



Агроекологія, радіологія, меліорація

УДК 631.4 : 631.47 : 631.459КП

© 2015

О.Г. Тараріко,
академік НААН,
доктор
сільсько-
господарських
наук

Т.В. Ільєнко,
кандидат
сільсько-
господарських
наук

*Інститут
агроекології
і природокористування
НААН*

МОНІТОРИНГ СТАНУ ВОЛОГОЗАБЕЗПЕЧЕНОСТІ ПОСІВІВ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Мета. Визначити зв'язок між спектральними характеристиками сільськогосподарських культур та вологозабезпеченістю їх посівів. Розробити систему моніторингу стану вологозабезпеченості посівів сільськогосподарських культур на різних адміністративних рівнях в різних природно-ландшафтних умовах за даними космічного знімання. **Методи.** Розроблено методику визначення забезпеченості посівів вологою за даними дистанційного зондування Землі, яка базується на комплексному використанні супутникових даних різного просторового розрізнення і завіркових наземних даних. **Результати.** За індексами умов росту рослинності, отриманими за даними космічного знімання низького просторового розрізнення NOAA, проведено аналіз стану рослинності відповідно до природно-кліматичних зон і виявлено області з незадовільним вологозабезпеченням посівів. Запропоновано визначати вміст вологи в рослинах на локальному рівні за просторовим розподілом вегетаційних індексів у межах однорідних районів та відповідними математико-статистичними моделями. **Висновки.** Система дистанційного моніторингу вологозабезпеченості посівів сільськогосподарських культур забезпечує оперативність і якість ідентифікації кризових посушливих явищ в агроєкосистемах та водних стресів у посівах сільськогосподарських культур, а також ухвалення управлінських рішень з коригування агротехнологій на різних рівнях управління агроєкосистемами для запобігання розвитку посушливих явищ і для адаптації систем землекористування до змін клімату.

Ключові слова: волога, посіви, супутникові дані, вегетаційні індекси, дистанційне зондування.

Україна має надзвичайно сприятливі природні умови для розвитку сільського господарства: помірний клімат, родючі ґрунти, великі площі орних земель. Водночас в окремі

роки Україні притаманні посухи, які негативно впливають на агровиробництво.

За останні 120 років в Україні зафіксовано понад 70 посух. За роки незалежності

Україні сталося 11 посух: 1992, 1994, 1996, 1999, 2000, 2002, 2003, 2005, 2007, 2009, 2010. Надзвичайно сильна і жорстка посуха спостерігалась у весняно-літній період 2007 року. В зону її поширення потрапили близько дві третини території країни, понад третина посівів, що завдало агросектору мільярдних збитків [8]. Крім того, на півдні України у 2007 р. на площі до 5 млн га спостерігалася катастрофічна пилова буря.

Останніми десятиліттями темпи наростання температури в Україні істотно випереджають середні планетарні показники, що призводить до підвищення ризиків виникнення посух [6]. Для пом'якшення наслідків посухи потрібні її своєчасне виявлення та моніторинг стану вологозабезпеченості посівів сільськогосподарських культур. У традиційних методах визначення вологозабезпеченості посівів використовуються дані наземних метеорологічних досліджень (кількість опадів, температура поверхні ґрунту і повітря, вологість ґрунту і повітря). Однією з основних проблем традиційних методів є дискретність мережі агрометеорологічних станцій і постів, що звужує можливість оперативного отримувати інформацію у просторі й часі.

Для вирішення цього завдання на різних адміністративних рівнях доцільно використовувати не тільки традиційні наземні методи, а й спостереження з космосу. Розвиток сучасних супутникових систем дистанційного зондування, застосування програмних комплексів для обробки цифрових зображень та геоінформаційних систем (ГІС) з метою аналізу даних та їх інтерпретації сприяють отриманню значно оперативнішої і достовірнішої інформації щодо стану посівів сільськогосподарських культур, зокрема умов зволоження. Нині існує достатня кількість супутників з апаратурою, які можуть бути використані для об'єктивної оцінки стану сільськогосподарських угідь як на рівні країни або області, так і на рівні окремих господарств або навіть окремих полів. Тому доцільно вдосконалити традиційну систему моніторингу вологозабезпеченості агроландшафтів і посівів з метою оперативного інформаційного забезпечення управлінських структур та суб'єктів господарювання різних рівнів. Отже, в умовах змін клімату актуальними є розробка і впровадження технологій дистанційного зондування Землі з космосу (ДЗЗ), які завдяки високому рівню оглядовості, оперативності та об'єктивності є найефективнішим джерелом геопросторової

