

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської та
аспірантської підготовки
Кафедра метеорології та кліматології

КОМПЛЕКСНА МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему „Супутниковий моніторинг посух в степовій зоні України”

СКЛАД:

1. „Супутниковий моніторинг посух в
південнозахідних областях України”

Виконала студентка 2 курсу групи МНЗ-61-М
спеціальності 103 - Науки про Землю
Лаврент’єва Анастасія Олександрівна
Керівник д.геогр.н., проф.
Семенова Інна Георгіївна

2. „Супутниковий моніторинг посух в
південносхідних областях України”

Виконав студент 2 курсу групи МНЗ-61-М
спеціальності 103 - Науки про Землю
Делінський Дмитро Сергійович
Керівник д.геогр.н., проф.
Семенова Інна Георгіївна

Староста
Лаврент’єва Анастасія Олександрівна

Рецензент к.т.н., доц.
Перелигін Борис Вікторович

Одеса - 2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської та
аспірантської підготовки
Кафедра метеорології та кліматології

Магістерська кваліфікаційна робота

на тему „Супутниковий моніторинг посух в південно-західних областях
України”

Виконала студентка 2 курсу групи МНЗ-61-М
спеціальності 103 Науки про Землю
Лаврент'єва Анастасія Олександрівна

Керівник д.геогр.н., професор
Семенова Інна Георгіївна

Рецензент к.т.н., доц.
Перелигін Борис Вікторович

Одеса - 2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет _____ магістерської та аспірантської підготовки _____
Кафедра _____ метеорології та кліматології _____
Рівень вищої освіти _____ магістр _____
Спеціальність _____ 103 _____ Науки про Землю _____
(шифр і назва)
Освітня програма _____ Метеорологія _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____ Івус Г.П.
« 23 » березня _____ 2018 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Лаврент'євій Анастасії Олександрівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Супутниковий моніторинг посух в південно-західних
областях України _____

керівник роботи _____ Семенова Інна Георгіївна, д.геогр.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від _____ 02.11.2017 р. № 321-С

2. Строк подання студентом роботи _____ 01.06.2018 р.

3. Вихідні дані до роботи: часові ряди щотижневих супутникових
вегетаційних індексів NDVI та VCI за 1985-2015 рр. по Одеській,
Херсонській, Миколаївській областях; дані наземних метеорологічних
спостережень; середньо обласні дані індексу посух SPEI.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) 1) Огляд наукової літератури за напрямком дослідження.
2) Формування вибірки вихідної інформації для місяців вегетаційного сезону
(квітень-вересень) з щотижневих даних вегетаційних індексів. 3) Аналіз
часового ходу вегетаційних індексів. 4) Аналіз статистичних характеристик
вегетаційних індексів. 5) Порівняльний аналіз метеорологічних показників
посух (ГТК (розрахований по двом станціям) та SPEI) з вегетаційним
індексом VCI. 6) Визначення посушливих періодів за допомогою
вегетаційного індексу VCI і встановлення повторюваності посух у
досліджуваній період.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
- графіки часового ходу індексів NDVI та VCI.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 23.03.2018 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			У %	За 4-х бальною шкалою
1	Огляд наукової літератури за темою дослідження. Формування теоретичної частини роботи.	01.04.2018	95	відмінно
2	Відбір та аналіз вихідних даних, розрахунки середньомісячних значень індексів посух.	10.04.2018	95	відмінно
3	Побудова і аналіз графіків часового ходу вегетаційних індексів.	20.04.2018	90	відмінно
4	Рубіжна атестація	30.04.2018	93	відмінно
5	Аналіз статистичних характеристик вегетаційних індексів.	01.05.2018	90	відмінно
6	Порівняльний аналіз супутникових вегетаційних індексів та метеорологічних індексів посух.	10.05.2018	85	добре
7	Аналіз повторюваності посух по місяцях вегетаційного сезону в досліджуваний період.	20.05.2018	90	відмінно
8	Складання висновків. Оформлення тексту магістерської роботи.	25.05.2018	88	добре
9	Підготовка доповіді до захисту матеріалів магістерської роботи.	01.06.2018	95	відмінно
Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)			91	відмінно

Студент _____ А.О. Лаврент'єва
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ І.Г. Семенова
 (підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Супутниковий моніторинг посух в південно-західних областях України».

Автор: Лаврент'єва Анастасія Олександрівна.

Актуальність дослідження полягає в тому, що посухи є найбільш повторюваними серед небезпечних явищ вегетаційного періоду, які завдають значних збитків економіці країни.

Мета роботи: оцінка посушливих умов у вегетаційний період в південно-західних областях України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) протягом 1985-2015 рр. за допомогою супутникової інформації і метеорологічних індексів посух.

Відповідно до поставленої мети розв'язано наступні **задачі**:

- проведено аналіз часового ходу супутникових вегетаційних індексів NDVI і VCI та визначені тенденції у їх змінах;
- визначено статистичні характеристики індексів NDVI і VCI;
- оцінено статистичний зв'язок між супутниковим вегетаційним індексом VCI та метеорологічними індексами посух ГТК (Селянинова) і SPEI;
- визначено повторюваність посушливих періодів за допомогою індексу VCI.

Об'єкт дослідження: посушливі явища.

Предмет дослідження: просторово-часова мінливість супутникових і метеорологічних індексів посух.

Методи дослідження: статистичний аналіз, просторово-часовий аналіз даних.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі використані сучасні дані по супутникових вегетаційних індексах за останній тридцятирічний період, для яких визначено статистичні характеристики, з оцінкою тенденції посушливості на південному сході України в умовах сучасних регіональних змін клімату.

Практичне значення отриманих результатів. Виявлені тенденції у змінах посушливості можуть бути використані для уточнення методик прогнозування врожайності сільськогосподарських культур.

Магістерська кваліфікаційна робота в обсязі 56 сторінок складається з 4 розділів, висновків, переліку посилань з 18 джерел, Додатку, містить 17 рисунків та 12 таблиць в основному тексті.

Ключові слова: посуха, індекс посухи, супутниковий вегетаційний індекс.

SUMMARY

Theme of master's qualification works is "Satellite monitoring of droughts in the south-western regions of Ukraine".

Author: Lavrentieva Anastasiia.

The **relevance** of the study is that droughts are the most recurrent among the dangerous phenomena of the growing season, which cause significant damage to the economy.

Objective: estimation of drought conditions during the growing seasons of period 1985-2015 in the south-western regions of Ukraine (Odessa, Mikolaiv, Kherson areas) using the satellite information and meteorological indices of droughts.

According to the stated objective the **following tasks** were accomplished:

- Analysis of the time series of satellite-derived vegetation indices NDVI and VCI were done and trends are determined;
- Statistical characteristics of NDVI and VCI indices are determined;
- Statistical relationship between the satellite vegetation index VCI and the meteorological drought indices the HTC (by Selyaninov) and SPEI was estimated;
- Frequency of drought episodes has been determined using the index VCI.

Object of study: drought phenomena.

Subject of research: Spatiotemporal variability of the satellite-derived and meteorological drought indices.

Research methods: statistical analysis, spatiotemporal analysis of data.

The scientific novelty of the obtained results. In the study the modern satellite-derived vegetation indices were used for the last thirty years, for which statistical characteristics were determined, and the tendency of drought in the south-west of Ukraine under the modern regional climate changes was estimated.

Practical significance of the obtained results. The tendency in changes aridity of climate can be used to specify the methods of forecasting crop yields.

Master's qualification work in volume 56 pages consists of 4 sections, conclusions, References from 18 sources, annex, and contains 17 figures and 12 tables in the main text.

Keywords: drought, drought index, satellite vegetation index.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

Комплексний дипломний проект на тему „Супутниковий моніторинг посух в степовій зоні України” виконувався на кафедрі метеорології та кліматології під керівництвом д.геогр.н., професора Семенової І.Г., студентами групи МНЗ-61 Лаврент’євою А.О. – тема: „Супутниковий моніторинг посух в південно-західних областях України”, та Делінським Д.С. – тема: „Супутниковий моніторинг посух в південно-східних областях України”.

Актуальність теми визначається необхідністю розробки принципів моніторингу посух на території України, певні регіони якої майже щорічно опиняються під дією посушливих явищ різної інтенсивності у вегетаційний період, що негативно позначається, перш за все, на умовах вегетації сільськогосподарських рослин. До найбільш розповсюджених посушливих явищ, що спостерігаються на території України, відносять: тривале бездощів'я, атмосферну, ґрунтову та загальну посуху, а також суховії. Кожне явище має свої критичні межі, які визначаються найбільш небезпечними і потребують комплексного підходу до вивчення з метою завчасного попередження користувачів про можливість виникнення і інтенсивність того чи іншого явища. Супутникова інформація є одним з найсучасніших та перспективних інструментів дослідження просторово-часових характеристик посух, адже має певні переваги перед станційними спостереженнями, зокрема високу просторову та часову роздільну здатність, що дозволяє проводити поточний моніторинг стану рослинного покриву та підстильної поверхні в залежності від метеорологічних умов, в тому числі зволоження та температурного режиму.

Методика дослідження, що застосована в рамках даної комплексної кваліфікаційної роботи, включає до себе просторово-часовий аналіз рядів супутникових вегетаційних індексів з метою отримання характеристик мінливості цих параметрів в межах вегетаційного сезону та визначення повторюваності посух в південних областях України.

В рамках магістерської роботи, яка виконувалася Лаврент’євою А.О., на тему «Супутниковий моніторинг посух в південно-західних областях України», проведено дослідження часового ходу супутникових вегетаційних індексів NDVI та VCI, які використовуються для моніторингу стану рослинного покриву в залежності від ступеня посушливості погодних умов, протягом вегетаційних сезонів (квітень-серпень) періоду 1985-2015 рр. в південно-західних областях України – Одеській, Херсонській та Миколаївській. Виявлені тенденції до зростання середніх значень індексів у весняні місяці. Також оцінено деякі

статистичні характеристики рядів цих індексів для визначення їх сезонної мінливості в досліджуваних областях. З використанням індексу VCI визначено повторюваність посух в різні місяці досліджуваного періоду та їх розповсюдженість по областях. Порівняльний аналіз супутникового вегетаційного індексу VCI з метеорологічними індексами посух ГТК (гідротермічний коефіцієнт Селянинова) та SPEI (стандартизований індекс опадів-евапотранспірації) дозволив виділити деякі особливості їх застосування в різних задачах моніторингу посух.

Магістерська робота на тему: „Супутниковий моніторинг посух в південно-східних областях України” була виконана студентом МНЗ-61 Делінським Д.С. В рамках цієї роботи проведено дослідження часового ходу супутникових вегетаційних індексів NDVI та VCI для відповідних областей України (Дніпропетровської, Запорізької, Донецької) протягом вегетаційних сезонів (квітень-серпень) періоду 1985-2015 рр. та виявлені межі коливань цих параметрів в кожний місяць за допомогою статистичного аналізу часових рядів, а також тенденції до змін цих індексів протягом тридцяти років. Аналіз трендів показав, що як і в південно-західних областях країни, спостерігаються тенденції до зростання середніх значень індексів у весняні місяці та майже відсутні зміни наприкінці літа та початку осені. З використанням рядів супутникового індексу VCI та метеорологічного індексу посух SPEI визначено часовий хід посушливих періодів в різні місяці, оцінено повторюваність посух і їх розповсюдженість по областях південного сходу країни.

Представлена комплексна магістерська робота є завершеним дослідженням, в якому на кліматично значущих 30-річних рядах супутникових вегетаційних індексів NDVI і VCI отримана оцінка мінливості цих параметрів в умовах південних областей України протягом вегетаційного сезону та продемонстровано принципи використання супутникових вегетаційних індексів для визначення посушливих періодів і оцінці їх інтенсивності.

