4, 8]

Типи вегетаційного індексу (BI)	Формула і стислий опис	Автори
Відносний BI (Ratio VI, RVI, Simple Ratio (SR))	$RVI = \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} \right)$ <p>Значення індексу змінюються від 0 до нескінченності. Для зеленої рослинності значення $VI > 1$ і зростають зі збільшенням зеленої фітомаси, зімкнутості рослинності (зазвичай приймають значення 2–8)</p>	Birth і McVey, 1968; Jordan C.F., 1969; Rouse J.W. та ін., 1973; Tucker C.J. та ін., 1979
Нормалізований вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)	$NDVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right),$ <p>Індекс може приймати значення від -1 до 1. Для рослинності індекс NDVI приймає позитивні значення, зазвичай від 0,2 до 0,8</p>	Вперше описаний Rouse B.J. та ін., 1973; концепція вперше представлена Kriegler F.J. та ін., 1969
Удосконалений вегетаційний індекс (Enhanced Vegetation Index, EVI)	$EVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_{RED} - C_2 \rho_{BLUE} + L} \right) \cdot (1 + L)$ <p>Коефіцієнти C_1, C_2 і L емпірично встановлені і дорівнюють 6,0, 7,5, і 1,0 відповідно (Huete та ін., 1997). Індекс може приймати значення від -1 до 1. Для зеленої рослинності звичайні значення від 0,2 до 0,8</p>	Rouse J.W. та ін., 1973; Tucker C.J., 1979; Jackson R.D. та ін., 1983; Kriegler F.J. та ін., 1969; Sellers P.J., 1985; Huete A.R. та ін., 1997
Інфрачервоний вегетаційний індекс (Infrared Percentage VI, IPVI)	$IPVI = \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right) = \left(\frac{NDVI + 1}{2} \right)$ <p>Функціонально IPVI і NDVI еквівалентні. Індекс може приймати значення від 0 до 1. Для зеленої рослинності характерні значення від 0,6 до 0,9</p>	Crippen R.E., 1990
Різницевий вегетаційний індекс (Difference VI, DVI)	$DVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED})$ <p>Індекс може приймати будь-які значення. Ізовегетаційні лінії йдуть паралельно одна одній</p>	Lillesand T.M. і Kiefer R. W., 1987; Richardson і Everitt, 1992
Перпендикулярний вегетаційний індекс (Perpendicular Vegetation Index (PVI))	$PVI = (\sin \alpha \cdot \rho_{NIR} - \cos \alpha \cdot \rho_{RED}),$ <p>де α — кут між ґрунтовою лінією і віссю NIR. Індекс може приймати значення від -1 до 1.</p> $PVI = \sqrt{(0,35MSS_4 - 0,149MSS_2)^2 + (0,355MSS_2 - 0,00852MSS_4)^2}$	Richardson A.J. і Wiegand C.L., 1977
Зважений різницевий вегетаційний індекс (Weighted Difference VI, WDVI)	$WDVI = (\rho_{NIR} - g \cdot \rho_{RED}),$ <p>де g — нахил ґрунтової лінії. Зв'язаний з PVI приблизно так же, як IPVI зв'язаний з NDVI. WDVI — це математично більш простіший варіант PVI, але він має необмежений діапазон значень. Як і PVI, WDVI дуже чутливий до атмосферного впливу (Qi та ін., 1994)</p>	Clevers J.G., 1988
Трансформований вегетаційний індекс (Trans- formed Vegetation Index TVI)	$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5}$ <p>0,5 додається для виключення від'ємних значень під коренем. Функціонально TVI і NDVI еквівалентні</p>	Tucker C.J. та ін., 1979
Індекси, стійкі до впливу ґрунту		
Ґрунтовий вегетаційний індекс (Soil Adjusted VI, SAVI)	$SAVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \right) \cdot (1 + L),$ <p>де $L = [0; 1]$; $L = 0$ для дуже густого рослинного покриву, $L = 1$ для дуже розрідженого, найчастіше усього використовують значення $L = 0,5$ (Huete і Liu, 1994). Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунтів проходить через точку 0</p>	Huete A.R., 1988; Huete A.R. і Liu H., 1994, Qi J. та ін., 1994