інформації, що істотно доповнює інформацію з традиційних наземних джерел, наприклад, щодо стану вологозабезпеченості посівів в окремі фази розвитку рослин, що, у свою чергу, дає можливість своєчасно коригувати технологічні процеси і виконувати віддалені прогностичні оцінки щодо продуктивності посівів та визначення критичних регіонів.

У розв'язання проблем оцінювання стану рослинних покривів (зокрема їх вологозабезпеченості) дистанційними методами значний внесок зробили Б.В. Виноградов, В.Я. Кондратьєв, П.П. Федченко, С.М. Кочубей, Т.М. Шадчина, О.А. Войнов. Серед закордонних учених варто відзначити R. Jackson, B. Gao, F. Kogan. Більшість досліджень проводились у межах окремих територій з використанням певних систем ДЗЗ.

Мета досліджень — розробка системи моніторингу стану вологозабезпеченості посівів сільськогосподарських культур на різних адміністративних рівнях через комплексне використання супутникових даних різного просторового розрізнення у різних природно-ландшафтних умовах.

Матеріали і методи досліджень. Аналіз вологозабезпеченості посівів сільськогосподарських культур на основі супутникової інформації базується на зв'язку стану рослинності з її спектральними характеристиками. За супутниковими даними дистанційного зондування в різних спектральних діапазонах визначаються різноманітні вегетаційні індекси, що характеризують стан рослинності. Найбільш уживаним є нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI), який визначається як

$$NDVI = (R_{B1c} - R_c) / (R_{B1c} + R_c),$$

де R_{B1c} та R_c — відбиття відповідно у ближньому інфрачервоному (780–900 нм) та червоному (630–685 нм) діапазонах. Для зеленої рослинності значення цього індексу зазвичай змінюється від 0,2 до 0,8 прямо пропорційно збільшенню зеленої фітомаси [13], що характеризує стан вологозабезпеченості посівів. Уміст вологи в зеленій масі рослин характеризує водний індекс NDWI, який доцільно використовувати як показник вологозабезпечення. Він є відношенням різниці значень коефіцієнтів відбиття між ближнім інфрачервоним і середньоінфрачервоним каналами до їх суми $(R_{B1c} - R_{C1c}) / (R_{B1c} + R_{C1c})$ [9].

Оскільки зниження вмісту хлорофілу в біомасі є результатом недостатнього вологозабезпечення, для його непрямой оцінки також

використовується спектральний діапазон 690–730 нм — «червоного краю» (red edge), який більш чутливий до стану рослинності, ніж ближній інфрачервоний, та розроблений за ним вегетаційний індекс NDVIRE, аналог індексу NDVI:

$$NDVIRE = (R_{чк} - R_c) / (R_{чк} + R_c),$$

де R_c — коефіцієнт відбиття в червоному каналі (630 ÷ 685 нм), $R_{чк}$ — коефіцієнт відбиття в каналі «червоного краю» (705 ÷ 745 нм). Використання цього індексу пов'язано з технічними характеристиками апаратури деяких сучасних супутників, зокрема RapidEye (просторове розрізнення 5 м).