ЗМІСТ

Вступ	8
1. Загальна характеристика посушливих явищ.....	10
1.1. Типи посушливих явищ.....	10
1.2 Метеорологічні показники посух	17
1.3 Просторово-часовий розподіл посух в Україні.....	21
2. Принципи використання супутникових вегетаційних індексів для моніторингу посух.....	27
3. Динаміка вегетаційних індексів NDVI та VCI по південному заходу України.....	32
3.1 Вихідні дані та методи аналізу.....	32
3.2 Часовий хід NDVI та VCI.....	34
3.3 Аналіз статистичних характеристик NDVI та VCI.....	41
4. Оцінка просторово-часового розподілу посух по південному заходу України.....	47
4.1 Оцінка статистичного зв'язку між ГТК, SPEI та VCI.	47
4.2 Міжрічна та сезонна мінливість повторюваності посух вегетаційного сезону.....	49
Висновки	52
Перелік посилань	54
Додаток А	56

ВСТУП

Проблема посух в світі на сьогодні є однією з головних не тільки в метеорологічній галузі, але й в багатьох сферах життя як окремої людини, так й цілих держав. На фоні глобального потепління та зростання народонаселення кожного року різні частини континентів світу опиняються під дією посух різної інтенсивності. Посушливі явища містять у себе такий прояв геофізичних і біологічних процесів, які у своєму поєднанні призводять до підвищеної втрати води живими організмами, внаслідок чого порушується або припиняється зовсім їх фізіологічна діяльність.

В Україні посушливі явища спостерігаються щороку в літній період та охоплюють значну територію країни. Тривалі періоди бездощів'я на фоні високих температур сприяють висушуванню верхнього шару ґрунту протягом вегетаційного періоду, що є вельми несприятливим для сільського господарства. За дослідженнями УкрНДГМІ, в Україні спостерігається циклічність у коливанні літніх та зимових температур. Повний цикл складає 60-64 роки, а останні фази приходилися на такі періоди: 1912-1943 рр. – підйом температур влітку, 1944-1976 рр. – спад температур, з 1977 р. по сьогоднішній день – знов підйом температур. Тому в сучасний період спостерігається пік максимальних літніх значень температур повітря, причому особливо спекотними видалися 2007 та 2010 роки. Взагалі, за останні 130 років температура влітку майже не змінилася, навіть максимум, що спостерігався у 1946 р. – 39,4 °С, не був перекритий у 2010 р. - 39,2 °С. В той же час зимові температури по всіх областях України підвищуються.

Незважаючи на велику базу досліджень посух в Україні, питання діагностування, короткострокового та довгострокового прогнозування посух та їх наслідків залишається актуальним, адже є невиришеним в повній мірі.

Мета магістерської роботи – оцінка посушливих умов у вегетаційний період в південно-західних областях України (Одеській, Миколаївській і Херсонській) протягом 1985-2015 рр. за допомогою супутникової інформації і метеорологічних індексів посух.

Методика дослідження включала в себе аналіз часових рядів супутникових вегетаційних індексів NDVI і VCI, та статистичну оцінку їх мінливості для досліджуваного періоду. Для порівняльного аналізу з

метеорологічними показниками посух були проаналізовані часові ряди індексів ГТК та SPEI та виконаний кореляційний аналіз для встановлення зв'язку між ними та супутниковими вегетаційними індексами.

Магістерська робота складається з 4 розділів, висновків, переліку посилань та додатку. В першому та другому розділах міститься огляд літературних джерел із загальних питань визначення, типів посушливих явищ, принципів використання супутникових вегетаційних індексів, а також кількісної оцінки посушливих явищ взагалі, та в Україні зокрема. В третьому розділі представлені результати аналізу часових змін супутникових вегетаційних індексів і їх статистичні характеристики за досліджуваний період. В четвертому розділі представлено оцінку повторюваності посух вегетаційного сезону по південно-західним областям України з використанням як супутникових вегетаційних індексів, так і метеорологічних показників посух. Перелік посилань містить 18 літературних джерел.

Магістерська робота виконана на кафедрі метеорології та кліматології під науковим керівництвом д.геогр.н., професора Семенової І.Г.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПОСУШЛИВИХ ЯВИЩ

1.1 Типи посушливих явищ

Посуха - комплексне явище, яке може розглядатися з декількох точок зору. Центральне місце в визначеннях посухи займає поняття дефіциту вологи. Труднощі у визначенні посухи пов'язані з необхідністю розгляду різних компонентів гідрологічного циклу, а також періодів часу і середовищ, відповідно коли і де дефіцит вологи проявляється. Ситуація, коли одночасно виникають тривалий недолік вологи в ґрунті на великій глибині і короткостроковий її надлишок в верхньому шарі, відображає складність, пов'язану з визначенням та ідентифікацією посух. Існують різні підходи до класифікації посух. Залежно від середовища, в якій спостерігаються ознаки дефіциту вологи, розрізняють атмосферні і ґрунтові посухи [2].

Бездощовий період (бездощів'я) — це інтервал часу, в якому протягом десяти і більше днів не спостерігаються опади або їх добова кількість не перевищує 1 мм. Тривале бездощів'я є передвісником посухи. Часто у ці періоди відзначаються суховії. Бездощовий період тривалістю понад 10 днів вважається посушливим.

Атмосферною посухою у місцевості з помірним кліматом є стан атмосфери з тривалим бездощів'ям, істотним зменшенням опадів, що супроводжуються підвищеною інсоляцією та високою температурою повітря. Атмосферна посуха певної тривалості зумовлює ґрунтову посуху.

Ґрунтова посуха може спостерігатись на полях, які неадаптовані до посушливого клімату як без рослин, так і з рослинним покриттям. У першому випадку критерії ґрунтової посухи визначають за агрогідрологічними властивостями ґрунту (найменша вологоємність). За наявним агрофітоценозом ґрунтова посуха є складною системою, що враховує динаміку вологопотребі рослин і вологості ґрунту. В останньому випадку характерною особливістю ґрунтової посухи є невідповідність між вологопотребою рослин та умовами їх вологозабезпечення. Внаслідок недостатньої вологості ґрунту, надлишкових інсоляції та притоку тепла відбувається істотне зниження транспірації і продуктивності порівняно із сприятливими умовами.

Поєднання атмосферної і ґрунтової посухи визначають як загальну посуху. Формування посух різної інтенсивності і тривалості обумовлено взаємодією безлічі фізичних механізмів. Однак на початковій стадії вирішальними є циркуляційні фактори [2, 14]. Безпосередньо початок посух пов'язаний з встановленням антициклонів, для яких характерна малохмарна сонячна погода без опадів. Високий рівень інсоляції і сухість повітря створюють підвищену випаровуваність, і запаси ґрунтової вологи без поповнення їх дощами виснажуються

Посуху може супроводжувати суховій — це стан атмосфери, за якого простежується повільне, зі швидкістю 3-5 м·с⁻¹ перенесення сухого, надмірно теплого повітря (відносна вологість 30 % та нижче, а температура 25°C та вища). Зазвичай, поєднання суховію з бездошовим періодом протягом декількох діб зумовлює атмосферну посуху.

У зарубіжній літературі, орієнтованій на моніторинг посух в регіонах з великим ризиком тривалих посух і розвиненою системою страхування, широкое поширення має більш детальна класифікація посух [9].

Посухи, що розглядаються як прояв кліматичної мінливості, поділяються на такі категорії:

Метеорологічні посухи. Основною ознакою метеорологічної посухи є дефіцит кількості опадів, що супроводжується зменшенням поверхневого стоку, інфільтрації і поповнення ґрунтових вод, а також іншими явищами: високою температурою, низькою відносною вологістю, зменшенням хмарності, підвищеним приходом сонячної радіації, сукупність яких призводить до збільшеного випаровуванню і транспірації вологи рослинами [9]. Метеорологічна посуха може розвиватися дуже швидко і різко закінчитися.

Сільськогосподарські посухи. Сільськогосподарська посуха характеризується дефіцитом вологості ґрунту, що призводить до стресу рослин, зменшення біопродуктивності і врожаю [9]. Потреби рослини в воді визначаються погодними умовами, біологічними характеристиками даного виду рослин, стадією його зростання і розвитку, а також фізичними та біологічними властивостями ґрунтів. Дефіцит вологи у верхньому шарі ґрунту при посіві може утруднити проростання насіння, привести до зменшення сходів і скорочення врожаю. Однак якщо вологи у верхньому

шарі ґрунту досить для задоволення потреб рослин на ранній стадії зростання, то дефіцит підґрунтової вологи на цій стадії не вплине на врожай, якщо згодом протягом вегетаційного сезону цього дефіциту не буде. Агрометеорологічні показники, використовувані для моніторингу сільськогосподарських засух, враховують пов'язані зміни фізичних показників приземного шару повітря і корені населених горизонтів ґрунту, а також зміни показників зростання біомаси [3].

Початок сільськогосподарської посухи за часом може значно відрізнятися від початку метеорологічної в залежності від наявних вологозапасів. Виникненню засух сприяє вплив додаткових чинників, що перешкоджають накопиченню запасів вологи в ґрунті: взимку - недовік снігу, ранньою весною - несприятливі умови вбирання талих вод (бурхливий сніготанення, промерзла або безструктурний ґрунт, наявність крижаних кірок). За часом настання посухи підрозділяються на весняні, літні та осінні. Іноді посухи тривають кілька місяців поспіль, охоплюючи два-три сезони. За інтенсивністю та охопленням території посухи діляться на дуже сильні, сильні, середні і слабкі. Найбільших збитків зерновим культурам завдають дуже сильні і сильні весняно-літні посухи в травні та червні.

Гідрологічні посухи. Для гідрологічної посухи характерні зменшення надходження води в річки і водоймища і зниження їх рівня, зменшення запасів ґрунтових вод, що призводить до ускладнень в задоволенні потреб у воді, а також скорочення площі боліт [9]. Ступінь суворості гідрологічної посухи визначається, як правило, для водозборів або річкових басейнів. Гідрологічна посуха зазвичай настає з запізненням в порівнянні з метеорологічною та сільськогосподарської. Оскільки регіони пов'язані між собою гідрологічними системами, область поширення гідрологічної посухи може мати більшу протяжність, ніж область викликала її метеорологічної посухи. Виявлення зв'язку гідрологічних посух з дефіцитом опадів, обумовленим кліматичними причинами, часто ускладнюється через одночасного впливу на гідрологічні характеристики басейну факторів іншої природи, таких як зміна в землекористуванні (вирубка лісу), деградація земель, а також будівництво дамб. Зміна в землекористуванні в верхів'ях річки може змінити такі гідрологічні характеристики, як швидкість інфільтрації і поверхневий стік, в результаті чого нижче за течією мінливість

річкового стоку призведе до збільшення ймовірності появи гідрологічної посухи. Зміна в землекористуванні є одним з антропогенних впливів, що викликають збільшення числа ситуацій з дефіцитом води навіть при відсутності змін в частоті виникнення первинного явища - метеорологічної посухи.

Посухи, що мають соціально-економічні наслідки. До цього типу можна віднести посухи, інтенсивність і масштаби яких згубно впливають на стан економіки країни (регіону) і призводять до значних соціальних наслідків, іноді набувають характеру гуманітарної катастрофи [3].

За просторовими масштабами посушливі явища можуть бути поділені на місцеві, зональні, міжзональні, континентальні та глобальні [2]. Місцеві посухи охоплюють до 10% площі однієї агро кліматичної зони та носять плямистий характер. Зональні посухи можуть займати від 10 до 100% площі агро кліматичної зони. Міжзональні посухи займають не менше двох агро кліматичних зон з охопленням від 10 до 35% площі у кожній зоні. Континентальні посухи займають не менше трьох агрокліматичних зон із загальним охопленням від 30%. Глобальні посушливі явища поширюються на значну частину певної півкулі або не менше ніж на 10% території всіх суміжних континентів.

Основним чинником в утворенні посухи є циркуляційний фактор [1-2, 4-5], тобто над певною територією повинні утворюватися такі макромасштабні та синоптичні процеси, які б призводили до стійкого утворення підвищеного фону температури повітря, довготривалої відсутності опадів та низької відносної вологості повітря. Посушливі явища виникають та зникають в певному місті через складний комплекс взаємо зв'язних природних процесів, які можуть бути посилені або послаблені діяльністю людини. Відповідний вклад в цей процес вносять макромасштабні атмосферні процеси в період вегетації, властивості рослини, а саме стійкість до відсутності опадів і високим температурам, недостатній режим зволоження ґрунту та агротехніка, що не пристосована до посушливих умов.

Походження посух в різних районах Європи викликано створенням таких процесів, які перешкоджають проникненню волого морського повітря з Атлантичного океану глибоко на континент. Основною причиною виникнення посух на Руській рівнині є вторгнення холодного повітря з

півночі, північного заходу або заходу та утворення в арктичному, сухому повітрі потужного антициклону [10, 14]. Холодне та сухе повітря, що переміщується на південь, прогрівається, одночасно підвищується дефіцит вологи. Цей дефіцит починає поповнюватися за рахунок випаровування вологи, яка міститься у ґрунті, тобто посилюється процес висушування ґрунту. Антициклони звичайно переміщуються повільно, що додатково підсилює посуху. В районі переважання антициклонічної циркуляції або стаціонування антициклону утворюється стійка зона низхідних вертикальних рухів і дивергенції вологи в нижніх шарах. Зменшення хмарності та припинення опадів, зростання тривалості сонячного сяяння призводять до збільшення випаровуваності вологи з ґрунту та рослин, призводячи до дефіциту потреби вологи рослинами.

