

ПРИРОДНИЧО-ГЕОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 528:504:551.583

DOI: <https://doi.org/10/15407/ugz2020.01.016>

О.А. Апостолов¹, Л.О. Єлістратова¹, І.Ф. Романчук¹, В.М. Чехній²

¹ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі» ІГН НАН України, Київ

²Інститут географії НАН України, Київ

ВИЯВЛЕННЯ ОСЕРЕДКІВ ОПУСТЕЛЮВАННЯ В УКРАЇНІ НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКІВ ВОДНИХ ІНДЕКСІВ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Мета цієї публікації – обґрунтування методичних підходів до визначення вологозабезпеченості території за даними ДЗЗ на основі розрахунків водних індексів (індексів вологості) для виявлення процесів опустелювання за умов сучасного глобального та регіонального потепління. Здійснено відбір оптимальних водних індексів для відображення процесів опустелювання. Обґрунтовано поєднане використання даних супутників Landsat та TERRA/MODIS для ефективного дослідження розвитку процесів опустелювання на різних просторових рівнях. На прикладі трьох модельних років (2007, 2015 та 2016 – дуже посушливого, посушливого та типового) розкрито просторові особливості прояву посухи як потужного чинника опустелювання. Зокрема, для 2007 та 2015 років адміністративні області України проранжовано за рівнем вологозабезпеченості за значеннями індексу NDII (normalized difference infrared index) – від територій надмірної зволоженості до територій катастрофічної посушливості. Розраховано втрати у грошомі вимірі для сільськогосподарського виробництва від прояву посухи у межах окремих адміністративних областей, які зазнали впливу цього явища. Новизна дослідження полягає в обґрунтуванні найефективніших для виявлення процесів опустелювання водних індексів, їх розрахунку за допомогою даних ДЗЗ та у подальшому застосуванні цих індексів для території України.

Ключові слова: опустелювання, індекси вологості, вологозабезпеченість, дані дистанційного зондування Землі.

O. A. Apostolov¹, L. O. Elistratova¹, I. F. Romanchuk¹, V. M. Chekhniy²

¹ State Institution «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth» of the Institute of Geological Science of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv

² Institute of Geography of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv

ASSESSMENT OF DESERTIFICATION AREAS IN UKRAINE BY ESTIMATION OF WATER INDEXES USING REMOTE SENSING DATA

The purpose of the research is to substantiate the methodological approaches estimating the moisture content according to the remote sensing data. Water indexes were calculated to identify desertification provided by modern global and regional climate change. The optimal water indexes were selected for desertification in Ukraine. The combined use of Landsat and Terra/MODIS satellites is an effective way to analyze desertification at different spatial levels. Three years (2007, 2015, 2016 corresponding to arid, arid and typical conditions) reveal the spatial features of the drought as a desertification factor. For 2007 and 2015 years, the administrative regions of Ukraine were ranked by humidity level based on Normalized Difference Infrared Index (NDII) from strong moistened to extremely dry territories. Within the administrative regions affected by drought the monetary losses were estimated for agricultural production. The article is focused on reasoning of the most effective water index based on remote sensing data identifying the areas of desertification of Ukraine. Using the proposed methodological approaches, the regional features of increasing drought in Ukraine were studied as a factor of desertification. The territories of Ukraine were ranked on the basis of soil moisture content during vegetation season. The squares of dry regions of Ukraine were estimated for years with different climate conditions.

Keywords: desertification; water indexes; moisture; remote sensing data.

© О.А. Апостолов, Л.О. Єлістратова, І.Ф. Романчук, В.М. Чехній, 2020

Актуальність теми дослідження

Проблема розвитку процесів опустелювання визнана однією з головних з-поміж інших проблем екологічного змісту, що мають глобальний вимір [1-2]. Це визнано як у документах міжнародного значення [1-3 та ін.], так і у дослідженнях багатьох учених. Ці процеси характеризуються значною мінливістю у часі та просторі. Для забезпечення належного контролю, прогнозування та своєчасного запобігання проявам опустелювання необхідна система регулярних спостережень – моніторинг. Протягом останніх десятиріч, в умовах посилення антропогенного впливу на навколишнє середовище, поряд з традиційними методами наземних спостережень за станом компонентів природного середовища зростає роль космічного моніторингу.

Перевагами такого моніторингу, що базується на використанні супутникових даних є просторова та часова всеохопленість – можливість отримання даних для різних рівнів просторової розмірності – від локального до глобального та на заданий період часу.

Визначену на підставі зазначених показників загальну площу посушливих земель можна розглядати як граничну при оцінюванні можливого розвитку опустелювання на території України в умовах сучасного клімату.

Стан вивчення питання

Необхідність залучення оперативної інформації про стан навколишнього природного середовища шляхом інтерпретації матеріалів супутникових знімків доведено зорієнтованими на практику науковими дослідженнями – як за кордоном [4-6], так і в Україні.

В Україні одними з перших багатозональні космічні знімки різної просторової розрізненості для землевпорядкування та агрономічного моніторингу застосовували фахівці Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України. Це роботи В.І. Лялька, О.І. Сахацького, М.О. Попова [7-9] та інших. У цих роботах доведено доцільність застосування даних ДЗЗ при вирішенні проблем, пов'язаних із сучасним станом вологозабезпеченості ґрунтів України, як фактора ризику їх деградації в умовах водного дефіциту. Зокрема, О.І. Сахацький [10] опрацював методологію використання матеріалів багатоспектральних космічних знімків для вирішення гідрогеологічних завдань. Для визначення впли-

ву на вологість ґрунтів як складових водообміну вчений запропонував нормалізований водний індекс NWI (Normalized Water Index), в поєднанні з наземними калібрувальними-завірковими даними доведено його ефективність для оцінювання просторових змін вологості залежно від розташування локальних ділянок живлення та розвантаження ґрунтових вод. Для оцінювання рівня ерозійної небезпеки земель України з урахуванням кліматичних чинників В.І. Лялька, Л.О. Єлістратова, О.А. Апостолов, А.Я. Ходоровський, В.М. Чехній [11] розробили методику дослідження просторового розподілу інтенсивності ерозійних процесів ґрунтів на базі ГІС з використанням багатоспектрального космічного знімання. У цій роботі використано індекс інтенсивності ерозійного розчленування рельєфу ER, який пов'язаний з дією поверхневих вод.