Крім того, для зменшення впливу погодних умов, географічних, екосистемних змін, ґрунтових, рослинних, топографічних умов за визначення стану рослинності доцільно використовувати тривалі серії індексу NDVI і супутникових денних даних температури рослинного покриву, отриманих у тепловому діапазоні. За цими даними розраховується індекс вегетаційних (VCI) і температурних (TCI) умов, а також їх інтегральний показник — вегетаційний індекс стану рослинності (VHI) [11]. Цей індекс характеризує стан рослинності за поєднанням оцінки умов зволоженості і теплових ресурсів і використовується для оцінки прогнозу врожаю. Значення VHI нижче 40 свідчать про різний рівень стресу рослинності та очікувані втрати врожаю; вище 60 — про сприятливі умови для доброго врожаю. Отже, індекс VHI доцільно використовувати для просторового визначення стану рослинності, зокрема прогнозування врожаю та валових зборів як залежно від кліматичних умов, так й агротехнічних факторів.

Методика базується на використанні даних супутникових спостережень низького просторового розрізнення — радіометр AVHRR (супутник NOAA, просторове розрізнення 4000 м); середнього просторового розрізнення — радіометр MODIS (супутники Terra і Aqua, просторове розрізнення — 250 м, 500 м), Landsat (30 м) та високого просторового розрізнення (супутники CI4-2, 8 м і RapidEye, 5 м) [2]. Схема процедури визначення вологозабезпеченості посівів передбачає такі етапи (рис. 1):

1. *Підготовчий* — отримання необхідної картографічної та супутникової інформації, яка проходить попередню обробку (складання мозаїки, нормалізація і трансформування отриманих даних на цифрову картографічну основу).

2. *Виявлення території (області) з недостатнім вологозабезпеченням на рівні країни*, що передбачає отримання за даними космічного знімання низького просторового розрізнення багатозонального радіометра AVHRR супутника NOAA вегетаційних індексів умов росту (VCI) і стану (VHI) рослинності та температурних умов (TCI). Результатом є карта територій та стану посівів, наприклад, під впливом дефіциту вологи.

3. *Деталізація на регіональному рівні території, яка перебуває під негативним впливом посушливих умов у межах обраної на першому етапі області*. Для цього за отриманими мультиспектральними знімками середнього просторового розрізнення (MODIS/Terra або Aqua) та розрахованим вегетаційним індексом NDVI відповідно до [7] проводиться класифікація елементів агроландшафтів — водна поверхня, ґрунт, поселення, посіви сільськогосподарських культур. Подальша класифікація посівів сільськогосподарських культур за їх вологозабезпеченням визначається за розрахованим за даними MODIS водним індексом NDWI (значення індексу прямо пропорційне вмісту вологи, зокрема від'ємні значення відповідають сухій рослинності) [9]. Результатом цих операцій є карта посівів, класифікованих за ступенем вологозабезпеченості.

4. *Визначення на локальному рівні стану вологозабезпеченості посівів*, що передбачає використання даних високого просторового розрізнення. Залежно від доступу до цих даних можливе використання матеріалів космічного знімання супутників LANDSAT, RapidEye та ін. За цими даними уточнюється розміщення ділянок агрофітоценозів, які мають недостатнє вологозабезпечення на рівні господарства або навіть поля: зокрема для даних супутників серії LANDSAT, вітчизняного супутника CI4-2 — за водним індексом NDWI; для даних супутників RapidEye — за вузькосмуговим індексом NDVIRE. Стан вологозабезпеченості на обраних ділянках уточнюється за побудованими з використанням наземних експериментальних даних моделями вмісту вологи в рослинах сільськогосподарських культур.

За отриманими на кожному рівні результатами досліджень надаються відповідна інформація та рекомендації з управління агроресурсним потенціалом, а також прогнозно оцінки розвитку ситуації.