Посухи в Східній Європі обумовлені перш за все посиленням меридіонального переносу. Переважаючим є стаціонарні антициклони над північчю, північним заходом або центральними районами ЄТР, Нижнім Поволжям або Південним Уралом. Декілька рідше антициклони формуються в районі Карпат або відділяються як ядра високого тиску в системі азорського антициклону. Взагалі, при виникненні посухи типова синоптична ситуація характеризується тропосферним і приземним гребенем або антициклоном, що розташовуються безпосередньо над районом посухи або на північний захід від нього. Така ситуація може виникати як при меридіональному, так і зональному типах циркуляції.

Тривале стаціонування антициклону призводить до бокового відтоку вологи за рахунок розтікання повітря в шарі тертя. Після припинення інтенсивного антициклогенезу з послабленням низхідних вертикальних рухів починає утворюватися конвективна хмарність, що веде до послаблення посухи [10].

Швидке висушування повітря відбувається тільки після вторгнення в південні широти холодних арктичних мас, які відрізняються малою місткістю водяної пари. Процес трансформації, тобто прогрів та висушування, триває 3-4 доби, після чого повітря перетворюється на тропічне - сухе та тепле [2]. Для утворення тривалих та сильних посух необхідні арктичні вторгнення, що повторюються декілька разів поспіль. Звичайно посухи розвиваються та

стабілізуються за умов більш північного розташування поясу субтропічних антициклонів, який зміщується до 50° пн. ш.

Атлантичні повітряні маси, які сформувалися в азорському антициклоні, є більш вологими та прогріваються повільніше, ніж арктичне повітря, але проходять більш довгий шлях над континентом, прогріваються та віддаляються від стану насичення водяною парою. Це призводить до загострення посушливих явищ на Україні та в Поволжі.

В роки з атмосферними посухами спостерігається підвищена кількість днів з антициклонічною циркуляцією, так на Україні перевищення досягає до 14 днів від норми, але посухи спостерігаються й у роки, коли днів з антициклонічною циркуляцією менше за норму.

Особливо інтенсивні та довготривалі посухи, які охоплюють великі території, частіше за все пов'язані з такими аномаліями циркуляційних процесів в атмосфері, які характеризуються блокуванням зонального потоку. Повторюваність процесів блокування добре корелює з повторюваністю посух в ті ж роки. [4, 12]. Так, посухи 1972 та 2019 років супроводжувалися блокуванням з розщепленням атмосферного потоку тривалий проміжок часу в теплий період року, що призвело до формування дефіциту опадів на всій Європейській території СНД. В той же час цій посусі передували аномальні зими: грудень та лютий – теплі (на 2-4°C вище норми), січень – аномально холодний (на 10 °C нижче норми), що призвело до різкого зменшення висоти снігового покриву та збільшення дефіциту вологості в весняно-літній період.

В роботі Мартазинової В.Ф. та ін. [5] було показано, що в середині ХХ століття випадки атмосферної посухи формувалися завдяки дії двох основних процесів, що формували антициклональний характер погоди в Східні Європі. Перший процес – це вторгнення сухого та холодного арктичного повітря у вигляді антициклональних ядер в тилу північних циклонів та їх стаціонавання і трансформація на півдні Європи. Такий процес є стійким за часом та супроводжується блокуванням західного перенесення в атмосфері, що призводить до формування інтенсивних посушливих явищ.

Другий процес пов'язаний з дією азорського максимуму, в результаті чого на території Європи спостерігається зміщення антициклонів з Атлантичного океану. Антициклони є досить рухливими та викликають помірну посуху на територіях, через які лежать на шляху антициклонів.

Ситуація стає більш складною, якщо відмічається сумісна дія арктичного та азорського процесів. Азорський антициклон висувається далі на північ, ніж зазвичай, та по його східній периферії починає поступати на південь сухе арктичне повітря. Такий процес є дуже стійким за часом та викликає найжорстокіші посухи на території Східної Європи, прикладом яких може бути літня посуха 1972 р. [12].

Наприкінці минулого століття повторюваність атмосферних процесів, що призводять до посухи в Україні, зменшилася. Під впливом загального потепління клімату в Україні відбулося підвищення зимової температури повітря, що призвело до зменшення висоти та періоду залягання снігового покриву. Поряд з цим, літо стало дещо прохолоднішим, але збільшилася частота появи відносно коротких сухих періодів з температурою повітря до $+35^{\circ}\text{C}$, що вже на п'ятий день викликає суттєве висушування верхнього шару ґрунту. Аналіз баричних полів, які супроводжували виникнення посушливих явищ наприкінці ХХ століття, дозволив визначити три основних синоптичних процеси, з якими пов'язано надходження сухого та теплого повітря на південь Східної Європи [5].

1) Західний процес, який супроводжується надходженням теплого повітря в системі антициклонів, пов'язаних своїм походженням з азорським максимумом. На відміну від попереднього часового періоду, в останні десятиліття цей процес став менш повторюваним і нестійким за часом, а посушливі умови звичайно, не сильними.

2) Південний процес, який супроводжується надходженням теплого повітря з півдня, що відбувається на фоні меридіональної перебудови поля тиску та повітряних течій в тропосфері. Цей процес не є тривалим, але призводить до суттєвого підвищення температури повітря (до 10°C за добу) і передуює подальшому вторгненню сухого та прохолодного повітря з півночі, яке за часом є більш тривалим і провокує настання посухи. Цей процес є найбільш несприятливим для сільського господарства саме в весняно-літній період.

3) Континентальний процес, в літній період пов'язаний з вторгненням прогрітого континентального повітря з Уралу. Цей процес відбувається на фоні різко вираженої меридіональності та утворення блокуючого антициклону (гребня) в тропосфері. На територію України

розповсюджується південна периферія потужного, теплого та високого антициклону, по якій поступає сухе та гаряче континентальне повітря. Процес є дуже стійким, постійна регенерація антициклону може тривати декілька тижнів поспіль, призводячи до утворення інтенсивних посушливих явищ на території Східної Європи.

1.2 Метеорологічні показники посух

Вологість ґрунту є ключовою змінною при класифікації посух. Відповідно до неї вологість ґрунту може розглядатися насамперед як індикатор сільськогосподарської посухи, так як вона в значній мірі контролює транспірацію і зростання рослин.

Пряме використання даних про вологість ґрунту для оцінки що відбуваються кліматичних змін посушливості глобального або континентального масштабів неможливо через крайньої обмеженості наявного обсягу інформації. Внаслідок цього для характеристики засух використовуються спеціальні індекси, засновані на даних стандартних метеорологічних спостережень, значення яких дозволяють ідентифікувати явище посухи і дають можливість судити про ступінь її суворості. Внаслідок того, що вихідним пунктом для всіх видів посух є дефіцит опадів, що приводить до нестачі води для різних видів діяльності, значення даної метеорологічної змінної входять в тому чи іншому вигляді в усі індекси посушливості. При цьому ряд індексів спирається тільки на критерії, пов'язані з оцінкою аномальності кількості опадів протягом обраного періоду часу.

Пошук критеріїв і розробка показників посух в наукових дослідженнях різних країн ведеться з 20-30-х років XX століття, що зумовило появу великої кількості вдалих і не дуже зручних і точних чисельних критеріїв. В ранньому огляді методів дослідження посушливих явищ Бучинського І.Є. [2] перш за все згадується загальноновживаний у вітчизняній метеорології гідротермічний коефіцієнт Г.Т. Селянинова, а також показники зволоженості за Несторовим В.Г. і Костіним С.І. (обидва залежать від температури повітря і дефіциту вологості в деякі строки та періоди спостережень), радіаційний індекс сухості М.І. Будико (пов'язаний з радіаційним балансом зволоженої поверхні),

показник посушливості за Н.В. Бова (залежить від кількості опадів, сум температур і запасів вологи в метровому шарі ґрунту на початку весни) та ін. В сучасних дослідженнях посух все частіше застосовуються показники, розроблені зарубіжними дослідниками та включені до різних систем моніторингу посух: індекс суворості посух Палмера та його модифікації, стандартизовані індекси опадів, вегетаційні супутникові індекси та похідні від них.

Розглянемо докладніше методику розрахунку деяких показників (індексів) посух, які показали свою надійність для визначення посух, набули широкого застосування сьогодні та використовуються в подальшому дослідженні.

Гідротермічний коефіцієнт (ГТК) був уведений Г.Т. Селяниновим в 30-ті роки XX століття і став найпопулярнішим показником посух у вітчизняній агрометеорології і досі має широке застосування, незважаючи на появу нових індексів.

Індекс являє собою відношення суми опадів (мм) за будь-який період календарного року до суми активних (тобто, які перевищують граничне значення 10 °C) середньодобових температур повітря за той же період року, помноженої на 0,1. При введенні ГТК автор виходив з того, що чисельне значення знаменника задовільно характеризує випаровуваність в теплі місяці. ГТК для окремих станцій обчислюється за формулою [2]

$$ГТК = \frac{\sum R}{0,1 \sum t}, \quad (1.1)$$

де $\sum R$ – сума місячних опадів, мм;

$\sum t$ – сума температур повітря за період з середньодобовими температурами вищими за +10°C (в межах того ж місяця), °C.

Г.Т.Селянінов запропонував вважати посушливим період, для якого ГТК <1,0, а сухим - коли ГТК <0,5.

Стандартизовані індекси опадів SPI та SPEI. Стандартизований індекс опадів SPI (the Standardized Precipitation index) широко використовується в зарубіжних дослідженнях і базується на оцінці режиму опадів в певні проміжки часу. Індекс SPI, рекомендований ВМО для

моніторингу посух [17], ґрунтується на використанні часових рядів місячних сум опадів. Набір даних по опадах береться для безперервного періоду, тривалість якого повинна бути не менша ніж 30 років. Набір періодів для усереднювання обирається для деяких масштабів часу, які, в залежності від розв’язуваної задачі, звичайно становлять 1, 3, 6, 12, 24 або 48 місяців.

Процедура розрахунку індексу передбачає попередній аналіз функції розподілу кількості опадів на обраному базовому інтервалі і її апроксимацію, що забезпечує можливість визначення ймовірності неперевикнення будь-якого спостережуваного значення кількості опадів

$$SPI = F^{-1}G(R), \quad (1.2)$$

де G – інтегральна функція гама-розподілу;

R – кількість опадів;

F – нормований гаусів розподіл.

Значенням індексу SPI є аномалія стандартизованого нормального розподілу, відповідна по ймовірності неперевикнення спостерігається значенням кількості опадів. Обчислені додатні значення SPI вказують на більшу, ніж в середньому, кількість опадів, від’ємні значення – навпаки. Індекс SPI може застосовуватися для моніторингу умов посушливості на будь-яких тимчасових інтервалах (від місяця до року і більше). Варіація масштабів осереднення дає можливість відстежувати за допомогою цього індексу метеорологічні, сільськогосподарські і гідрологічні посухи.

Індекс SPI може використовуватися в будь-якій місцевості для моніторингу як сухих, так і вологих періодів незалежно від ступеня аридності клімату, а також може обчислюватися для інших водних змінних, таких як сніговий покрив, вологоємність ґрунту, ґрунтові води.

Епізод посухи для певного масштабу часу визначається як період, в якому SPI є безперервно негативним і досягає значення $-1,0$ або менше. Посуха починається, коли SPI вперше знижується нижче за нуль і закінчується з позитивним значенням SPI, наступним за значенням $-1,0$ або менше.