Питання моніторингу посушливості навколишнього природного середовища розглянуто в роботі В.І. Лялька, Л.О. Єлістратової, М.І. Кульбіди, О.А. Апостолова, М.Б. Барабаш [12]. Зокрема, ці дослідники розробили методику виявлення нестачі вологи земної поверхні та ризиків розвитку посушливих явищ з комплексним застосуванням даних метеорологічних спостережень (використання коефіцієнта Селянинова ГТК) та дистанційних даних (індекс ID).

Значні дослідження стосовно змін клімату в сучасних умовах виконано в Українському гідрометеорологічному інституті [13, 14 та ін.], а стосовно впливу цих змін на ґрунтові ресурси та необхідності адаптації землекористування до таких змін – в ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського [14 та ін.]. Зокрема, С.А. Балюк та А.В. Кучер наголошують, посилаючись на відповідні джерела, що проблема збереження ґрунтових ресурсів і подолання деградації ґрунтів в Україні потребує нових методичних підходів і комплексного розв'язання. Особливої актуальності порушене питання набуває в умовах впливу глобальних і регіональних змін клімату на ґрунтові ресурси та сільськогосподарське виробництво [15 та інші].

Мета цієї публікації – обґрунтування методичних підходів до визначення вологозабезпеченості території за даними ДЗЗ на основі використання водних індексів для виявлення процесів опустелювання за умов сучасного глобального і регіонального потепління.

Методи дослідження

Для виявлення територій, схильних до розвитку процесів опустелювання на рівні окремих ділянок субрегіонального рівня доцільно застосовувати дані знімань супутника Landsat, які мають прийнятне для таких масштабів просторове розрізнення за основними каналами 30 м. При дослідженні окремих регіонів чи території країни загалом доцільніше застосовувати дані з супутника TERRA/MODIS. Отже, поєднуючи дані з двох супутників, можна проводити дослідження на різних просторових рівнях.

Як вихідні дистанційні дані для проведення дослідження на субрегіональному рівні було використано знімки з супутників Landsat 5 – на 24.08.2007 та Landsat 8 – на 17.08.2017. Досліджувані ділянки обрано у межах півдня України – найбільш вологодефіцитного регіону країни. Для регіональних робіт з оцінювання вологозабезпеченості окремих адміністративних областей України використано дані з супутника MODIS / TERRA, продукт MOD13C2 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v006/>) за 2007 та 2015 роки. В основі продукту MOD13C2 – місячні дані щодо двох вегетаційних індексів NDVI і EVI та дані спектральних каналів: blue, red, NIR та MIR з просторовою розрізненістю 5600 м. Вегетаційні індекси змінюються в межах: [-1..1] та не мають розмірності, дані спектральних каналів змінюються в межах: [0..10000]. Спектральні канали blue, red, NIR продукту MOD13C2 відповідають таким самим каналам у супутнику Landsat,

а канал MIR, діапазон 2105-2155 нм – каналу SWIR2 для супутників серії Landsat та Sentinel-2.

Переваги використання продукту MOD13C2: 1) наявність місячних даних на всю територію України, 2) безхмарність, яка досягається шляхом заміни хмар історичним кліматологічним рекордом часових рядків MODIS.

Виклад основного матеріалу

Одним із дієвих методів визначення вологості поверхні методами ДЗЗ є використання різноманітних індексів вологості. Ці індекси розроблені для визначення наявності вологи в рослинному або ґрунтовому покриві. Наявність вологи в рослинності є прямим показником її стану. Для розрахунку індексів найчастіше використовують ближній, середній і інфрачервоний діапазони. Ці діапазони чутливі до наявності вологи в рослинному і ґрунтовому покривах. Індекси вологості широко застосовують для оцінювання проявів посухи на території, їх часто комбінують з індексами стану рослинності. В таблиці 1 наведено найбільш широко застосовувані індекси вологості.

Важливим є порівняння наведених індексів з метою визначення найефективніших для виконання завдань дослідження. Визначення значень індексів здійснено безпосередньо за даними каналів супутника Landsat та за розрахунковими значеннями коефіцієнта відбивання для 5-ти різних типів поверхні.

Для розрахунку цих індексів за значеннями коефіцієнта відбивання було проведено перерахунок

Таблиця 1.

Спектральні індекси, використані для розрахунку вологозабезпеченості території

Номер	Індекс	Формула
1	DSWI	$DSWI = (NIR+GREEN)/(SWIR+RED)$
2	NDII	$NDII = (NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)$
3	SR-SWIR	$SR-SWIR=SWIR1/SWIR2$
4	RDI	$RDI = SWIR/NIR$
5	NWI	$NWI = (GREEN-SWIR)/(GREEN+SWIR)$

DSWI (Disease water stress index) – відображає вміст вологи у рослинному покриві, застосовується для виявлення стану рослинності у зв'язку з розвитком різних захворювань рослин, що пов'язані з нестачею води [6];

NDII (Normalized Difference Infrared Index) – чутливий до вмісту води у рослинному покриві, застосовується у сільському господарстві, для оцінювання стану рослинності [7];

SR-SWIR (Simple Ratio SWIR) – призначений для визначення вмісту вологи у ґрунті та рослинності [8];

RDI (Ratio Drought Index) – добре відображає тривалі посушливі умови [9, 20];

NWI (Normalized Water Index) – застосовується для визначення вологості в рослинному покриві та у верхньому шарі відкритого ґрунту [10].