Результати і обговорення. Для визначення стану посівів на рівні країни за даними

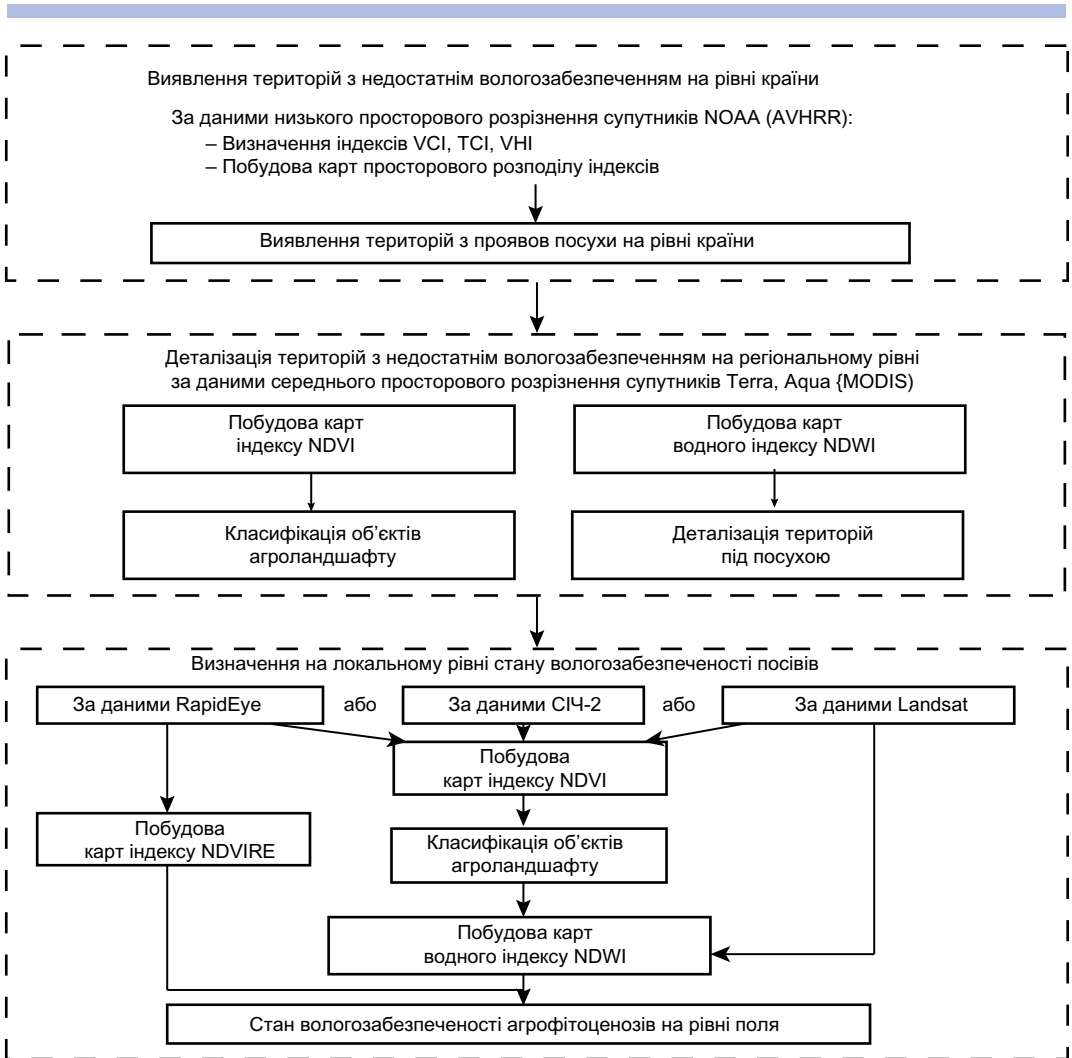


Рис. 1. Технологічна схема інтегрованого використання даних ДЗЗ різного просторового розрізнення для моніторингу вологозабезпеченості посівів

радіометра MODIS супутника Terra було визначено індекс NDVI, отримано графіки динаміки вище наведеного індексу за 2015 р. і низку минулих років. Їх аналіз показав, що стан рослинності загалом по Україні перебуває на рівні, що вищий за середньобагаторічний і майже всі попередні роки (2011–2014) (рисунок на обкладинці).

Для докладнішого аналізу стану рослинності відповідно до природно-кліматичних зон і виявлення областей з незадовільним станом посівів було розглянуто просторовий розподіл наведеного вище індексу стану рослинності VHI, отриманого за даними

космічного знімання супутника NOAA. Аналіз усереднених даних по областях показав, що рослинність на території більшості областей на 15 липня 2015 р. була в оптимальному стані, за винятком Житомирської та Київської областей, де незадовільний стан рослинності спостерігався відповідно більше ніж на 40 і 30% території (рисунок на обкладинці, б). У 2014 р. на цей період незадовільний стан рослинності спостерігався на території Криму (близько 40%) і Херсонської обл. (30%), тобто на території посушливого Степу (рисунок на обкладинці, в).