Інтенсивність посухи або вологого періоду визначається за значеннями SPI відповідно до категорій, вказаних в табл. 1.1

Оскільки посуху, як комплексне явище, формує не лише режим опадів, але й температурний режим, врахування цього чинника повинно істотно підвищити якість такого індексу, як SPI. Ця задача була вирішена в роботах Вісенте-Серрано С.М. та ін. [16] шляхом врахування випаровуваності за допомогою показника евапотранспірації. Стандартизований індекс опадів-евапотранспірації SPEI (the Standardized Precipitation Evapotranspiration index) розраховується за процедурою, аналогічною розрахунку SPI [7] та використовується згідно аналогічних для SPI критеріїв (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Критерії для інтерпретації індексів SPI, SPEI [17]

Значення SPI, SPEI	Категорія
$\geq 2,00$	Екстремально вологий період
1,50 – 1,99	Дуже вологий період
1,00 – 1,49	Помірно вологий період
0,00 – 0,99	Зволоження близько норми
-0,99 – 0,00	М'яка посуха
-1,49 – -1,00	Помірна посуха
-1,99 – -1,50	Сильна посуха
$\leq -2,00$	Екстремальна посуха

У світовій практиці для стеження за зміною умов посушливості на тривалих часових інтервалах найбільш широко використовується індекс Палмера PDSI (Palmer Drought Severity Index) [9, 11]. Розрахунок цього показника базується на використанні метеорологічних даних (температури повітря і опадів), а також локальних констант, що характеризують вологоємність ґрунту. На основі цих вхідних величин за допомогою спрощеної схеми вологопереносу в ґрунті визначаються реальні та потенційні значення евапотранспірації, а також інші складові водного балансу, і розраховується індекс PDSI (Palmer Drought Severity Index).

Залежно від величини PDSI Палмер визначив відповідні категорії посухи (табл. 1.2).

Індекс посушливості Палмером був розроблений для умов території США, при цьому він довільно вибрав масштаб класифікації режимів вологості, заснованих на його спостереженнях в областях дослідження в центральному Канзасі і західній Айові. Але в подальшому були проведені об'єктивні оцінки індексу в глобальному масштабі, які показали задовільну узгодженість з агрометеорологічними та гідрологічними посухами.

Таблиця 1.2 – Критерії посухи за індексом інтенсивності посухи Палмера [8]

Значення PDSI	Категорія посухи
$-2 \leq \text{PDSI} < -1$	Слабка посуха
$-3 \leq \text{PDSI} < -2$	Помірна посуха
$-4 \leq \text{PDSI} < -3$	Інтенсивна посуха
$\text{PDSI} \leq -4$	Екстремальна посуха

1.3 Просторово-часовий розподіл посух в Україні

Посушливі явища є вельми поширеними на території України. Тривалі бездошові періоди можуть спостерігатися в усіх агрокліматичних зонах (рис. 1.1) країни, при цьому кількість безперервних посушливих періодів в теплий сезон року коливається від 3 на північному заході до 6 на півдні [3]. В окремі роки максимальна кількість посушливих періодів може доходити до 8-10. Середня тривалість окремого посушливого періоду становить від 9-11 днів на Поліссі та в Лісостепу й до 12-16 днів у Степу. Посушливі періоди тривалістю 10-20 днів, що відповідають атмосферній посусі, мають повторюваність 18-27%. Посушливі періоди тривалістю 31-40 днів мають повторюваність до 5% у Поліссі та Лісостепу і до 8% у Степу. Максимальна тривалість посушливих періодів в Україні становить 94 та 100 днів (відповідно, Полтава та Херсон). Збільшення максимальної тривалості

бездощових періодів з півночі на південь пов'язана, перед усе, з впливом атмосферних циркуляційних процесів. В теплий період року посушливі періоди розподіляються майже рівномірно по періодах квітень-липень та серпень-жовтень. В першу половину найдовша тривалість спостерігається в квітні травні (від 12-15 днів на північному заході до 40 днів на півдні). В другу половину спостерігаються більш тривалі посушливі періоди, що пов'язано зі значним впливом антициклонального характеру циркуляції.

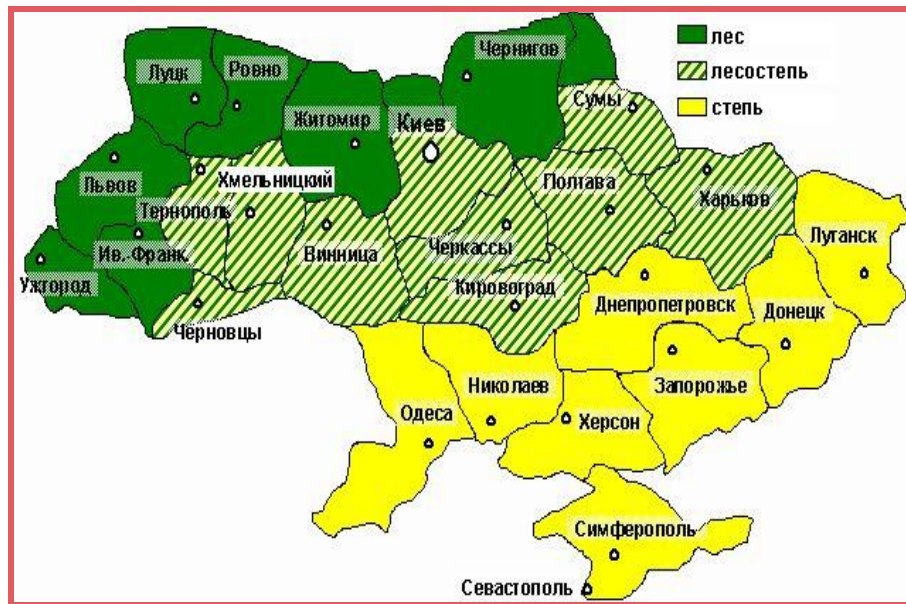


Рис. 1.1. – Агрокліматичні зони України: Степ, Лісостеп, Полісся (Ліс), з відповідними адміністративними областями

Повторюваність різних типів посух на території України по сезонах раніше була проведена Бучинським І.Є. [2] за багаторічним рядом спостережень за 98 років (1871-1972 рр.) по 47 станціях. Площа обхвату посухою обчислювалася по відношенню до площі території України. Прийнято, що при обхваті посухою від 1 до 10% площі посуха носить локальний характер, 11-20% території – посуха поширена, 21-50% посуха вельми поширена, при площі понад 50% посуха вважалася катастрофічною. Найбільша ймовірність весняних посух (51-60%) спостерігається у вузькій смузі, що примикає до Сивашу та Каркинитської затоки. Північніше, до лінії Херсон, Нижні Серогози, Мелітополь, Бердянськ, та південніше до лінії Джанкой, Стегущий, ймовірність посухи складає 40%. На північ розташована зона з ймовірністю 30%, її границя проходить вздовж лінії Ізмаїл, Сербка, Баштанка, Запоріжжя, Донецьк. Далі на північ та північний

схід ймовірність посух різко зменшується, досягаючи 1-3% в західних областях (Тернопіль, Ужгород, Чернівці).

Літні посухи в Україні спостерігаються майже щорічно, їх ймовірність складає 98%. Найбільша ймовірність в приморських районах, та поступово зменшується на північ і північний захід до 4-10%.

Осінні посухи спостерігаються рідше, ніж весняні та літні, але їх ймовірність в приморських районах досягає 40-50% та поступово знижується на 10-20% на північ. Північніше лінії Київ-Вінниця-Чернівці ймовірність складає 2-3%, на захід від лінії Чорнобиль, Житомир, Тернопіль осінніх засух не спостерігалось взагалі.

В каталозі посух, складеному Барабаш М.Б. та Ємельяновою Ж.Л. [1] по даних про значення ГТК по станціях України за 1900-1986 рр. в весняно-літній період було виявлено 30 посух з розповсюдженням понад 30% від площі території країни. По ймовірності виникнення посух з врахуванням їх інтенсивності виділено декілька районів. Район 1 включає територію південного Степу, що прилягає до Чорного та Азовського морів – це південна половина Дніпропетровської, Донецької, Одеської, Запорізької, Миколаївської, Херсонської областей та північ Криму. В цих районах посушливі умови є невід’ємною частиною клімату та ймовірність їх виникнення складає 70%. Сильні посухи тут відбуваються 1 раз на 10 років, слабкі – 1 раз в 4 роки.

Район 2 включає східну та центральну частини Лісостепу, а також північний Степ (Полтавська, Харківська, Луганська, Кіровоградська області, а також північна частина Дніпропетровської, Миколаївської та Херсонської областей). Тут ймовірність посух складає 45-60%. При цьому сильні посухи можуть спостерігатися 1 раз на 15-20 років, слабкі посухи бувають 1 раз в 4 роки.

В Район 3 входить територія Лісостепу, що примикає до Полісся – це Сумська, Київська, Черкаська та Вінницька області. Ймовірність посух в цьому районі складає всього близько 30%, посушливі умови тут виникають приблизно 1 раз на 10 років, а ймовірність сильної посухи складає 1-2%.

Найсильніші посухи в Україні з 70-х років та до кінця минулого століття відзначалися у 1972, 1975, 1979, 1983, 1986, 1996 та 1999 рр. Всі

вони починалися з тривалої атмосферної посухи, а збитковість становила понад 30% недобору врожаю.

За даними Семенової І.Г. [8], наприкінці ХХ століття початку ХХІ століття, за період 1995-2012 рр. просторово-часовий розподіл посух в теплий період року мав наступні риси. Згідно розподілу повторюваності ГТК $\leq 1,0$ площа з повторюваністю критерію понад 80% займає південні області України, для яких протягом майже всього сезону притаманно переважання посушливих місяців. Для центральних і східних областей повторюваність посушливих місяців складає 60-80%, в північних та західних областях зменшується до 40%. Повторюваність місяців з посухою при ГТК $\leq 0,5$ найбільша в південних областях – Одеській, Херсонській, Запорізькій та АР Крим, де складає 60-70%, тобто майже дві третини місяців в розглянутих теплих сезонах були з посухою. Межа з 50% повторюваністю посух проходить приблизно вздовж 47° пн.ш., охоплюючи південні і центральні області. На заході та півночі України повторюваність посух значно зменшується, до 20-30%. Повторюваність екстремальної посухи при ГТК $\leq 0,3$ складає 20-40% для тих же південних областей, на більшій частині повторюваність не перевищує 10-20%, в Карпатському регіоні знижується до нуля.

Аналіз просторово-часового розподілу посух на території України за допомогою індексу Палмера в роботі [10] дозволив виявити деякі особливості в двох часових проміжках: 1943–1972 рр. і 1973–2002 рр. (рис. 1.2). Для першого періоду максимальна кількість місяців з посухою припадає на центральні, східні та, частково, західні регіони України, а саме: Хмельницьку області (210–240 місяців), Київську і Черкаську області (240–270 місяців), Харківську, Донецьку і Луганську області (210–240 місяців).

Мінімальна кількість місяців з посухою має місце у Приазов'я та Вінницької області і становить приблизно 30–60 місяців. За другий період з 1973 р. по 2002 р. найбільша кількість місяців з посухою спостерігалася у Хмельницькій обл. і на півдні Одещини (240–270 місяців), а найменша – у Вінницькій, Луганській області і на півночі Сумської області (0–30 місяців). На рис. 1.2, в зображено поле, що відображає динаміку зміни кількості місяців з посухою на території України. З нього витікає, що для деяких областей засухи спостерігаються набагато частіше, ніж для інших.

Наприклад, у Львівській, Тернопільській, Івано-Франківській та Закарпатській областях протягом 1943–1972 рр. спостерігалось тільки 30-35 місяців з засухами, а на півдні Запорізької та Донецької областей – 55-60 місяців, тобто майже удвічі більше [4].