значень яскравості в каналах супутника Landsat у значення випромінювання, що надходить на сенсор за формулами 1, 2. Методика розрахунку коефіцієнта відбивання складається з 2 етапів: на першому етапі відбувається перерахунок значення в каналах в випромінювання, що надходить на сенсор за формулою 1:

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}}{Q_{cal\max} - Q_{cal\min}} \cdot (Q_{cal} - Q_{cal\min}) + L_{\min\lambda} \quad (1)$$

де L_{λ} – кількість випромінювання, що надходить на сенсор, $L_{\min\lambda}$, $L_{\max\lambda}$ – мінімальна і максимальна кількість випромінювання, що надходить для теплового каналу (табличні значення), $Q_{cal\min}$, $Q_{cal\max}$ – мінімальне і максимальне каліброване значення DN (табличні значення), Q_{cal} – каліброване значення (DN), значення в тепловому каналі Landsat.

На другому етапі здійснюється розрахунок самого коефіцієнта відбивання за формулою 2:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos\theta_s} \quad (2)$$

де ρ_{λ} – безрозмірне планетарне відбивання, L_{λ} – кількість випромінювання, що надходить на сенсор, d – відстань від Землі до Сонця в астрономічних одиницях в конкретний день зйомки сцени на конкретній місцевості (табличні значення), $ESUN_{\lambda}$ – середня сонячна позаатмосферна інтенсивність випромінювання (табличні значення), θ_s – сонячний зенітний кут в градусах (табличні значення).

Отже, для розрахунку індексів, наведених в таблиці 1, замість значень яскравості в каналах використано значення коефіцієнта відбивання (формула 2) та отримано такі формули для розрахунку індексів:

Для індекса DSWI:

$$\frac{ESUN_{red} \cdot ESUN_{swir}}{ESUN_{nir} \cdot ESUN_{green}} \cdot \left(\frac{ESUN_{green} \cdot L_{nir} - ESUN_{nir} \cdot L_{green}}{ESUN_{red} \cdot L_{swir} + ESUN_{swir} \cdot L_{red}} \right) \quad (3)$$

Для індекса NDII:

$$\frac{ESUN_{swir} \cdot L_{nir} - ESUN_{nir} \cdot L_{swir}}{ESUN_{swir} \cdot L_{nir} + ESUN_{nir} \cdot L_{swir}} \quad (4)$$

Для індекса SR-SWIR:

$$\frac{ESUN_{swir2} \cdot L_{swir1}}{ESUN_{swir1} \cdot L_{swir2}} \quad (5)$$

Для індекса RDI:

$$\frac{ESUN_{nir} \cdot L_{swir}}{ESUN_{swir} \cdot L_{nir}} \quad (6)$$

Для індекса NWI:

$$\frac{ESUN_{swir} \cdot L_{green} - ESUN_{green} \cdot L_{swir}}{ESUN_{swir} \cdot L_{green} + ESUN_{green} \cdot L_{swir}} \quad (7)$$

Для субрегіонального рівня дослідження території було проаналізовано можливість використання водних індексів, наведених у таблиці 1 для оцінювання вологозабезпеченості або її нестачі за двома підходами. Результати розрахунків індексів за цими підходами наведено на *рис. 1*.

Аналіз розрахунків за наведеними водними індексами 1 - 5 з табл. 1 та рис. 1 засвідчив, що індекс SR-SWIR некоректно характеризує територію за ступенем вологозабезпечення, значення водного індексу для водної поверхні менші, ніж значення для класів «ліс» та «зрошувані поля», тому рекомендовано у подальших дослідженнях його не використовувати.

Використання значень коефіцієнта відбивання для розрахунку індексів забезпечило можливість збільшити діапазон значень індексів: для DSWI на 33,69%, для NDII на 23,85%, для NWI на 10,49%, і лише для індекса RDI відбулося зменшення на 26,5% (*таблиця 2*). Крім того, було розраховано на скільки відсотків збільшився інтервал значень між класами земної поверхні.

Аналіз таблиці 2 також показує, що для трьох індексів діапазон збільшився між усіма використовуваними класами, і лише один індекс RDI показав, що проведення розрахунку індекса за значеннями коефіцієнта відбивання зменшує як загальний діапазон значень індекса, так і відстань між класами.

Це доводить, що для розрахунку індексів доцільно використовувати коефіцієнт відбивання.

Для регіонального рівня дослідження вологозабезпеченості території було проаналізовано водні індекси: DSWI (disease stress water index), NDII (normalized difference infrared index), RDI (ratio drought index) [18] та NWI (normalized water index) [11] та оцінена можливість застосування даних продукту MOD13C2 для їх розрахунку. Для побудови карт вмісту вологи в ґрунтах території України можливо використовувати два індекси: NDII (normalized difference infrared index) та RDI (ratio drought index), оскільки в продукті MOD13C2 є дані спектральних каналів для їх розрахунку. Слід зазначити, що індекс RDI є актуальним лише у випадках катастрофічних посух.