Проведений аналіз динаміки індексу VHI за

вегетаційний період 2011–2015 рр. показав, що цього року спостерігається збільшення площ під рослинами у незадовільному стані, що, у свою чергу, відповідає погіршенню умов вологозабезпеченості у Київській і Житомирській областях. Водночас на території Львівської, Полтавської, Одеської і Херсонської областей спостерігається поліпшення умов вологозабезпеченості впродовж розглянутого періоду порівняно з 2014 р., наслідком чого є зниження площ посівів у незадовільному стані до 3–5%. Ця тенденція відповідає динаміці індексу NDVI, отриманого по областях. Зокрема, стан посівів у Житомирській області є гіршим порівняно з 2011–2014 рр. — значення NDVI найнижче (рисунок на обкладинці, *г*), а в Херсонській області — стан кращий: значення NDVI є вищим, ніж за попередні роки (рисунок на обкладинці, *д*). Отже, спостерігається нетрадиційна ситуація, коли стан посівів в середині вегетаційного періоду в зоні Степу є значно кращим, ніж у Київській і Житомирській областях.

На регіональному і локальному етапах моніторинг вологозабезпеченості посівів сільськогосподарських культур виконувався за експериментальними наземними і супутниковими даними 2013 р. на прикладі території Київської області. Для моніторингу динаміки вологовмісту зеленої маси рослин було використано мультиспектральні дані 2 та 6 каналів радіометра MODIS супутника Terra за 9 травня, 2 червня 2013 р., отримані із сайту Геологічної служби США (www.mrtweb.cr.usgs.gov), за якими було визначено водний індекс NDWI. У період з 9 травня по 2 червня 2013 р. спостерігалось зростання водного індексу, що свідчило про збільшення вологи в рослинах внаслідок значних опадів протягом 13 травня — 2 червня 2013 р. У межах адміністративного району за наявності маски посівів (цифрове картографічне подання території посівів) можна проводити експертну оцінку вологозапасів на локальному рівні, екстраполюючи оперативні дані метеоспостережень. Зокрема, майже на всій території Миронівського р-ну за період спостережень з 19 травня по 4 червня 2013 р. виявлено інтенсивне зростання NDWI, що свідчило про збільшення вологи в рослинах завдяки значним опадам наприкінці травня — на початку червня. Значно більші можливості для аналізу вологовмісту в рослинах надають матеріали знімань систем високого просторового розрізнення. Так, за даними MODIS, за

просторового розрізнення в 500 м отримуємо розподілення осереднених значень нормалізованого водного індексу NDWI в межах району і тестового експериментального аграрного полігона. За даними ШСЗ Січ-2, Landsat (просторове розрізнення 8 і 30 м), отримуємо розподілення значень нормалізованого водного індексу NDWI.

Як зазначалося, вадами традиційних методів визначення вмісту вологи агрофітоценозів є дискретність вимірювань у просторі та часі. Тому перспективними є кількісні методи моніторингу вологозабезпеченості рослинності за даними супутникового знімання, зокрема застосування спектральних індексів, які корелюють з водним режимом рослин, для визначення їх вологозабезпеченості в різні фенологічні фази. Проведеними дослідженнями було обґрунтовано використання наведених вище вегетаційних індексів як показника вмісту вологи в рослинах, для чого вони були визначені за матеріалами космічного знімання різного просторового розрізнення, зокрема, MODIS/(Terra, Aqua), Landsat 8, RapidEye та «СІЧ-2» відповідно до дат експериментальних наземних спостережень, а також отримано їх зональну статистику в точках спостережень. Ці дані разом показали високу кореляцію з даними вмісту гіроскопічної вологи в рослинах пшениці озимої, отриманими за наземними обстеженнями.