Модифікований ґрунтовий вегетаційний індекс (Modified Soil Adjusted VI, MSAVI). Модифікований ґрунтовий вегетаційний індекс — 2 (Modified Soil Adjusted VI-2, MSAVI2)	$MSAVI1 = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \right) \cdot (1 + L),$ <p>де $L = (1 \div 2) \cdot s \cdot NDVI \cdot WDV$;</p> $MSAVI2 = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \right) \cdot (1 + L),$ $L = 1 - \frac{1}{2} \left(2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{RED})} \right)$ <p>s — нахил ґрунтової лінії. MSAVI2 — це другий модифікований ґрунтовий індекс, як варіант MSAVI. Для розрахунку індексу не потрібне знаходження ґрунтової лінії і обчислення WDV, NDVI. Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил і проходить через точку 0</p>	Qi J. та ін., 1994
Трансформований ґрунтовий вегетаційний індекс (Transformed Soil Adjusted VI, TSAVI)	$TSAVI = \left(\frac{s \cdot (\rho_{NIR} - s \cdot \rho_{RED} - a)}{a \cdot \rho_{NIR} + \rho_{RED} - a \cdot s + x(1 + s^2)} \right),$ <p>де a — координата перетинання ґрунтової лінії з віссю NIR (лежить між точкою (0; 0) і точкою перетинання ізовегетаційних ліній в індексі SAVI для $L = 0,5$); s — нахил ґрунтової лінії, X — коефіцієнт корегування, для зменшення ґрунтового шуму (в оригінальній статті $X = 0,08$). Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил</p>	Baret F. та ін., 1989; Baret F. і Guyot G., 1991
Індекси, стійкі до впливу атмосфери		
Індекс глобального моніторингу навколишнього середовища (Global Environmental Monitoring Index, GEMI)	$GEMI = E \cdot (1 - 0,25E) - \left(\frac{\rho_{RED} - 0,125}{1 - \rho_{RED}} \right),$ $E = \frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_{RED}^2 + 1,5\rho_{NIR} + 0,5\rho_{RED})}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0,5}$ <p>Значення індексу змінюються від 0 до 1</p>	Pinty B. і Verstraete M.M., 1991; Leprieur C. та ін., 1994. Вони намагалися уникнути необхідності проводити детальне атмосферне корегування шляхом конструювання загальної поправки на вплив атмосфери для вегетаційного індексу.
Вегетаційний індекс, стійкий до впливу атмосфери (Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI)	$ARVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - Rb}{\rho_{NIR} + Rb} \right),$ <p>де $Rb = \rho_{RED} - a \cdot (\rho_{RED} - \rho_{BLUE})$. Зазвичай, $a = 1$, при малому покритті рослинності і невідомому типу атмосфери $a = 0,5$ (Kaufman Y.J., 1992). Він використовує значення відбиття в синій зоні, щоб усунути вплив атмосфери на коефіцієнти відбиття у червоній зоні. Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил і проходить через точку 0</p>	Kaufman Y.J., Tanre D., 1992; Kaufman Y.J. і Tanre D., 1996; Huete A.R. і Liu H., 1994
Ґрунтовий вегетаційний індекс, стійкий до впливу атмосфери (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index (SARVI))	$SARVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - p \cdot Rb}{\rho_{NIR} + p \cdot Rb} \right)$ $p \cdot Rb = \rho_{RED} - \gamma(\rho_{BLUE} - \rho_{RED})$ <p>Huete and Liu (1994) також запропонували провести таку заміну і в індексі SAVI, що отримав назву індекс SARVI (атмосферостійкий скорегований ґрунтовий вегетаційний індекс).</p>	Huete A.R. і Liu H., 1994