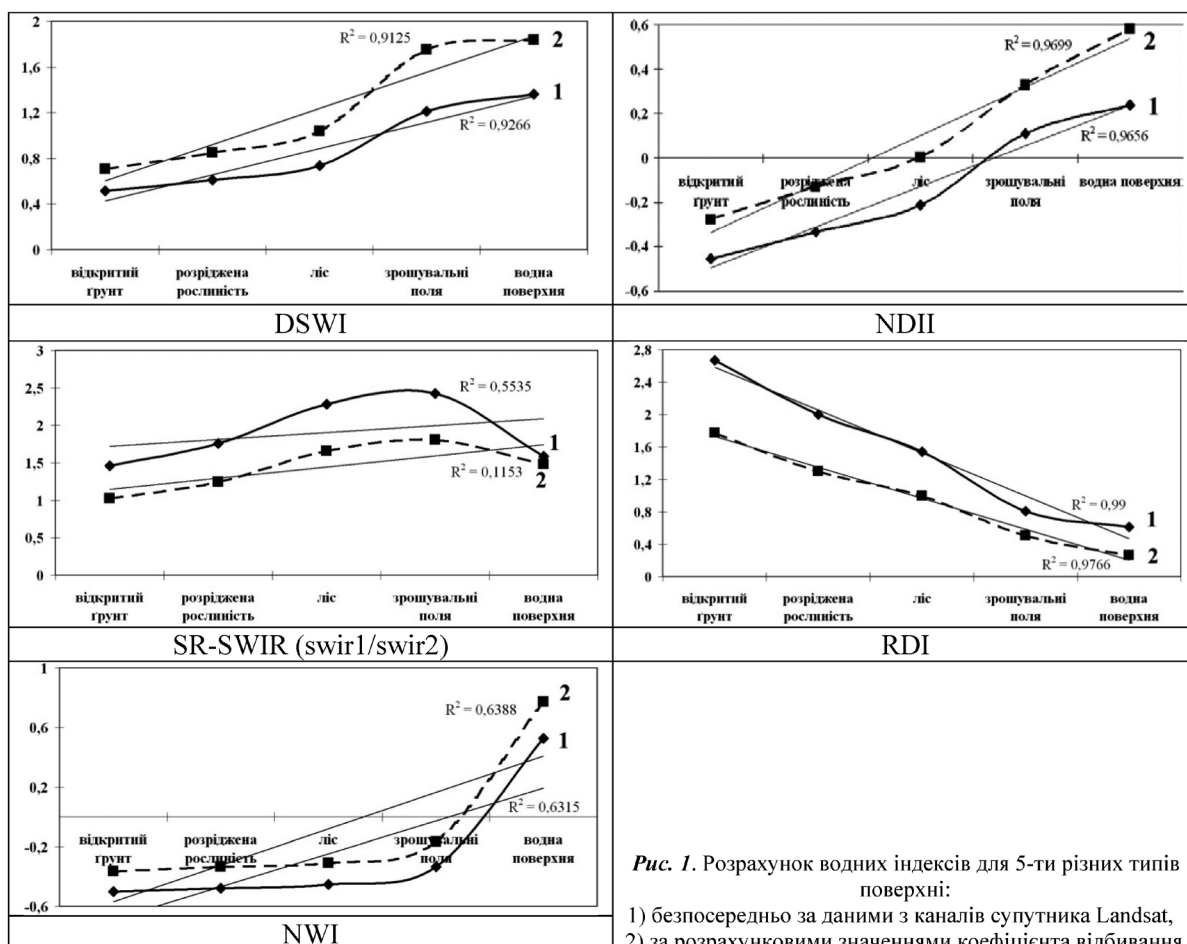


Рис. 1. Розрахунок водних індексів для 5-ти різних типів поверхні:

1) безпосередньо за даними з каналів супутника Landsat, 2) за розрахунковими значеннями коефіцієнта відбивання

Таблиця 2.

Різниця діапазонів значень індексів між різними класами земної поверхні

Індекс	Різниця між розрідженою рослинністю та відкритим ґрунтом (%)	Різниця між лісом та розрідженою рослинністю (%)	Різниця між зрошуваними полями та лісом (%)	Різниця між водною поверхнею та зрошуваними полями (%)	Різниця між водною поверхнею та відкритим ґрунтом (%)
DSWI	49,474	49,606	50,526	-43,62	33,69
NDII	20,492	12,295	1,2422	93,846	23,85
RDI	-29,75	-32,24	-33,38	23,59	-26,5
NWI	26,087	3,7037	18,803	9,1541	10,49

Тому для дослідження не тільки катастрофічно посушливих ситуацій (як у 2007 р.) доцільно використовувати індекс NDII. Як модельні обрано: 2007 рік, в якому спостерігалася засуха; 2015 рік, як один із найаномальніших років в глобальному і регіональному масштабах; 2016 рік, як типовий рік XXI ст. з додатними трендами змін температури. За 7 місяців з квітня по жовтень за 2007, 2015 та 2016 роки було отримано з супутника TERRA/MODIS місячні продукти MOD13C2.