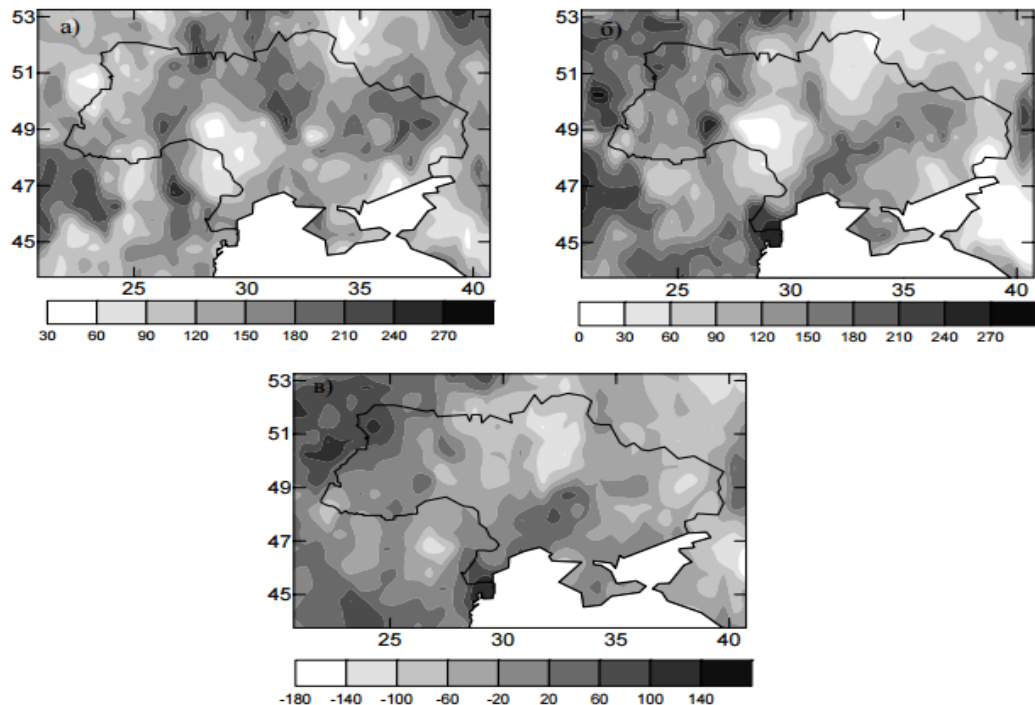


Рис. 1.2 - Повторюваність місяців з посухою для періодів 1943-1972 рр. (а), 1973-2002 рр. (б) та різниця між ними (в) [10]

Відмічено, що між двома періодами над півднем та центром України відбулися значні зміни у повторюваності посух. У цих регіонах протягом першого тридцятирічного періоду мав місце мінімум кількості засушливих місяців, а протягом другого – максимум. Над південним сходом України максимум повторюваності, навпаки, змінився на мінімум. Аналогічним чином змінилася й середня тривалість засух над півднем України [10].

Аналіз повторюваності сезонних посух, що спостерігалися протягом вегетаційного періоду (квітень-жовтень) у 1995-2012 рр. був проведений у роботі [7]. Визначено декілька років з сезонними посухами, які охоплювали принаймні дві з трьох агрокліматичних зон, що дозволяє відносити ці посухи до сильних по площі розповсюдження. У весняно-літній період по всіх трьох зонах посуха спостерігалася у 2000, 2003 та 2007 роках, при цьому вона досягала сильної та екстремальної інтенсивності. В двох зонах одночасно посуха спостерігалася у 1996, 2009 та 2012 роках, переважно слабкої та

помірної інтенсивності. Влітку три зони були охоплені посухою у 1999 році, по дві зони у 2007, 2009, 2010 та 2012 роках, при цьому в 2007 та 2009 роках посуха досягала критеріїв сильної, в інших - переважно м'якої. В літньо-осінній період посуха охоплювала всі три зони у 2005, 2009 та 2011 роках, по дві зони у 2001, 2007 та 2012 роках. При цьому у 2005 р. посуха за інтенсивністю досягла критеріїв сильної та екстремальної, у 2011 р. була помірною, в інших роках - м'якою.

Таким чином, територія України регулярно піддається впливу посух різної тривалості та інтенсивності в теплий період року, що потребує подальшого розвитку методик моніторингу посух для завчасного передбачення посушливих епізодів.

2 ПРИНЦИПИ ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКОВИХ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПОСУХ

В сучасних гідрометеорологічних дослідженнях провідне місце займають напрями з використанням продуктів супутникового зондування атмосфери та підстильної поверхні, які відрізняються високою просторово-часовою роздільною здатністю, широким спектром пристосування для вирішення різноманітних задач та зручністю використання в оперативних умовах. Зокрема, супутникова інформація використовується в моніторингу стану підстильної поверхні та рослинного покриву з метою визначення типу рослинності, умов вегетації, стану і динаміки розвитку сільськогосподарських культур, оцінки продуктивності і прогнозуванні врожайності.

Для дослідження рослинного покриву використовують зв'язок спектральної відбивної здатності в різних діапазонах електромагнітного випромінювання зі структурою та станом рослинності. На основі цих спектральних залежностей будуються так звані вегетаційні індекси, за якими, як мінімум, можна відрізнити рослинний покрив від підстильної поверхні та встановлювати стан рослинності в залежності від її водності, пігментації, фотосинтетичної активності тощо. Оскільки стан рослинності напрямок залежить від погодних умов, вегетаційні індекси можна вважати об'єктивними критеріями посушливості і використовувати для моніторингу посух [6].

Посуха є типовим явищем клімату Землі. Втрати від посухи як правило, вражають. Середньорічна вартість посухи в Сполучених Штатах Америки, країни передової технології, становить близько 6 млрд. Однак, в екстремальні роки посухи, таких як 1988 р., вартість посухи була в 7,55 раз більше. В останні роки великомасштабні інтенсивні посухи були зареєстровані по всій Земній кулі. Країни Африки та Азії, що розвиваються, постраждали найбільше. Наприклад, район Африканського Рогу зазнавав посухи 6 років поспіль, що призвело до серйозної нестачі продовольства. Пасовища в Монголії також постраждали від дуже інтенсивних посух, через відсутність корму для худоби. Надзвичайні літні посухи також торкнулися нових країн (з

колишнього СРСР) з регіонів Чорного і Каспійського морів. На заході США відчували викликані посухою лісові пожежі протягом декількох років. У 2003 і 2007 рр. майже 20% світових земель потерпіли від посухи.

Система моніторингу посухи має свої недоліки [13]. Дані про погоду представляють конкретне місце, а не область, а також метеорологічні станції, які не рівномірно розподілені. Навіть в Сполучених Штатах, з добре розвиненою метеорологічною мережею, щільність розміщення станцій не достатня, щоб охарактеризувати регіональну посуху. Наприклад, в Південній Дакоті одна метеостанція зазвичай використовується для моніторингу посухи на 1-2 мільйонів гектарів орних земель. В Україні 180 метеорологічних станцій охоплює 0,8 млн акрів землі. Проблема недостатньої щільності станцій особливо гостро стоїть в таких регіонах як Африка, Азія, Центральна і Південна Америка.

Для оцінки умов посушливості по супутниках даними в сезон вегетації найбільш часто використовується вегетаційний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [6, 9, 14]. Цей індекс визначається як різниця вимірних значень інтенсивності відбитого випромінювання в червоному і ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах, нормована на суму цих величин. Індекс NDVI розраховується за наступною формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (2.1)$$

де NIR – відбиття в ближній інфрачервоній області спектру,

RED – відбиття в червоній області спектру.

Поняття спектрального індексу NDVI базується на тому факті, що здорова рослинність загалом має низьку відбивну здатність видимої частини електромагнітного спектра завдяки абсорбції рослинними пігментами, головним чином, хлорофілом. Одночасно зелене листя має високу відбивну здатність в ближньому інфрачервоному спектрі (рис. 2.1).

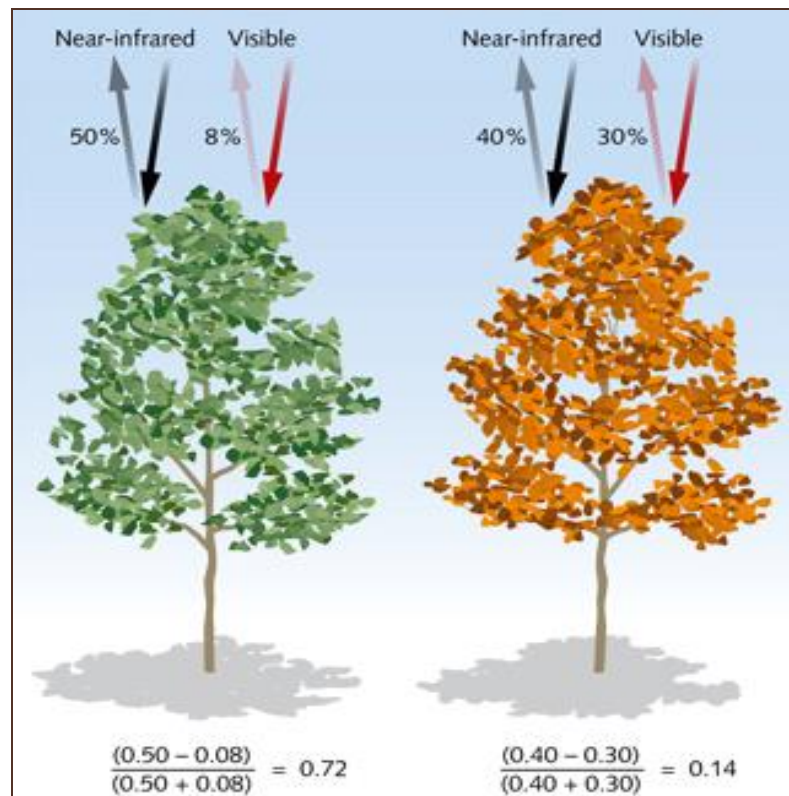


Рис. 2.1 - Принцип формування індексу NDVI відбивними потоками випромінювання у видимому (Visible) і ближньому інфрачервоному (Near-infrared) діапазонах зондування

Значення індексу пропорційне загальній зеленій фітомасі і звичайно коливається в межах 0,20-1,00. Стан рослинності можна визначити згідно критеріїв, наведених в табл. 2.1 [8].

Таблиця 2.1 - Критерії розпізнавання стану рослинності за значеннями NDVI

Значення NDVI	Стан рослинності
0,71 -1,00	дуже добрий
0,56 - 0,70	добрий
0,41- 0,55	задовільний
0,31 - 0,40	поганий
0,21 - 0,30	пригнічений

Зважаючи на всі переваги використання нормалізованого вегетаційного індексу для моніторингу рослинності та посух, слід враховувати його залежність від температури підстильної поверхні і обмежувати його

застосування тими регіонами і часовими інтервалами, де вологозабезпеченість є головним фактором, що зумовлює приріст рослинності [6].

За останні 20 років, NOAA розробила нові індекси на основі даних радіометра AVHRR, які показали успіх при застосуванні до виявлення посухи [16].

На відміну від інших методів дистанційного зондування, новий метод і система використовує багатоспектральні дані і основні закони екосистеми для аналізу рослинності у відповідь на зміни погоди. Протягом 8 років цей метод був протестований і ретельно перевірений на наземних даних в усіх основних сільськогосподарських країнах світу і виявився відмінною утилітою для раннього виявлення посухи, точного моніторингу її розвитку і впливу на сільське господарство, пасовища і лісове господарство.

Новий вегетаційний метод заснований на оцінці зеленого покриву зі стресом (без стресу) від показників AVHRR, що характеризують вологість, температурні умови і загальну життєздатність рослинності. На відміну від підходу двох спектральних каналів (на основі NDVI), новий метод на додаток до NDVI, також використовує BT від 10.3-11.3 Pm IR4 каналу, який оцінює жаркість рослинного покриву. У сухі роки, високі температури в поєднанні з дефіцитом води, що призводить до перегріву, інтенсифікує негативний вплив дефіциту вологи на рослинність.

Алгоритм трьох каналної обробки інформації складається з комплексної переробки річних часових рядів NDVI і BT (радіояркісна температура), яка включає в себе повне видалення високочастотних шумів, підвищення сезонного циклу, розрахунок кліматології і виділенням коливання середньо-низької частоти, пов'язані з погодними впливом на рослинність [15]. Ця процедура була формалізована за формулами (2.2) – (2.4), де була представлена кліматологічна різниця між 22-річним абсолютним максимумом і мінімальними значеннями як NDVI і BT для кожного пікселя і тижні.

Індекс стану рослинності розраховують за такою формулою:

$$VCI = 100 * (NDVI - NDVI_{min})(NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (2.2)$$

де NDVI, $NDVI_{max}$ и $NDVI_{min}$ - згладжений щотижневий NDVI та багаторічний абсолютний максимум і мінімум, відповідно;

Індекс стану температури розраховують за такою формулою:

$$TCI = 100 * (BT_{max} - BT) / (BT_{max} - BT_{min}) \quad (2.3)$$

де BT, BT_{max} и BT_{min} - згладжений щотижневий BT та багаторічний абсолютний максимум і мінімум, відповідно;

Індекс здоров'я рослинності розраховують за такою формулою:

$$VHI = a * VCI + b * TCI \quad (2.4)$$

де a і b = 1 - коефіцієнти кількісної оцінки частки VCI та TCI, внесок в загальну життєздатність рослинності;

VCI, TCI, VHI є, відповідно, індексами оцінки кумулятивної вологи, температури і загального стану життєздатності рослинності, за шкалою від нуля (крайнього стресу) до 100 (сприятливі умови) і з 50, що відповідає середнім умовам вегетації [15].