Вегетаційний індекс зеленості (Green VI, GVI)	<p>Існує декілька GVI. В їх основі лежить використання двох або більше ділянок відкритого ґрунту для побудови ґрунтової лінії, потім використовується ортогоналізація Грама–Шмидта (Gram–Schmidt orthogonalization), для знаходження «зеленої» лінії («greenness» line), яка проходить через точку найбільш густого рослинного покриву і перпендикулярна ґрунтовій лінії.</p> $GVI = -0,29MSS_4 - 0,56MSS_5 + 0,6MSS_6 + 0,49MSS_7$ $GVI = -0,2848 \cdot TM_1 - 0,2435 \cdot TM_2 - 0,5436 \cdot TM_3 + 0,7243 \cdot TM_4 + 0,084 \cdot TM_5 - 0,18 \cdot TM_7,$ <p>де MSS_n — яскравість в n зоні системи MSS, аналогічно для TM. Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил в n-мірному просторі. Ізовегетаційні лінії паралельні ґрунтовій лінії.</p>	Kauth R.G. і Thomas G.S., 1976 розробили 4-канальний варіант індексу для знімків MSS. Crist E.P. і Cicone R.C., 1984 створили 6-канальний варіант для знімків TM. Jackson R.D., 1983 описав, як створити n -канальну версію
<p>Індекси, що розраховуються за значеннями коефіцієнтів відбиття у вузьких спектральних діапазонах.</p> <p>Індекси цієї групи також відображують загальну кількість і стан рослинності. Ці індекси використовують для розрахунків дані про яскравість на ділянці спектра от 690 до 740 нм, тобто розглядають область інфрачервоного схилу (red edge) [4, 8].</p>		
Нормалізований різницевий ВІ для зони БІЧ схилу (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI_{0,705} = \left(\frac{\rho_{0,75} - \rho_{0,705}}{\rho_{0,75} + \rho_{0,705}} \right)$ <p>Індекс може приймати значення від -1 до 1. Для зеленої рослинності зазвичай приймає значення від 0,2 до 0,9</p>	Gitelson A.A. та ін., 1994; Sims D.A. та ін., 2002
Модифікований відносний ВІ для області ближнього інфрачервоного схилу (Modified Red Edge Simple Ratio Index)	$mSR_{0,705} = \left(\frac{\rho_{0,75} - \rho_{0,445}}{\rho_{0,75} + \rho_{0,445}} \right)$ <p>Індекс може приймати значення від 0 до 30. Для зеленої рослинності зазвичай приймає значення від 2 до 8</p>	Datt B., 1999; Sims D.A. та ін., 2002
Модифікований нормалізований різницевий ВІ для області ближнього інфрачервоного схилу (Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index)	$mNDVI_{0,705} = \left(\frac{\rho_{0,75} - \rho_{0,705}}{\rho_{0,75} + \rho_{0,705} - 2\rho_{0,445}} \right)$ <p>Індекс може приймати значення від -1 до 1. Для зеленої рослинності зазвичай приймає значення від 0,2 до 0,7</p>	Datt B., 1999; Sims D.A. та ін., 2002
1,2,3 індекси Вогельмана для зони БІЧ схилу (Vogelmann Red Edge Index 1, Index 2, Index 3)	$VOG1 = \left(\frac{\rho_{0,74}}{\rho_{0,72}} \right); \quad VOG2 = \left(\frac{\rho_{0,734} - \rho_{0,747}}{\rho_{0,715} + \rho_{0,726}} \right);$ $VOG3 = \left(\frac{\rho_{0,734} - \rho_{0,747}}{\rho_{0,715} + \rho_{0,720}} \right)$ <p>Індекс може приймати значення від 0 до 20. Для зеленої рослинності зазвичай приймає значення від 4 до 8</p>	Vogelmann J.E. та ін., 1993
<p>Індекси для оцінки вмісту вологи у рослинному покриві</p> <p>Для розрахунків цих індексів використовуються значення відбиття у ближній інфрачервоній і середній інфрачервоній зонах спектра</p>		
Водний індекс (Water Band Index, WBI)	$WBI = \left(\frac{\rho_{0,900}}{\rho_{0,970}} \right)$ <p>Зелена рослинність зазвичай має значення від 0,8 до 1,2. Збільшення вмісту води у рослинах призводить до збільшення поглинання в зоні близько 970 нм відносно поглинання в зоні близько 900 нм. Даний індекс застосовується для аналізу водного стресу, визначення продуктивності, аналізу пожежонебезпеки, управління зрошуваними землями тощо.</p>	Penuelas J.I. та ін., 1995; Champagne C. та ін., 2001