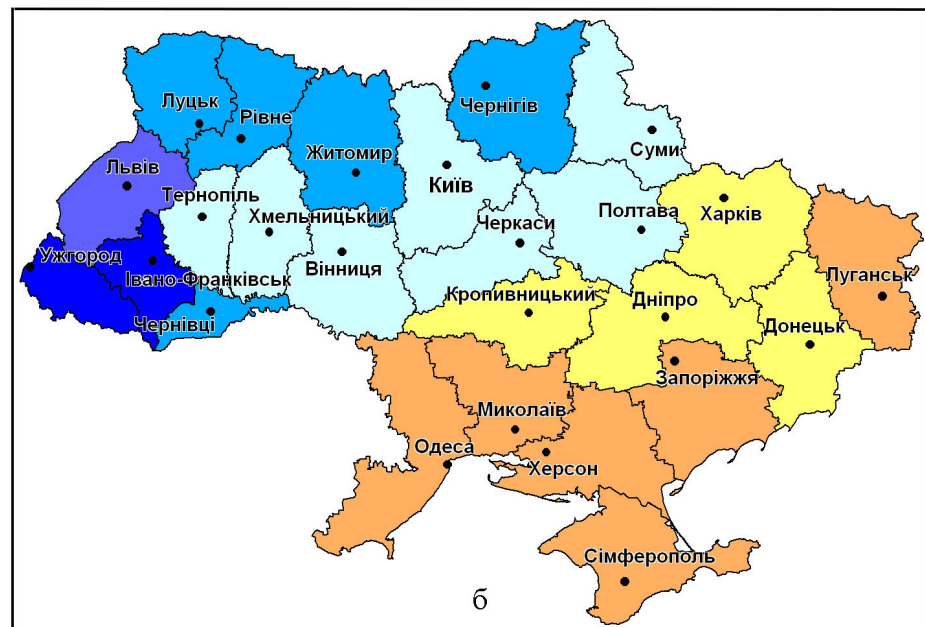
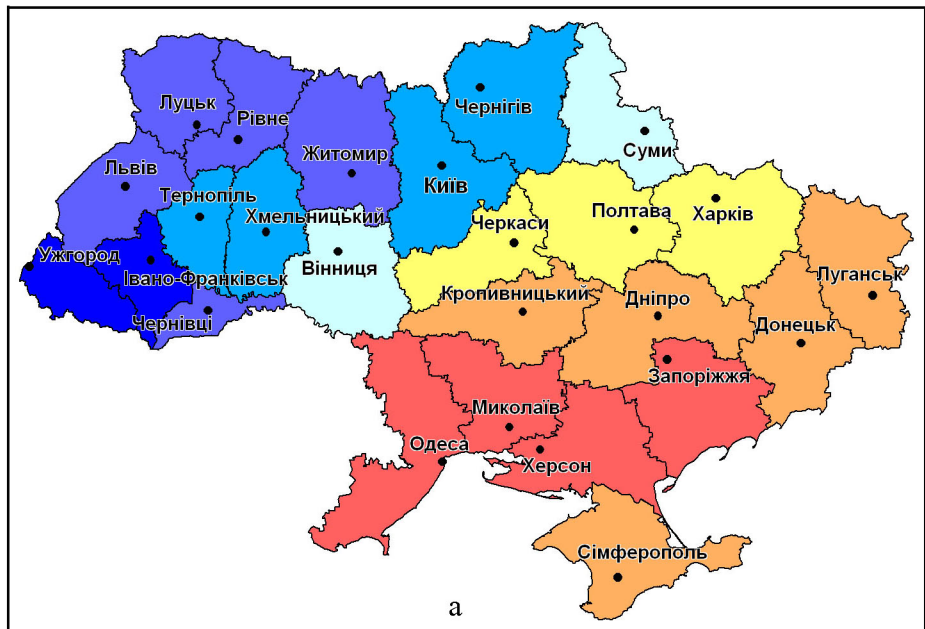
Розроблені методичні підходи стали основою

для районування території за ступенем зволоженості поверхні. Всю обробку даних з продукту MOD13C2 виконано за допомогою програмного забезпечення роботи з космічними знімками Erdas Imagine. Робота проводилась за такими етапами: 1) перетворення вхідних даних продукту MOD13C2 з формату hdf в формат img, 2) виокремлення території України в каналах NIR і MIR за допомогою функції Subset програми Erdas Imagine та контура України в форматі aoi, 3) перетворення даних NIR та MIR на територію

України з географічної системи координат в прямокутну систему координат UTM/WGS84 зона 36 за допомогою функції Reproject програми Erdas Imagine, 4) розрахунок значень водних індексів NWPI та RDI за формулами (3), (4) для кожного з місяців та побудова усереднених значень індексів за 2007 та 2015 роки за допомогою засобів Erdas Imagine, а саме Spatial Modeler / Model Maker.

Вологозабезпеченість певної території є вагомим чинником впливу на врожайність сільськогосподарських культур у будь-якій кліматичній зоні. Відповідні розрахунки вологозабезпеченості території України виконано для адміністративних областей держави за водним індексом NDII з використанням продукту продукт MOD13C2 (рис. 2) на два часових зрізи.

Було проведено ранжування території адміністративних областей України за значеннями індексу NDII за 2007 та 2015 рр. – від надмірно зволених (>150) до катастрофічно посушливих (<110). В 2007 р. територію України охопила тривала сильна посуха, зокрема в період активної вегетації, дванадцять областей країни було віднесено до території з різним ступенем нестачі вологи, з яких чотири – до катастрофічно посушливих (<110) (Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька) за значенням індексу NDII. Зазначимо, що за нашими розрахунками з



Умовні позначення:

<p>Зволоженість:</p> <ul style="list-style-type: none"> надмірна (>150) дуже сильна (140-150) сильна (130-140) помірна (125-130) 	<p>Посушливість:</p> <ul style="list-style-type: none"> слабка (120-125) сильна (110-120) катастрофічна (<110)
---	---

Рис. 2. Результати ранжування адміністративних областей України за оцінкою вологозабезпеченості за індексом NDII: а) 2007 р., б) 2015 р.

2007 р. відбувається постійний процес зростання посушливості. У 2015 р. десять областей мали проблеми з вологозабезпеченістю, але загалом по областях не виявлено катастрофічної посушливості. Проте такі області як Волинська, Рівненська, Житомирська та Чернівецька, які за індексом NDII

Таблиця 3.

Результати ранжування адміністративних областей України за 2007, 2015, 2016 рр. за значеннями водного індексу NDI