Для кількісної оцінки вмісту вологи в рослинах в межах окремого поля було розроблено методику його моделювання за супутниковими даними.

За мережею тестових експериментальних аграрних полігонів була отримана наземними спостереженнями опорна та калібрувальна тематична інформація щодо стану посівів і вмісту вологи в рослинах. Моделювання вмісту вологи в рослинах пшениці озимої проводилося з використанням наведених вище індексів, розрахованих за матеріалами супутникового знімання MODIS/(Terra, Aqua), Landsat 8, RapidEye та «СІЧ-2» на відповідну дату, та побудовою рівняння множинної регресії. Як залежну змінну використовували значення вмісту вологи в рослинах, а як незалежні змінні використовували наведені вище індекси, зокрема для RapidEye (11 квітня 2009 р.) та «СІЧ-2» (5 травня 2012 р.). Відповідно отримано логарифмічну залежність між вмістом вологи та індексом NDVIRE:

$$V=0,1233 \times \ln(\text{NDVIRE} + 0,8792),$$

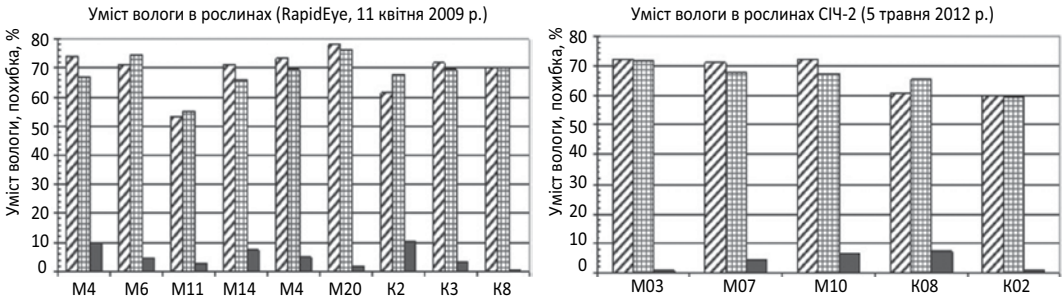


Рис. 2. Експериментальний і змодельований вміст вологи в рослинах пшениці озимої: ▨ — експериментальний, ▩ — змодельований, ■ — похибка

а також поліноміальну для індексу NDWI:

$$V = 0,6942 - 0,2986 \times NDWI + 2,009 \times NDWI^2 - 6,7197 \times NDWI^3.$$

Для валідації моделей з еталонних даних перед початком моделювання доцільно було обрано точки наземних експериментальних досліджень, які не враховувалися за розрахунку коефіцієнтів рівнянь множинної регресії. Результати валідації моделей множинної регресії вмісту вологи подано на рис. 2. Аналогічні результати були отримані для супутникових даних MODIS/(Terra, Aqua), Landsat 8.

У результаті за цими регресійними моделями було побудовано карти просторового

розподілу вмісту вологи для полів пшениці озимої Миронівського р-ну, за якими вміст вологи змінюється у межах 60–75%, що свідчить про задовільну вологозабезпеченість посівів.

Отже, в системі моніторингу стану вологозабезпеченості посівів доцільно використовувати супутникові дані різного просторового розрізнення для визначення просторового розподілу вмісту вологи в рослинах як на рівні поля або господарства, так і на рівні адміністративного району, що дає змогу значно скоротити наземні обстеження посівів для визначення їх стану та прогнозування продуктивності.

Висновки

За супутниковою інформацією, у 2015 р. можна очікувати істотного зниження урожайності зернових колосових культур на території Житомирської і Київської областей. В інших регіонах, зокрема в зоні Степу та Лівобережного Лісостепу, в 2015 р. прогнозується урожайність зернових колосових на рівні 2014 р. або навіть вище (наприклад Одеська, Херсонська та Полтавська обл.).

Щодо пізніх культур, зокрема кукурудзи, соняшнику та сої, то за дотримання технологій їх вирощування у всіх ґрунтово-кліматичних умовах можна очікувати у 2015 р. урожайність, не нижчу 2014 р.