Нормалізований різницевий водний індекс (Normalized Difference Water Index, NDWI)	$NDWI = \left(\frac{\rho_{0,857} - \rho_{1,241}}{\rho_{0,857} + \rho_{1,241}} \right)$ <p>Індекс може приймати значення від -1 до 1. Для зеленої рослинності зазвичай приймає значення від -0,1 до 0,4</p>	Gao B.C., 1995
Індекс стресу вологості (Moisture Stress Index, MSI)	$MSI = \left(\frac{\rho_{1,599}}{\rho_{1,819}} \right); \quad MSI = \frac{TM_5}{TM_4}$ <p>Індекс може приймати значення від 0 до > 3. Для зеленої рослинності зазвичай приймає значення від 0,04 до 2. Вміст води в листві призводить до збільшення поглинання в зоні близько 1599 нм. Поглинання в зоні 819 нм майже не змінюється, в залежності від вмісту води</p>	Rock та ін., 1986; Hunt Jr. та ін., 1989; Ceccato P. та ін., 2001
Нормалізований різницевий інфрачервоний індекс (Normalized Difference Infrared Index, NDII)	$NDWI = \left(\frac{\rho_{0,819} - \rho_{1,649}}{\rho_{0,819} + \rho_{1,649}} \right)$ <p>Індекс може приймати значення від -1 до 1. Для зеленої рослинності зазвичай приймає значення від 0,02 до 0,6</p>	Hardisky M.A. та ін., 1983; Jackson T.L. та ін., 2004

Таблиця 2. Комбінації каналів камер супутників, що використовуються для розрахунку NDVI [9]

MSS Landsat(4,5)	5 (0,6–0,7 мкм), 6 (0,7–0,8 мкм) или 7 (0,8–1,1 мкм)
TM Landsat(4,5)	3 (0,63–0,69 мкм), 4 (0,76–0,90 мкм)
ETM+ Landsat7	3 (0,63–0,69 мкм), 4 (0,75–0,90 мкм)
AVHRR NOAA	1 (0,58–0,68 мкм), 2 (0,72–1,0 мкм)
MODIS Terra(Aqua)	1 (0,62–0,67 мкм), 2 (0,841–0,876 мкм)
ASTER Terra	2 (0,63–0,69 мкм), 3 (0,76–0,86 мкм)
LISS IRS(1C/1D)	2 (0,62–0,68 мкм), 3 (0,77–0,86 мкм)