Області	2007	Площа, км ²	Площа, що відповідає «посушливим» піксілям	Області	2015	Площа, км ²	Площа, що відповідає «посушливим» піксілям	Області	2016	Площа, км ²	Площа, що відповідає «посушливим» піксілям
Волинська	0,00	20144	0	Закарпатська	0,00	12777	0	Закарпатська	0,00	12777	0
Закарпатська	0,00	12777	0	Волинська	0,14	20144	27	Львівська	0,00	21834	0
Івано-Франківська	0,00	13928	0	Львівська	0,25	21834	54	Чернівецька	0,00	8097	0
Львівська	0,00	21834	0	Івано-Франківська	0,92	13928	128	Івано-Франківська	0,18	13928	26
Чернівецька	0,00	8097	0	Рівненська	4,11	20047	823	Волинська	0,27	20144	54
Рівненська	0,53	20047	106	Чернівецька	7,10	8097	575	Вінницька	0,51	26513	136
Житомирська	2,78	29832	829	Житомирська	11,03	29832	3290	Рівненська	0,79	20047	159
Хмельницька	5,60	20645	1156	Чернігівська	12,67	31865	4038	Житомирська	1,39	29832	415
Чернігівська	9,81	31865	3126	Сумська	17,36	23834	4138	Чернігівська	1,82	31865	581
Тернопільська	10,40	13823	1438	Хмельницька	21,88	20645	4516	Сумська	2,93	23834	699
Вінницька	18,21	26513	4828	Черкаська	25,16	20900	5258	Хмельницька	6,25	20645	1290
Київська	26,43	28131	7435	Київська	26,24	28131	7382	Тернопільська	6,57	13823	908
Сумська	27,06	23834	6449	Тернопільська	26,46	13823	3658	Харківська	8,53	31415	2680
Харківська	46,35	31415	14561	Вінницька	27,47	26513	7283	Київська	9,65	28131	2716
Черкаська	51,68	20900	10801	Харківська	35,71	31415	11218	Черкаська	10,21	20900	2134
Полтавська	56,13	28748	16135	Полтавська	39,22	28748	11275	Луганська	16,60	26684	4430
Луганська	60,68	26684	16193	Донецька	47,27	26517	12533	Полтавська	17,00	28748	4887
Донецька	80,80	26517	21427	Дніпропетровська	49,32	31974	15769	Донецька	18,06	26517	4789
Кіровоградська	84,14	24588	20688	Луганська	55,91	26684	14920	Кіровоградська	26,37	24588	6483
Дніпропетровська	84,24	31974	26936	Кіровоградська	60,99	24588	14995	Одеська	26,70	33310	8895
Одеська	85,30	33310	28412	Херсонська	71,70	28461	20406	Дніпропетровська	48,55	31974	15524
Херсонська	92,04	28461	26196	Запорізька	76,25	27180	20725	Миколаївська	57,32	24598	14099
Запорізька	94,19	27180	25602	Одеська	78,25	33310	26064	Херсонська	69,07	28461	19658
Миколаївська	98,88	24598	24323	Миколаївська	87,37	24598	21492	Запорізька	73,97	27180	20106

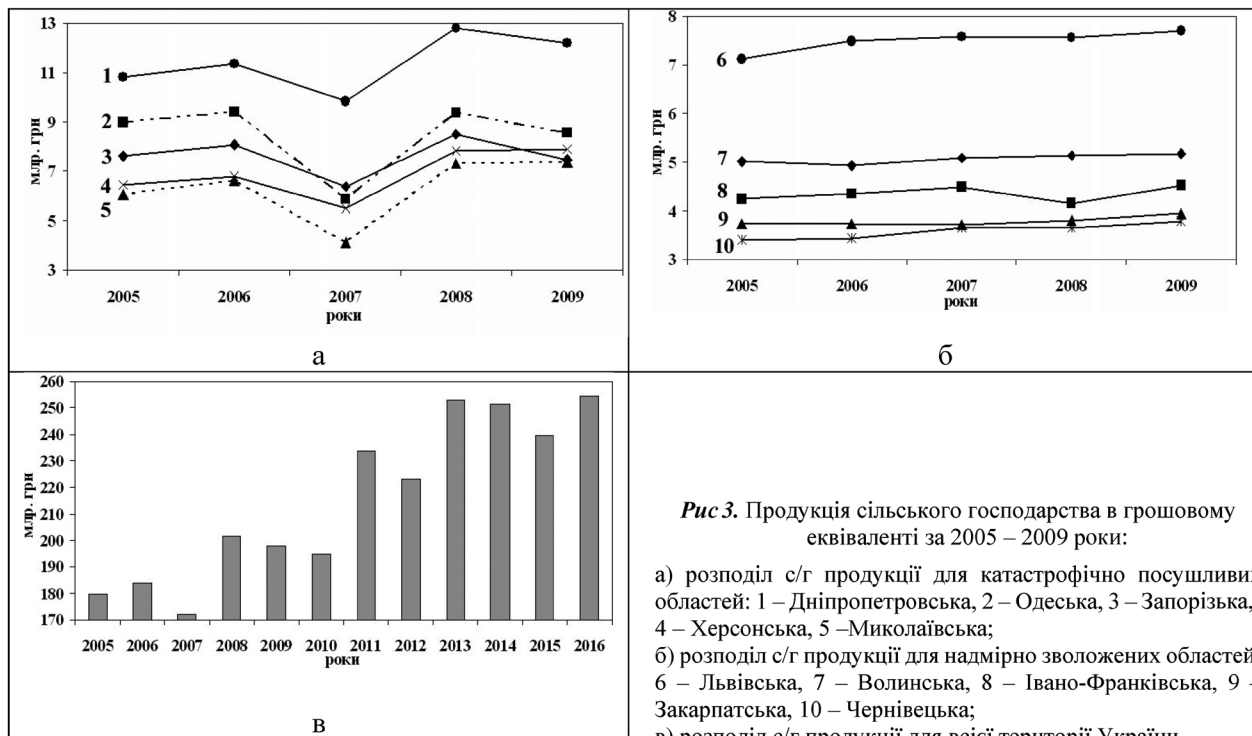


Рис. 3. Продукція сільського господарства в грошовому еквіваленті за 2005 – 2009 роки:

- а) розподіл с/г продукції для катастрофічно посушливих областей: 1 – Дніпропетровська, 2 – Одеська, 3 – Запорізька, 4 – Херсонська, 5 – Миколаївська;
 б) розподіл с/г продукції для надмірно зволених областей: 6 – Львівська, 7 – Волинська, 8 – Івано-Франківська, 9 – Закарпатська, 10 – Чернівецька;
 в) розподіл с/г продукції для всієї території України.