3 ДИНАМІКА ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ NDVI ТА VCI ПО ПІВДЕННОМУ ЗАХОДУ УКРАЇНИ

3.1 Вихідні дані та методи аналізу

В даному дослідженні проведено аналіз часового ходу та статистичних характеристик супутникових вегетаційних індексів NDVI і VCI по трьом областям південного заходу (Одеської, Миколаївської та Херсонської) України, які належать до найбільш посушливої, степової агрокліматичної зони. Розглядалися теплі сезони (квітень-вересень) періоду 1985-2015 рр., який характеризувався різкими коливаннями повторюваності посушливих та вологих років.

В якості вихідних були використані щотижневі дані значень NDVI і VCI, осереднених по відповідним адміністративним областям, які обрані з бази даних NOAA STAR (Center for Satellite Applications and Research) – Global Vegetation Health Products (<https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH>) (рис.3.1).

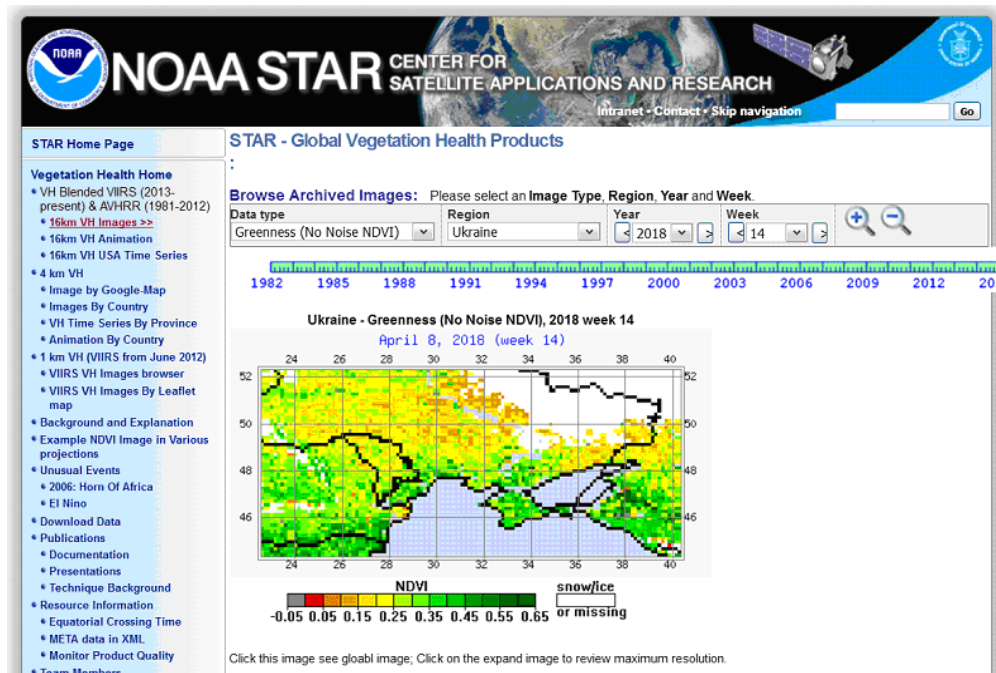


Рис. 3.1 - Приклад веб-сторінки з доступом до вихідних даних Global Vegetation Health Products

Стандартні статистичні характеристики досліджуваних рядів індексу NDVI та VCI розраховувались за формулами, які наведені у підручнику «Методи обробки та аналізу гідрометеорологічної інформації» [13].

Sx^2 – незсунена, ефективна та умотивована оцінка дисперсії випадкової величини X розраховується як:

$$Sx^2 = \frac{n}{n-1} \widehat{\mu}_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k (\widehat{x}_i - \bar{x})^2 m_i \quad (3.1)$$

S_x – незсунена, ефективна та умотивована оцінка середнього квадратичного відхилу розраховується як:

$$S_x = \sqrt{S_x^2} \quad (3.2)$$

Як відомо, оцінка третього основного моменту характеризує асиметрію кривої розподілу інтервальних частотей (або частот) і називається коефіцієнтом асиметрії: $\widehat{r}_3 = A_s$.

Крива розподілу має правосторонню асиметрію за умови $A_s > 0$, лівосторонню – за умови $A_s < 0$. Вона є симетричною відносно центру розподілу, якщо $A_s = 0$, та розраховується за формулою:

$$\widehat{r}_3 = \frac{\widehat{\mu}_3}{S_x^3} \quad (3.3)$$

$\bar{x}$ - середнє значення, яке розраховується за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \widehat{v}_l = \widehat{m}_x \quad (3.4)$$

Мода (M_0) - значення випадкової величини, що зустрічається частіше усього, тобто має максимальну ймовірність для дискретної величини або максимум функції щільності ймовірності в даній точці для безперервної випадкової величини. Розраховується за формулою:

$$M_o = x_0 + c \frac{(m_i - m_{i-1})}{(2m_i - m_{i-1} - m_{i+1})} \quad (3.5)$$

де x_0, c, m_i – відповідно початок, довжина та емпірична частота модального інтервалу;

m_{i-1}, m_{i+1} – частоти попереднього і наступного за модальним часткових інтегралів.

Медіана (M_e) – значення випадкової величини, яке розділяє область існування цієї величини на дві частини, для яких виконується рівність:

$$P(X > M_e) = P(X < M_e),$$

тобто ймовірність того що значення випадкової величини X більше медіани, дорівнює ймовірності того, що значення випадкової величини X менше медіани.

Медіану розраховують за такою формулою:

$$M_e = x_e + \frac{c(\frac{n}{2} - m^*)}{m_e} \quad (3.6)$$

де n - об'єм вибірки (за умови непарного значення об'єму береться $n+1$);
 m^* - накопичена частота до медіанного інтервалу;
 x_e, c, m_e - відповідно початок, довжина та частота медіанного інтервалу.

3.2 Часовий хід NDVI та VCI

В даному розділі розглянуті результати аналізу часових змін та статистичних характеристик вегетаційного індексу NDVI по окремих місяцях теплого сезону періоду 1985-2015 рр.

На рис. 3.2 – 3.7 представлені графіки часового ходу вегетаційного індексу NDVI в південно-західних (Одеській, Херсонській, Миколаївській) областях України, з нанесеним лінійним трендом.

В квітні (рис. 3.2) в усіх областях за лінією лінійного тренду спостерігалось зростання індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум NDVI спостерігався в 1987 р. та коливався в межах 0,07-0,09. Максимальні значення NDVI становили від 0,38 до 0,43 і припали на 2008 р. по всім трьом

областям. За лінією тренда осереднені значення NDVI у всіх областях підвищилися протягом досліджуваного періоду приблизно на 0,09- 0,15.



Рис. 3.2 – Часовий хід індексу NDVI в квітні по областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)

В травні (рис. 3.3) в усіх областях спостерігалось зростання індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум NDVI спостерігався в 1987 р. та коливався в межах 0,18-0,21. Максимальні значення NDVI становили від 0,32 до 0,36 і припали на 2008 р. в Миколаївській області, та на 2014 р. в Одеській та Херсонській областях. За лінією тренда осереднені значення NDVI у всіх областях підвищилися протягом досліджуваного періоду приблизно на 0,08-0,15.



Рис. 3.3 – Часовий хід індексу NDVI в травні по областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)

В червні (рис. 3.4) в усіх областях спостерігалось зростання індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум NDVI спостерігався в 2004 р. та коливався в межах 0,14-0,16. Максимальні значення NDVI становили від 0,37 до 0,41 і припали на 2008 р. в Миколаївській області, на 2013 р. в Одеській області та на 1998 р. в Херсонській області. За лінією тренда осереднені значення NDVI у всіх областях незначно підвищилися протягом досліджуваного періоду приблизно на 0,01- 0,05.



Рис. 3.4 – Часовий хід індексу NDVI в червні по областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)

В липні (рис. 3.5) в усіх областях, як і в попередніх місяцях, спостерігалось зростання індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум NDVI спостерігався в 2007 р. та складав 0,23.



Рис.3.5 – Часовий хід індексу NDVI в липні по областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)

Максимальні значення NDVI становили від 0,36 до 0,41 і припали на 1998 р. в Одеській області, та на 2010 р. в Миколаївській та Херсонській областях. За лінією тренда осереднені значення NDVI у всіх областях незначно підвищилися протягом досліджуваного періоду (на 0,01- 0,05).

В серпні (рис. 3.6) в усіх областях спостерігалось слабе зростання індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум NDVI спостерігався в 1989 р. та складав 0,18. Максимальні значення NDVI становили від 0,33 до 0,35 і припали на 1998 р. в Одеській області, та на 2004 р. в Миколаївській та Херсонській областях. За лінією тренда осереднені значення NDVI у всіх областях незначно підвищилися протягом досліджуваного періоду приблизно на 0,01- 0,07.



Рис. 3.6 – Часовий хід індексу NDVI в серпні по областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)

В вересні (рис. 3.7) в усіх областях спостерігалось незначне зростання індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум NDVI спостерігався в 1994 р. та складав 0,05. Максимальні значення NDVI становили від 0,28 до 0,33 і припали на 1997 р. в Одеській області, та на 2004 р. в Миколаївській та Херсонській областях. За лінією тренда осереднені значення NDVI у всіх областях підвищилися протягом досліджуваного періоду приблизно на 0,01- 0,04.

Далі розглянемо результати аналізу часового ходу індексу VCI по окремих місяцях теплого сезону періоду 1985-2015 рр., які, загалом, повинні повторювати часовий хід NDVI.



Рис. 3.7 – Часовий хід індексу NDVI в вересні по областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)

На рис. 3.8-3.13 представлені графіки часового ходу VCI по південно-західних (Одеській, Херсонській, Миколаївській) областях України.

В квітні (рис. 3.8) в усіх областях за лінією лінійного тренду спостерігалось зростання індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум VCI спостерігався в 1987 р. та коливався в межах 0,5-4,7%, що вказує на екстремально посушливий квітень в цьому році. Максимальні значення VCI становили від 84,6 до 94,5% і припали на 2008 р. в Одеській та Миколаївській областях, та на 1990 р. в Херсонській області. За лінією тренда осереднені значення VCI у всіх областях підвищилися на 30-53%, з максимумом в Одеській області.



Рис. 3.8 – Часовий хід VCI в квітні по областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)

В травні (рис. 3.9) в усіх областях також спостерігалось зростання індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум VCI спостерігався в 1987 р. та коливався в межах 2,1-10,0%, що вказує на екстремально посушливий травень в цьому році. Максимальні значення VCI становили від 81,9 до 93,4% і припали на 2008 р. в Одеській області, на 2007 р. в Миколаївській області, та на 1999 р. в Херсонській області. За лінією тренда осереднені значення VCI у всіх областях підвищилися на 15-51%, з максимумом в Одеській області.



Рис. 3.9 – Часовий хід VCI в травні по областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)

В червні (рис. 3.10) в усіх областях також відмічалось зростання індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум VCI спостерігався в 2007 р. та коливався в межах 13,4-26,2%, що вказує на посушливий червень в цьому році. Максимальні значення VCI становили від 81,7 до 83,7% і припали на 2013 р. в Одеській області, на 2008 р. в Миколаївській області, та на 1998 р. в Херсонській області. За лінією тренда осереднені значення VCI у всіх областях підвищилися на 9-33%, з максимумом в Одеській області.

В липні (рис. 3.11) в усіх областях спостерігалось зростання індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум VCI спостерігався в 2007 р. та коливався в межах 10,3-23,2%. Максимальні значення VCI становили від 82,8 до 90,3% і припали на 1998 р. в Одеській області, на 2010 в Миколаївській та в Херсонській областях. За лінією тренда осереднені значення VCI у всіх областях підвищилися на 11-28%, з максимумом в Миколаївській області.



Рис. 3.10 – Часовий хід VCI в червні пл областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)



Рис. 3.11 – Часовий хід VCI в липні по областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)

В серпні (рис. 3.12) в усіх областях також відмічено підвищення індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум VCI спостерігався в 1989 р. та коливався в межах 12,7-24,7%, що вказує на посушливий серпень в цьому році. Максимальні значення VCI становили від 81,6 до 89,6% і припали на 1998 р. в Одеській області, на 2004 р. в Миколаївській та в Херсонській областях. За лінією тренда осереднені значення VCI у всіх областях підвищилися на 10-63%, з максимумом в Одеській області.