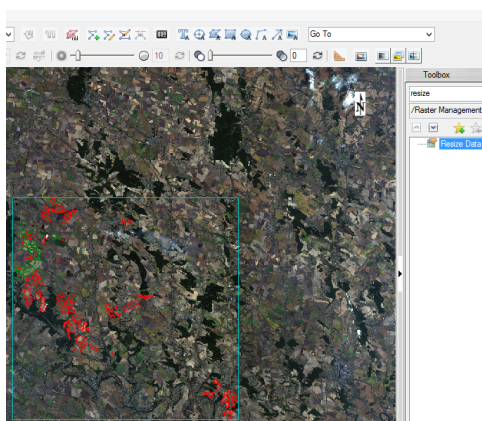


Рис. 2. Отримання знімку досліджуваної території з координатами полів

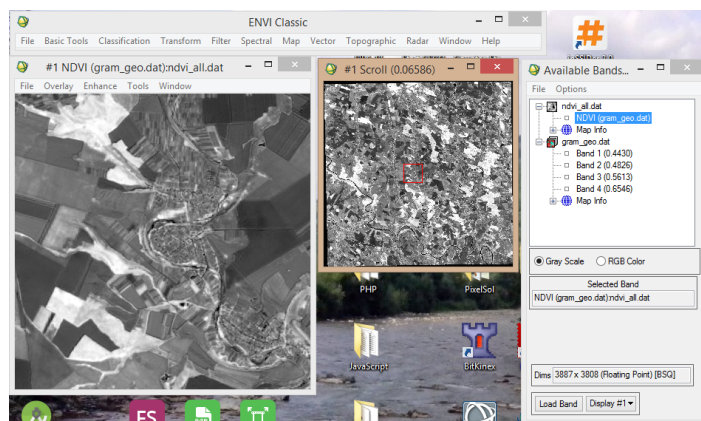


Рис. 3. Розрахунок NDVI для досліджуваної території



Рис. 4. Відображення стану полів за допомогою створених растрів NDVI

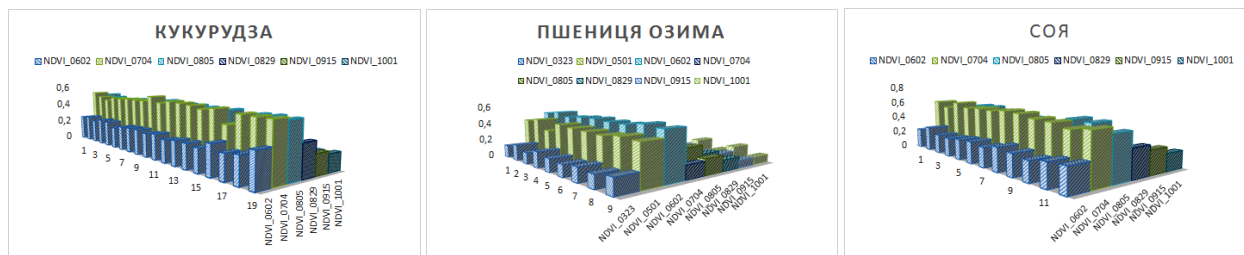


Рис. 5. Приклад розрахунку індексів NDVI для деяких сільськогосподарських культур

чином, у видимому діапазоні ділянки з високою вегетативною масою рослин мають темний вигляд, а з низькою — дуже світлий. В БІЧ-діапазоні зелені ліси і поля виглядають набагато світліше. Порівнюючи зображення в різних діапазонах, можна відносно точно визначити вегетативні характеристики рослинності. Отже, для моніторингу зеленої біомаси, що містить хлорофіл, придатні спектросональні супутникові зображення, що містять БІЧ і видимі діапазони. Слід відзначити, що такі властивості дають можливість отримувати дані як з великих територій, так і з конкретного поля.

На сьогодні існує близько 160 варіантів індексів. Вони підбираються експериментально (емпіричним шляхом), виходячи з відомих особливостей кривих спектральної відбивної здатності рослинності і ґрунтів. Найвідомішим з них є BI NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який вперше був описаний в 1973 р. (Rouse BJ, 1973). NDVI визначається за формулою [4]:

$$NDVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right),$$

де ρ_{NIR} — відображення в ближній інфрачервоній зоні спектра, ρ_{RED} — відображення в червоній зоні спектра.

Згідно з цією формулою щільність рослинності (NDVI) в заданій точці зображення дорівнює різниці інтенсивностей відбитого світла в червоному і інфрачервоному діапазоні, поділений на суму їх інтенсивностей. Індекс може приймати значення від -1 до 1. Для рослинності NDVI приймає позитивні від 0,2 до 0,8. Розрахунок NDVI базується на двох найбільш стабільних (незалежних від інших чинників) ділянках спектральної кривої відбиття рослин. У червоній зоні спектра (0,6–0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих судинних рослин, а в інфрачервоній зоні (0,7–1,0 мкм) перебуває зона максимального відображення клітинних структур листя. Тобто висока фотосинтетична активність (пов'язана, як правило, з густою рослинністю) веде до меншого відображення в червоній зоні спектра і більшого в інфрачервоній. Співставлення цих показників дозволяє чітко відокремлювати й аналізувати рослинні від інших природних об'єктів. Використання нормалізованої різниці між мінімумом і максимумом відбиття збільшує точність вимірювання, дозволяє зменшити вплив таких явищ, як відмінності в освітленості знімка, хмарності, димки, поглинання радіації атмосферою тощо [8].

NDVI може бути розрахований на основі будь-яких знімків високого, середнього або низького розрізнення, які мають спектральні канали в червоному (0,55–0,75 мкм) і інфрачервоному діапазоні (0,75–1,0 мкм). Алгоритм розрахунку NDVI вбудований практично в усі поширені пакети програмного забезпечення, пов'язані з обробкою даних дистанційного зондування (Arc View Image Analysis, ERDAS Imagine, ENVI, ErMapper, Scanex MODIS Processor, ScanView та ін.) [4].

Комбінації каналів камер деяких супутників, що використовуються для розрахунку NDVI представлені в табл. 2.

В даній роботі для оцінки ефективності алгоритму оцінки врожайності був використаний супутник Landsat 8, який був запущений на орбіту 11 лютого 2013 р. спільними зусиллями NASA і USGS. Перші знімки з супутника були отримані 18 березня 2013 р. [5]. Дані цього супутника є найбільш достовірними з поміж інших, а також він має необхідні канали для підрахунку індексу. Також знімки цього супутника були вибрані через те, що їх можна знайти у вільному доступі [10].

Завантаження знімку Landsat в програму ENVI для досліджуваної території представлено на рис. 2. Далі видаляються всі зайві канали, крім мультиспектрального і панхроматичного, знімок обрізається по кордонах полів (крайніх точках шейп-файлу). Для покращення відображення знімку в мультиспектральному спектрі виконується процедура Gram-Schmidt Pan Sharpening і за необхідності змінюється система координат на географічну. Отримане RGB зображення завантажується і зберігається, потім розраховується індекс NDVI для всього зображення. У подальшому з зображення виділяють (вирізають) поля, що цікавлять дослідника (замовника) і зберігають їх (рис. 3).