відносилися до дуже сильно зволених (140-150) переведено до категорії сильно зволених (130-140), а області з категорії сильно зволених (Тернопільська, Хмельницька і Київська) – до категорії помірно зволених (125-130). При подальшому прогнозованому потеплінні на території України можуть відбуватися істотні зміни зволоженості території (рис.2).

Було розраховано площу земель, що потерпають від нестачі вологи за категоріями від посушливих до катастрофічно посушливих. Розрахунок проведено в такій послідовності: 1) для кожної області встановлено кількість пікселів, за даними продукту MOD13C2, значення яких менше 120, що відповідає території з різним ступенем посушливості, 2) вираховано відсоток «посушливих» пікселів від загальної кількості пікселів території області, 3) вираховано площу області в квадратних кілометрах, що відповідає «посушливим» пікселям. Такі розрахунки було зроблено для 2007, 2015 та 2016 р. та проведено ранжування областей за значенням відсотка «посушливих» пікселів (таблиця 3).

Розрахунки, відображені у таблиці 3, дають можливість зробити висновок про те, що в 2007 р. найбільше потерпали від нестачі вологи території таких областей: Донецька, Кіровоградська, Дніпропетровська, Одеська, Херсонська,

Запорізька, Миколаївська, де відсоток посушливої території становить від 80.80 до 98.88%; за площею це відповідає від 20688 км² до 28412 км². Посушливими були території таких областей: Харківська, Черкаська, Полтавська, Луганська, Автономна республіка Крим (від 46.35 до 73.32%; за площею – 10801 км² до 19122 км²). Решта адміністративних областей відносяться від помірно зволених до надмірно зволених. Серед цих областей виділяються Волинська, Закарпатська, Івано-Франківська, Львівська і Чернівецька, де індекс NDII дорівнює нулю, тобто в цих областях не спостерігалось відсутності вологи. Для 2015 та 2016 рр. за значенням індексу NDII до посушливих віднесено ті самі області, тільки знижується відсоток посушливості відносно площі охоплення та, відповідно, площа охоплення цим станом.

Було проведено також аналіз впливу катастрофічної посухи 2007 року на виробництво сільськогосподарської продукції в грошовому еквіваленті та значеннями індексу NDII. За значеннями індексу NDII були взяті дві категорії областей – катастрофічно посушливі та надмірно вологі. Для них проаналізовано статистичні дані [21, 22] та побудовано графік розподілу сільськогосподарської продукції в гривневому еквіваленті. Аналіз показав, що для областей, виділених за індексом NDII, в 2007 р. в період посухи відбулося значне

зменшення виробництва с/г продукції (13 – 38%), а в 2008 р. – його зростання (23 – 44%). Разом з тим для областей, ранжованих за індексом NDII як надмірно зволожені, посуха 2007 р. не мала впливу на виробництво с/г продукції, оскільки не спостерігалось катастрофічного скорочення виробництва. Загалом в Україні в 2007 р. продукція сільського господарства зменшилась на 12 млрд грн порівняно з 2006 роком, а в 2008 р. зросла на 29.43 млрд грн (рис. 3).

Висновки

Проведені дослідження показали, що при вивченні процесів опустелювання ефективним є використання багатоспектральних космічних знімків. Доцільно поєднувати дані супутників із різним просторовим розрізненням для відстежування стану територій різного розміру. Одним із варіантів такого поєднання є дані супутників Landsat та TERRA/MODIS. Дані, які вони містять, дають можливість розраховувати індекси вологості, які

відображають наявність вологи в рослинному або ґрунтовому покриві та є своєрідними індикаторами розвитку процесів опустелювання. Для дослідження розвитку процесів опустелювання на основі аналізу даних супутників Landsat та TERRA/MODIS доцільно використовувати індекси вологості NDII (Normalized Difference Infrared Index) та RDI (Ratio Drought Index).

Аналіз території України з використанням зазначених індексів показує, що під найбільшою загрозою знаходяться південні степові області України, які потерпають від нестачі вологи, і ця тенденція посилюється. Проявляється зростання посушливості і для решти території України, особливо для лісостепових областей. Зростання посушливості є впливовим чинником розвитку процесів опустелювання. Зростання посушливості, яке особливо активно проявляється у окремі посушливі роки, має істотний вплив на окремі галузі господарства України, особливо на сільське господарство.

References [Література]:

1. Report of the United Conference on Environment and Development at Rio de Janeiro., Managing Fragile Ecosystems, Combat Desertification and Drought (1992). Chapter 12. UNCED- <http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/english/agenda21chapter12.html>
2. UNCCD: United Nations Convention to Combat Desertification (1994). Interim Secretariat for the Convention to Combat Desertification, Genève Executive Center-C. Genève: Chatelaine. 71 p.. P.76-1219.
3. Sustainable development goals: Ukraine. National report 2017. 176 p. URL: www.un.org.ua/images/SDGs_NationalReport_UA_Web_1.pdf
[Цілі сталого розвитку: Україна. Національна доповідь 2017. 176 с. URL: www.un.org.ua/images/SDGs_NationalReport_UA_Web_1.pdf]
4. Hui Chen, Li Fan, Wei Wu, Hong-bin Liu (2017). Comparison of spatial interpolation methods for soil moisture and its application for monitoring drought. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 525-530. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6244-4>
5. Mehmet Zeki Imamoglu, Elif Sertel (2016). Analysis of Different Methods for Soil Moisture Mapping Using Field Measurements and Remotely Sensed Data. *International Journal of Environment and Geoinformatics*. 3(3). 11-26.
6. Gevaerta A.I. Parinussab, R.M. Renzullo, L.J. Dijkd, A.I.J.M. V., and Jeu. R.A.M. D. (2016). Spatio-temporal evaluation of resolution enhancement for passive microwave soil moisture and vegetation optical depth. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Iss. 45, 235–244.
7. Lyalko V. I., Elistratova L. O., Apostolov O. A., Chekhnii V. M. (2017). Analysis of soil erosion processes in Ukraine on the basis of remote sensing of the Earth. *Bull. of the NAS of Ukraine*, 10, 34-41. DOI: doi.org/10.15407/vsn2017.10.034 [In Ukrainian].
[Лялько В. І., Єлістратова Л. О., Апостолов О. А., Чехній В. М. Аналіз ґрунтово-ерозійних процесів України на основі застосування даних дистанційного зондування Землі // Вісн. НАН України. 2017. №10. С.34-41. DOI: doi.org/10.15407/vsn2017.10.034]
8. Sakhatsky A. I. (2008). Experience in using remote data to assess soil conditions in order to solve natural resource problems. *Reports of the NAS of Ukraine*, 3, 109-115. http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2008_3_22 [In Ukrainian]
[Сахаський О. І. Досвід використання супутникових даних для оцінки ґрунтів з метою вирішення природо-ресурсних задач // Доповіді НАН України. 2009. №3. С. 109-115 http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2008_3_22]
9. Popov M. A., Stankievich S. A., Kozlova A. A. (2012). Remote risk assessment of land degradation using satellite images