В вересні (рис. 3.13) в усіх областях спостерігалось слабе зростання індексу протягом досліджуваного періоду. Мінімум VCI спостерігався в 1992 р. та коливався в межах 11,3-13,1. Максимальні значення VCI становили від

83,3 до 89,5% і припали на 1997 р. в Одеській області, на 2004 в Миколаївській та в Херсонській областях. За лінією тренда осереднені значення VCI в усіх областях підвищилися незначно, на 3-10%, з максимумом в Херсонській області.



Рис. 3.12 – Часовий хід VCI в серпні по областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)



Рис. 3.13 – Часовий хід VCI в вересні по областях південного заходу України (Одеській, Херсонській, Миколаївській) за період 1985-2015 рр. (пряма – лінія тренду)

3.3 Аналіз статистичних характеристик NDVI та VCI

В табл. 3.1-3.3 представлені результати розрахунків статистичних характеристик NDVI по досліджуваних областях.

В Одеській області (табл. 3.1) мінімальні значення NDVI коливалися від 0,00 в квітні і травні в 2004 р. до 0,23 в липні в 2007 р. Максимальні значення коливалися від 0,28 у серпні до 0,43 у травні. Загалом, найвищі значення NDVI припадають на травень та квітень. Модальні значення показують, що протягом травня-липня показники NDVI найбільш високі і найчастіше повторюються в межах 0,35-0,38, в квітні значення найбільш низькі, а в серпні та вересні показники NDVI різко знижуються та близькі один до одного: 0,21-0,27. Значення медіани коливається від 0,22 до 0,35. Дисперсія NDVI коливається в межах 0,001 – 0,007, а стандартне відхилення – в межах 0,04-0,08, при цьому найбільший розкид даних характерний для квітня та травня, що вказує на нестійкий характер погодних умов весняних місяців, який обумовлює стан розвитку рослинного покриву. Середні величини NDVI найменші в квітні та вересні – 0,22, та найвищі в червні – 0,35. В усі місяці спостерігається від’ємна асиметрія, що свідчить про те, що модальні (найбільш повторювані) значення NDVI більші за середні.

Таблиця 3.1 - Статистичні характеристики NDVI в Одеській області в тепле півріччя 1985-2015 рр.

Місяць	min.	max.	M_o	M_e	S_x	S_x^2	$\bar{x}$	$\overline{r_3}$
Квітень	0,00	0,36	0,18	0,23	0,08	0,007	0,22	-0,51
Травень	0,00	0,43	0,37	0,32	0,08	0,007	0,32	-1,97
Червень	0,16	0,41	0,40	0,35	0,05	0,003	0,35	-1,67
Липень	0,23	0,38	0,35	0,32	0,04	0,002	0,32	-0,33
Серпень	0,21	0,34	0,31	0,27	0,04	0,001	0,27	-0,08
вересень	0,06	0,28	0,22	0,22	0,04	0,002	0,22	-1,32

В Миколаївській області (табл. 3.2) мінімальні значення NDVI коливалися від 0,00 в квітні і травні в 2004 р. до 0,23 в липні 2007 р. Максимальні значення коливалися від 0,26 у вересні до 0,39 у червні. Модальні значення показують, що протягом травня-липня показники NDVI найбільш високі і найчастіше повторюються в межах 0,33-0,38, в вересні значення найбільш низькі, а в серпні та вересні показники NDVI різко знижуються до 0,21-0,26. Значення медіани коливається від 0,22 до 0,36. Дисперсія NDVI коливається в межах 0,001 – 0,006, а стандартне відхилення – в межах 0,04-0,08, при цьому найбільший розкид даних характерний з

квітня по червень, що вказує на нестійкий характер погодних умов навесні та на початку літа. Середні величини NDVI найменші в квітні та вересні – 0,20, та найвищі в червні – 0,34. В усі місяці спостерігається від’ємна асиметрія, що свідчить про те, що модальні (найбільш повторювані) значення NDVI більші за середні.

Таблиця 3.2 - Статистичні характеристики NDVI в Миколаївській області в тепле півріччя 1985-2015 рр.

Місяць	min.	max.	M_0	M_e	S_x	S_x^2	$\bar{x}$	$\bar{r}_3$
квітень	0	0,31	0,24	0,21	0,07	0,005	0,20	-0,74
травень	0	0,39	0,33	0,32	0,08	0,006	0,30	-2,54
червень	0,15	0,39	0,32	0,36	0,05	0,003	0,34	-1,68
липень	0,23	0,38	0,33	0,32	0,04	0,002	0,31	-0,32
серпень	0,18	0,32	0,29	0,26	0,04	0,001	0,26	-0,22
вересень	0,05	0,26	0,21	0,21	0,04	0,002	0,20	-1,64

В Херсонській області (табл. 3.3) мінімальні значення NDVI коливалися від 0,00 в квітні і травні в 2004 р. до 0,23 в липні 2007 р. Максимальні значення коливалися від 0,30 у вересні до 0,38 у червні. Модальні значення показують, що протягом травня та червні показники NDVI найбільш високі і найчастіше повторюються в межах 0,33, в вересні значення найбільш низькі, а в червні та липні показники NDVI незначно знижуються, до 0,27-0,33. Значення медіани коливається від 0,20 до -0,32. Дисперсія NDVI коливається в межах 0,0004 – 0,005, а стандартне відхилення – в межах 0,02-0,07, при цьому найбільший розкид даних характерний для травня і червня, що вказує на нестійкий характер погодних умов весняних та літніх місяців, який обумовлює стан розвитку рослинного покриву. Середні величини NDVI найменші у вересні – 0,20, та найвищі в червні – 0,31. З квітня по червень та у вересні спостерігається від’ємна асиметрія, що свідчить про те, що модальні (найбільш повторювані) значення NDVI більші за середні, а у липні та серпні модальні значення NDVI менші за середні.

Загалом, по всіх трьох областях статистичні характеристики NDVI близькі за величиною та характером розподілу по місяцях.

В табл. 3.4-3.6 представлені результати розрахунків статистичних характеристик VCI по областях.

Таблиця 3.3 - Статистичні характеристики NDVI в Херсонській області в тепле півріччя 1985-2015 рр.

Місяць	min.	max.	M ₀	M _e	S _x	S _x ²	$\bar{x}$	$\bar{r}_3$
Квітень	0	0,32	0,29	0,23	0,07	0,005	0,22	-1,11
Травень	0	0,38	0,33	0,32	0,07	0,005	0,30	-2,89
Червень	0,2	0,37	0,31	0,31	0,04	0,002	0,31	-1,89
Липень	0,2	0,36	0,27	0,27	0,03	0,001	0,28	0,43
Серпень	0,2	0,33	0,21	0,23	0,03	0,001	0,24	0,41
Вересень	0,2	0,30	0,20	0,20	0,02	0,0004	0,20	-0,31

В Одеській області (табл. 3.4) мінімальні значення VCI коливалися від 4,7% в квітні в 1985 р. до 26,2% в червні в 1986 р. Максимальні значення коливалися від 81,6% у серпні до 94,5% у квітні. Загалом, найвищі значення VCI припадають на травень та квітень. Модальні значення показують, що в червні показник VCI найбільш високий і складає 76,9%, в серпні значення найбільш низькі – 33,9%, в липні і вересні показники VCI близькі один до одного 37,9–39,8%. Значення медіани коливається від 46,3% до 60,5%.

Таблиця 3.4 - Статистичні характеристики VCI в Одеській області в тепле півріччя 1985-2015 рр.

Місяць	min.	max.	M ₀	M _e	S _x	S _x ²	$\bar{x}$	$\bar{r}_3$
Квітень	4,7	94,5	-	53,3	26,8	718,8	51,6	-0,2
Травень	10,0	93,6	45,4	55,2	23,9	572,4	55,7	-0,5
Червень	26,2	82,2	76,9	60,5	17,7	311,8	57,8	-0,3
Липень	10,3	82,8	37,9	54,4	18,1	328,9	54,2	-0,4
Серпень	17,4	81,6	33,9	49,2	18,7	350,7	50,7	0,1
вересень	13,1	83,3	39,8	46,3	18,6	344,2	46,9	0,3

Дисперсія VCI коливається в межах 311,8 – 718,8%, а стандартне відхилення – в межах 17,7–26,8%, при цьому найбільший розкид даних характерний для квітня та травня, що вказує на нестійкий характер погодних умов весняних місяців, який обумовлює стан розвитку рослинного покриву. Середні величини VCI найменші в вересні – 46,9%, та найвищі в червні – 57,8%. З квітня по липень спостерігається від’ємна асиметрія, що свідчить

про те, що модальні (найбільш повторювані) значення VCI більші за середні, а у серпні та вересні – додатна, тобто модальні значення VCI менші за середні. Найбільш посушливим в Одеській області є вересень, для якого середнє значення VCI становить 46,9%.

В Миколаївській області (табл. 3.5) мінімальні значення VCI коливалися від 0,5% в квітні в 1987 році до 13,52% в липні в 2007 р. Максимальні значення коливалися від 83,7% у червні до 93,88% у квітні. Модальне значення показує, що в квітні показник VCI найбільш високий і складає 74,7%, в серпні значення найбільш низькі. Значення медіани коливається від 49,5% до 62,4%.

Таблиця 3.5 - Статистичні характеристики VCI в Миколаївській області в тепле півріччя 1985-2015 рр.

Місяць	min.	max.	M ₀	M _e	S _x	S _x ²	$\bar{x}$	$\bar{r}_3$
квітень	0,5	93,9	74,7	51,9	25,8	666,9	51,7	-0,3
травень	2,1	92,2	57,9	58,3	22,5	507,0	54,2	-0,8
червень	13,4	83,7	73,7	62,4	19,2	368,4	56,0	-0,6
липень	13,5	90,3	64,7	54,1	19,6	384,7	53,3	-0,3
серпень	12,7	89,6	53,0	50,5	19,1	365,8	52,6	-0,1
вересень	11,3	89,5	58,8	49,5	19,7	388,9	48,2	0,0

Дисперсія VCI коливається в межах 365,8% – 666,9%, а стандартне відхилення – в межах 19,1%– 25,8%, при цьому найбільший розкид даних характерний з квітня по червень, що вказує на нестійкий характер погодних умов весною та на початку літа. Середні величини VCI найменші в вересні – 48,2%, та найвищі в червні – 56,0%. В усі місяці крім вересня спостерігається від’ємна асиметрія, що свідчить про те, що модальні значення VCI більші за середні, а у вересні – додатне що свідчить про те, що модальне значення VCI менше за середнє. Найбільш посушливим в Миколаївській області, як і в Одеській, є був вересень місяць.

В Херсонській області (табл. 3.6) мінімальні значення VCI коливалися від 1,0% в квітні в 1987 році до 24,7% в серпні 1989 р. Максимальні значення коливалися від 81,7% у червні до 87,9% у вересні. Модальні значення показують, що протягом квітня показник VCI найбільш високий і найчастіше

повторюється в межах 77,0%, в червні та серпні показники VCI різко знижуються та складають 44,2% та 34,9% відповідно.

Значення медіани коливається від 42,9% до 58,2%. Дисперсія VCI коливається в межах 276,1% – 571,3%, а стандартне відхилення – в межах 15,62%– 23,9%, при цьому найбільший розкид даних характерний для червня, що вказує на нестійкий характер погодних умов початку літнього сезону. Середні величини VCI найменші у вересні – 44,8%, та найвищі в травні 53,8%. В квітні та травні спостерігається від’ємна асиметрія, що свідчить про те, що модальні значення VCI більші за середні, а з червня по вересень модальні значення VCI менші за середні. Найбільш посушливим, за середнім значенням VCI, як і в двох інших областях, в Херсонській області виявляється вересень.

Таблиця 3.6 - Статистичні характеристики VCI в Херсонській області в тепле півріччя 1985-2015 рр.

Місяць	min.	max.	M_0	M_e	S_x	S_x^2	$\bar{x}$	$\bar{r}_3$
Квітень	1,0	84,6	77,0	55,3	23,9	571,3	53,2	-0,7
Травень	5,4	81,9	58,5	58,2	20,8	434,0	53,8	-1,1
Червень	23,4	81,7	44,2	50,1	15,6	243,9	52,8	0,1
Липень	23,2	83,9	44,8	46,5	17,5	306,9	50,7	0,4
Серпень	24,7	85,9	34,9	42,9	17,5	307,7	49,4	0,5
Вересень	11,6	87,9	41,9	43,7	16,6	276,1	44,8	0,6

4 ОЦІНКА ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО РОЗПОДІЛУ ПОСУХ ПО ПІВДЕННОМУ ЗАХОДУ УКРАЇНИ

4.1 Оцінка статистичного зв'язку між ГТК, SPEI та VCI

В даному розділі розглянемо, як пов'язані між собою метеорологічні показники посух та супутниковий вегетаційний індекс VCI.