Для подання зображень в більш інформативних кольорах растри NDVI завантажуються в ArcGIS, розраховується їх статистика, розфарбовуються в потрібний палітрі і задається необхідна кількість класів, зберігаються отримані файли (рис. 4). Результати розрахунку індексів NDVI представлені на рис. 5.

За результатами досліджень записуються коментарі про стан полів. Іноді за допомогою цих даних можна розділити поля на кілька культур і уточнити їх кордони, після чого можна підрахувати точні площі полів.

5. ВИСНОВКИ

Одним з важливих методичних питань дистанційного зондування є точність ідентифікації досліджуваних посівів на супутниковому зображенні і збіжності результатів відновлення спектральних відбивних характеристик об'єктів знімання з даними підсупутникових вимірів. Його вирішення дозволить оцінити можливості використання розроблених раніше методик аерофотометричних обстежень стану посівів основних с.-г. культур в Україні для визначення оцінки їх стану і прогнозу урожайності за даними багатоспектрального супутникового знімання.

Запропонований алгоритм розрахунку індексів NDVI можна використовувати для оцінки стану с.-г. культур і прогнозу їх урожайності. Стан можна відслідкувати в інтервалі від 4 до 7 днів (середня поява нового знімку). Випробування алгоритму проводилось в реальних дослідженнях і засвідчило працездатність і високу точність алгоритму.

1. *Зацерковний В.І., Кривоберець С.В.* Обґрунтування вибору знімальної системи для моніторингу агроресурсів // Вісник Тернопільського національного технічного університету. — Тернопіль: ТНТУ, 2011. — Том 16, № 2. — С.139–149.
2. *Козодеров В.В., Кондранин Т.В.* Методы оценки почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. Учебное пособие. — М.: МФТИ, 2008. — 222 с.
3. *Bartalev S., Belward A., Erchov D., et al.* A new Spot4-Vegetation derived land cover map of Northern Eurasia // Int. J. Remote Sens. — 2003. — **24**. — P.1977–1982.
4. *Кохан С.С.* Аерокосмічні дослідження стану посівів сільськогосподарських культур. — Корсунь-Шевченківський: ФОП Майдаченко І.С., 2011. — 312 с.
5. *Зацерковний В.І., Гур'єв В.І., Кривоберець С.В.* Обґрунтування технологій дистанційного зондування для агро-екологічного моніторингу земельних ресурсів // Науковий вісник ЧДІЕУ. Серія 1, Економіка: збірник наукових праць. — Чернігів: ЧДІЕУ, 2012. — № 2 (14). — С.65–77.
6. *Колотий А.В.* Выбор информационных признаков для построения прогнозов урожайности озимой пшеницы для территории Украины // Наукові праці ДонНТУ Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». — 2013. — Випуск 2(18). — С.99–105.
7. *Кривоберець С.В.* Аналіз методів і знімальних систем ведення агроекологічного моніторингу // Вісник ЧДТУ. Збірник. Серія «Технічні науки». — Чернігів: ЧДТУ, 2012. — 42 (57). — С.166–175.
8. *Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. — М: Проспект, 2009. — № 3. — С.28–32.
9. *Кривоберець С.В., Позній В.В.* Розширення можливостей використання даних дистанційного зондування в інтеграції геоінформаційних технологій і технологій оброблення космічних знімків для вирішення прикладних завдань // «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування — Європейський досвід». Збірник наукових праць. X міжнародна науково-практична конференція. 6–7 травня 2014 р.) [Електронний ресурс] Офіційний сайт Інженерно-будівельного факультету Чернігівського національного технологічного університету [сайт]. — Чернігів: Інженерно-будівельний ф-т ЧНТУ, 2014. — випуск 10. — С.116–124. — Режим доступу: <http://ibf.cn.ua/media/konferentsiya/zbirnyk-naukovyh-prats/2014-2/078-087.pdf> (10.12.15).
10. Сайт Геологічної служби США [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://glavis.usgs.gov> (10.12.15).

Надійшла до редакції 8.09.2015

Прийнята до друку 7.10.2015