Розроблена методика моніторингу вологозабезпеченості посівів сільськогосподарських культур з використанням ДЗЗ і ГІС-технологій забезпечує оперативне отримання інформації та ухвалення управлінських рішень з коригування агротехнологій на різних рівнях управління АПК.

На рівні країни центральним державним

органам управління пропонується використовувати супутниковий моніторинг агроландшафтів і посівів сільськогосподарських культур як складову державної системи моніторингу та прогнозування виникнення кризових явищ. З цією метою для суцільного спостереження всієї території країни необхідно використовувати матеріали супутникового знімання низької роздільної здатності і побудовані за ними карти вегетаційних індексів умов росту рослинності. Для забезпечення оперативності і своєчасності моніторингу посушливих явищ доцільно використовувати поєднання знімальних систем низького та середнього розрізнення, розміщених на супутниках NOAA та TERRA, а також таких систем високого розрізнення, як RapidEye, зокрема для уточнення й коригування агротехнологій у межах певних територій з недостатнім вологозабезпеченням на регіональному (район) або локальному (господарство, поле) рівнях.

Бібліографія

1. *Гридасов В.Ф.* Оценка влагообеспеченности сельскохозяйственных культур с помощью агрогидрологических свойств почв/В.Ф. Гридасов//Труды ВНИИСХМ. — Вып. 33. — СПб.: Гидрометеоздат, 2000. — С. 178–184.
2. *Ільєнко Т.В.* Комплексування даних космічного знімання при моніторингу посушливих явищ в агроландшафтах/Т.В. Ільєнко, О.Г. Тараріко//Третя Всеукраїнська конференція «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (ГЕО-UA 2012) (Євпаторія, АР Крим, 3–7 вересня 2012 р.): Матеріали доповідей. — К.: Кафедра, 2012. — С. 49.
3. *Ільєнко Т.В.* Моделювання вмісту вологи в рослинах пшениці озимої за супутниковими даними/Т.В. Ільєнко//Вісн. аграр. науки. — 2013. — № 11. — С. 63–65.
4. *Космічний моніторинг посушливих явищ*/О.Г. Тараріко, О.В. Сиротенко, Т.В. Ільєнко, В.А. Величко//Вісн. аграр. науки. — 2012. — № 10. — С. 16–19.
5. *Круківська А.В.* Агрокліматична оцінка умов вологозабезпечення основних зернових культур в Україні/А.В. Круківська//Укр. гідрометеорологічний журн. — 2008. — № 3. — С. 109–116.
6. *МГЭИК, 2007: Изменение климата, 2007: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II, III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата*/Р.К. Пачаури, А. Райзингер и основная группа авторов//МГЭИК, Женева, Швейцария, 104 с.
7. *Методичні рекомендації з агроекологічної оцінки агроландшафтів і систем землекористування з використанням традиційних наземних і дистанційних методів спостережень*/О.Г. Тараріко, О.В. Сиротенко, О.А. Демидов та ін. — К., 2010. — 60 с.
8. *Савчук Д.П.* Посухи та посухозахисні заходи в Україні/Д.П. Савчук//Вісн. аграр. науки. — 2009. — № 9. — С. 64–67.
9. *Gao B.* NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space/B. Gao//Remote Sensing of Environment. — 1996. — 58. — P. 257–266.
10. *Jayaraman V.* The invariance of red-edge inflection wavelengths derived from groundbased spectroradiometer and space-borne IRS-P3: MOS-B data/V. Jayaraman, S. Srivastava//Int. J. Remote Sens. — 2002. — 23. — P. 2741–2765.
11. *Kogan F.N.* Operational space technology for global vegetation assessment/F.N. Kogan//Bull. Amer. Meteor. Soc. — 2001. — 82(9). — P. 1949–1964.
12. *Lui W.T.* Monitoring regional drought using the vegetation condition index/W.T. Lui, F.N. Kogan//International Journal of Remote Sensing. — 1996. — № 17. — P. 2761–2782.
13. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation/C.J. Tucker//Remote Sensing of Environment. — 1979. — 8. — P.127–150.

Надійшла 27.07.2015.