- and geospatial modeling. *Reports of the NAS of Ukraine*, 6, 100-104. http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2012_6_18 [In Ukrainian].
- [Попов М. А., Станкевич С. А., Козлова А. А. Дистанционная оценка риска деградации земель с использованием космических снимков и геопространственного моделирования // Доповіді НАН України. 2012. №6. С. 100-104. http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2012_6_18]
10. Sakhatsky A. I. (2009). *Methodology of application of multispectral satellite data under the solution of hydrological problems*. Thesis for the degree of Doctor of Science in geology, specialty 05.07.12 – Remote Aerospace Research. Kyiv. 39 p. [In Ukrainian].
- [Сахацький О. І. Методологія використання матеріалів багатоспектральної космічної зйомки для вирішення гідрогеологічних задач: Автореф. дис. ... д-ра геол. наук Київ, 2009. 39 с.]
11. Lyalko V. I., Elistratova L. A., Apostolov A. A., Khodorovskyi A. Ya., Chechniy V. M. (2018). Express-elevation of potentially positive soils on the territory of Ukraine, by using the remote sensing data with consideration of climatic factors and vegetation. *Reports of the NAS of Ukraine*. 3, 87-94. http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2018_3_12 [In Ukrainian].
- [Лялько В. І., Єлістратова Л. О., Апостолов О. А., Ходоровський А. Я., Чехній В. М. Експрес-оцінка ерозійно небезпечних ділянок ґрунтового покриву на території України з використанням даних дистанційного зондування Землі з врахуванням кліматичних факторів та рослинності // Доповіді НАН України. 2018. №3. С. 87-94. http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2018_3_12]
12. Lyalko V. I., Elistratova L. A., Kul'bida M. I., Apostolov A. A., Varabash M. B. (2015). Climate changes in Ukraine at the end of XX – beginning of XXI century according to ground and remote sensing data. *Ukrainian Journal of Remote Sensing of the Earth*, 6, 33-63. [In Ukrainian].
- [Лялько В. І., Єлістратова Л. О., Кульбіда М. І., Апостолов О. А., Барабаш М. Б. Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки (Розділ 4, підрозділи 4.1-4.3) Особливості змін клімату в Україні на кінець ХХ-початок ХХІ ст. за наземними та супутниковими даними // Український журнал дистанційного зондування Землі. 2015. №6. С. 33-63. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukjdz_2015_6_7]
13. *Natural weather phenomena in Ukraine over the last 20 years (1986 - 2005)* (2006). Київ. 542 p. [In Ukrainian].
- [Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986 – 2005 рр.). Київ, 2006, 542 с.]
14. Атлас Климат и водные ресурсы Украины. Киев
15. Baliuk S.A., Kucher A.V.(2019)/ Spatial features of the soil cover as the basis for sustainable soil management. *Ukrainian geographical journal*, 3, 2-14. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2019.03.003> [In Ukrainian]
- [Балюк С.А., Кучер А.В. Просторові особливості ґрунтового покриву як основа сталого управління ґрунтами // Укр. Геогр. журн. 1029. № 3. С. 3-14. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2019.03.003>]
16. Lenio Soares Galvao, Antonio Roberto Formaggio, Daniela Arnold Tisot. (2005). Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brasil with EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment*, 94(4), 523-534. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.012xc>
17. Sriwongsitanon N., Gao H., Savenije H. H. G., Maekan E., Saengsawang, and Thianpopirug S. (2015). The Normalized Difference Infrared Index (NDII) as a proxy for soil moisture storage in hydrological modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 8419-8457. DOI:10.5194/hessd-12-8419-2015
18. Leonard Brown, Jing M. Chen, Sylvain G. Leblanc, Josef Cihlar (2000). A Shortwave Infrared Modification to the Simple Ratio for LAI Retrieval in Boreal Forests: an Image and Model Analysis. *Remote Sensing of Environment*, 71(1), 16-25. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00035-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00035-8)
19. Pinder J. E., McLeod K. W. (1999). Indications of relative drought stress in longleaf pine from Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65, 495-501.
20. Abdulah H., Skidmore A. K., Darvishzaden R., Heurich M., (2019). Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8. *Remote sensing in ecology and conservation*, 5(1), 87-106. <https://doi.org/10.1002/rse2.93>
21. *The annual statistic book 2007 year*. State Statistics Service of Ukraine. Kyiv, 569 p. [In Ukrainian].
- [Статистичний щорічник за 2007 рік. Державна служба статистики України. Київ, 2016р. С. 569]
22. *The annual statistic book 2017 year*. State Statistics Service of Ukraine. Kyiv, 571 p. [In Ukrainian].
- [Статистичний щорічник за 2017 рік. Державна служба статистики України. Київ, 2016р. С. 571]

Стаття надійшла до редакції 12.12.2019