В якості метеорологічних показників були обрані гідротермічний коефіцієнт Селянинова (ГТК) та стандартизований індекс опадів-евапотранспірації SPEI. Обидва індекси базуються на даних про температуру повітря та опади, але процедура розрахунку досить різна (див. розділ 2).

ГТК був розрахований по двох станціях Одеської області – Одеса та Любашівка. В якості вихідних даних були взяті значення з серверу даних (<https://en.tutiempo.net/climate/ukraine.html>).

Розраховані ряди ГТК по двох станціях використані для кореляційного аналізу між ГТК та індексом VCI. Оцінка значущості була виконана за допомогою t-теста (за Стьюдентом).

В табл. 4.1 представлені коефіцієнти кореляції та їх значимість по м. Одесі та м. Любашівці за період 1997-2015 рр. Значущі коефіцієнти кореляції виділені сірим кольором. Можна бачити, що в більшості випадків коефіцієнти кореляції є незначущими і малими, але для двох пунктів є різниця у місяцях.

Таблиця 4.1 – Коефіцієнти кореляції між ГТК та VCI по м. Одеса та м. Любашівка за період 1997-2015 рр.

Пункт	Місяць				
	травень	червень	липень	серпень	вересень
Одеса	0,16	0,31	0,41	0,40	0,11
Любашівка	0,46	0,46	0,23	0,04	0,17

Так, для Одеси значущі коефіцієнти кореляції спостерігаються в липні та серпні і становлять 0,41 та 0,40. Для Любашівки значуща кореляційна залежність спостерігається у травні та червні (0,46). В інші місяці кореляційний зв'язок між ГТК та VCI є незначущим. Вочевидь, головну роль

в цьому відіграє той факт, що порівнюються середньообласні значення VCI та точкові, локальні значення ГТК, які не завжди відповідають ступеню посушливості на деякій території.

Для оцінки статистичного зв'язку між VCI та SPEI останні обрані по кожній області з квітня по вересень 1985-2015 рр. з SPEI Глобальний моніторинг посух (SPEI Global Drought Monitor, <http://spei.csic.es/map/maps.html>), де оцінка потенційної евапотранспірації (PET) проводиться за допомогою метода Торнтвейта. Ці дані представляють собою середні обласні значення, тобто ідентичні по площі обхвату з індексом VCI.

В табл. 4.2 представлені коефіцієнти кореляції між рядами індексів VCI та SPEI за період 1985-2015 рр. та позначена їх значущість (сірим кольором). Можна бачити, що значущі коефіцієнти кореляції спостерігаються в усіх областях лише в липні і коливаються від 0,37 в Херсонській області до 0,48 в Одеській області. В інші місяці кореляційний зв'язок між параметрами слабкий та незначущий.

Таблиця 4.2 – Коефіцієнти кореляції між SPEI та VCI по південно-західним областям України за період 1985-2015 рр.

Область	Місяць					
	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень
Одеська	-0,07	-0,18	0,12	0,48	0,22	0,03
Миколаївська	-0,08	-0,04	0,18	0,45	0,16	0,13
Херсонська	-0,04	0,01	0,00	0,37	0,15	0,12

Слабкий кореляційний зв'язок можна пояснити тим, що незважаючи на східну площу розрахунку, дані індекси мають різну часовий масштаб вихідних даних. Адже стандартизований індекс SPEI розраховується за середньомісячними даними по опадах та температурі та характеризує в деякій мірі відхилення цих параметрів від кліматичної норми. Супутниковий вегетаційний індекс VCI надається відповідною базою з щотижневою дискретністю і характеризує деякий поточний стан зволоженості. Тобто, незважаючи на те, що для нашого дослідження тижневі значення VCI осереднювалися для кожного місяця, мінливість цього параметру через

чутливість до поточних метеоумов набагато вище, ніж метеорологічних індексів посухи, такий як VCI та ГТК.

4.2 Міжрічна та сезонна мінливість повторюваності посух вегетаційного сезону

Використовуючи в якості критерію посух значення $VCI \leq 30$, в даному розділі роботи було проаналізовано вихідні ряди обласних значень VCI та визначено, як часто спостерігалися посухи в розглянуті місяці досліджуваного періоду в різних областях півдня України. В табл. 3 представлені результати щодо повторюваності посушливих місяців в певні роки періоду 1985-2015 рр.

В південно-західних областях квітні місяці були посушливими в 6 роках в Одеській області, в 5 роках в Миколаївській області та в 3 роках в Херсонській області. В усіх трьох областях посуха в квітні спостерігалася в 1985, 1987 та 2003 рр.

Травні були посушливими в 3 роках в Одеській та Херсонській областях та в 4 роках в Миколаївській. В усіх трьох областях посуха в травні спостерігалася в 1985 та 1987 рр.

Червні були посушливими в 3 роках в Одеській області, в 2 роках в Херсонській області та в 3 роках в Миколаївській. В усіх трьох областях посуха в червні спостерігалася в 2007 році.

Липні були посушливими в 3 роках в Одеській області, в 4 роках в Херсонській області та в 4 роках в Миколаївській. В усіх трьох областях посуха в липні спостерігалася в 2007 році.

Серпні були посушливими в 6 роках в Одеській області, в 3 роках в Херсонській області та в 5 роках в Миколаївській. В усіх трьох областях посуха в серпні не в якому році не спостерігалася.

Вересні були посушливими в 4 роках в Одеській області, в 5 роках в Херсонській та в Миколаївській областях. В усіх трьох областях посуха в вересні спостерігалася в 1986 та 1994 роках.

Таблиця 4.1 – Повторюваність років з посухою ($VCI \leq 30$) в різні місяці вегетаційного сезону по південних областях України за період 1985-2015 рр.

Місяць	Південно-західні області		
	Одеська	Херсонська	Миколаївська
Квітень	1985, 1987, 1988, 1992, 1993, 2003	1985, 1987, 2003	1985, 1987, 1993, 1996, 2003
Травень	1985, 1987, 1992	1985, 1987, 2003	1985, 1987, 1992, 2003
Червень	1986, 1990, 2007	2003, 2007	1986, 1992, 2007
Липень	1986, 1990, 2007	1989, 1990, 2002, 2007	1986, 1989, 1996, 2007
Серпень	1986, 1992, 1996, 2000, 2007, 2009	1989, 2000, 2007	1986, 1989, 1992, 1994, 1996
Вересень	1986, 1992, 1994, 2015	1986, 1988, 1992, 1994, 2013	1986, 1989, 1992, 1994, 2013

Розподіл кількості років з посухами по різних місяцях демонструють графіки на рис. 4.1. Можна бачити, що найбільша кількість років з посухами в Одеській і Миколаївській областях припадає на квітень и серпень, а в Херсонській області – на вересень.

В червні в усіх областях кількість років з посухою мінімальна.

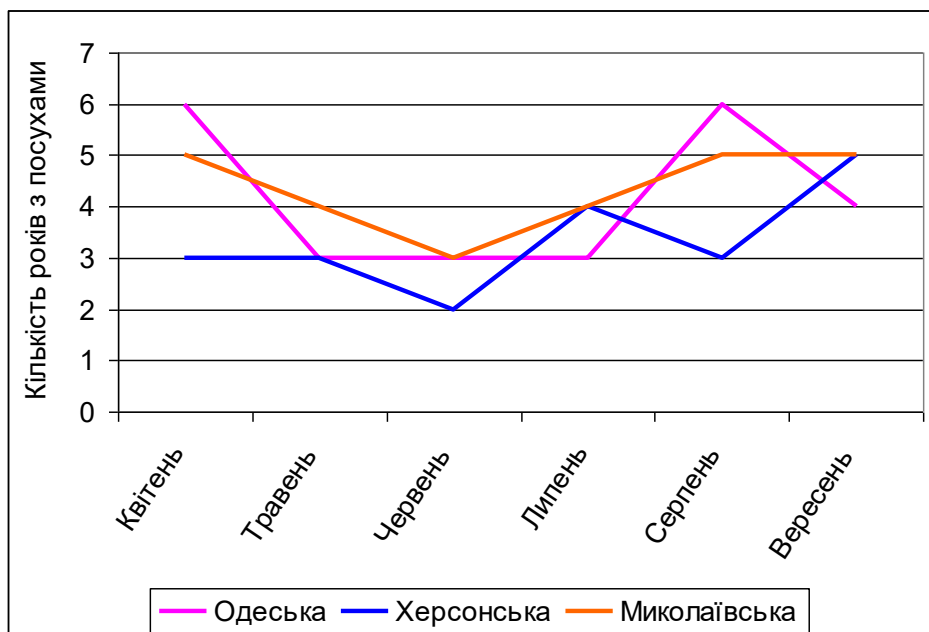


Рис. 4.1 – Повторюваність посух по місяцях вегетаційного сезону (квітень-травень) по південно-західних областях України за період 1985-2015 рр.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській кваліфікаційній роботі було виконано дослідження посушливих умов на території південно-західних областей України в період 1985-2015 рр. з використанням супутникових вегетаційних індексів. Отримані такі основні результати.

1. Аналіз часового ходу індексів NDVI та VCI показав, що протягом розглянутого періоду по всіх областях спостерігалось підвищення значень індексів майже в усі місяці вегетаційного сезону. Найбільша інтенсивність зростання припадає на весняні місяці, що може свідчити про те, що настання весни з кожним роком від початку досліджуваного періоду відбувалося все раніше, тому в останнє десятиліття значення NDVI та VCI були досить високими через добре розвинуту рослинність. В середині літа тренд стає більш повільним, а в серпні-вересні тенденція до збільшення індексу NDVI та VCI майже зникає, що свідчить про те, що умови вегетації в ці місяці протягом досліджуваного періоду майже не змінювалися.

2. Аналіз статистичних характеристик показав, що абсолютні максимуми NDVI та VCI відмічаються переважно навесні та на початку літа та становлять 0,31-0,43 та 81,7-93,9% відповідно, але можуть припадати й на кінець вегетаційного сезону. Найбільш посушливим, за середнім значенням VCI, в усіх областях виявляється вересень, коли середні значення індексу коливаються в межах 44,8-48,2%.

За значеннями дисперсії та стандартного відхилення визначено, що найбільша мінливість індексу VCI притаманна весняним місяцям та початку літа, що відповідає мінливим погодним умовам від року до року, а найменша – наприкінці літа та початку осені, коли погодні умови є більш стабільними.

3. Порівняння супутникового вегетаційного індексу VCI з метеорологічними індексами посух ГТК та SPEI за допомогою кореляційного аналізу показало, що статистичний зв'язок між ними є доволі слабким. Значущі коефіцієнти кореляції між рядами ГТК та VCI за досліджуваний період 1997-2015 рр. для м. Одеса припадають на липень ($r = 0,41$) і серпень ($r = 0,40$), а для м. Любашівка - на травень-червень ($r = 0,46$).

Значущі коефіцієнти кореляції між рядами SPEI та VCI за період 1985-2015 рр. по всіх трьох областях спостерігаються лише в липні і коливаються від 0,37 до 0,48.

Слабкий кореляційний зв'язок можна пояснити більш високою чутливістю супутникового вегетаційного індексу VCI до поточних погодних умов через високу дискретність даних (один тиждень) порівняно з метеорологічними індексами посух, які визначаються для місячного періоду часу відповідно по середньомісячним даним температури та опадів.

4. Аналіз повторюваності посух по місяцях вегетаційного сезону за досліджуваний період з використанням супутникового вегетаційного індексу VCI показав, що найбільш часто посуха в південно-західних областях України траплялася в серпні та вересні – до 5-6 років за період, найменша повторюваність – у травні та червні (по 2-4 роки). Одночасно по всіх трьох південно-західних областях посуха спостерігалася у квітні і травні 1985 та 1987 рр., червні і липні 2007 р., вересні 1986 та 1992 рр. Загалом, за досліджуваний період не спостерігалось значних тенденцій у кількості посушливих місяців в розглянутих областях України.

Таким чином, результати даного дослідження свідчать про те, що супутникові вегетаційні індекси є зручними та вельми точними для оцінки посушливого стану як поточних погодних умов, так й кліматичних.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Барабаш М.Б., Емельянова Ж.Л. Закономерности пространственно-временного распределения засушливых условий на Украине // Труды УкрНИГМИ. 1990. Вып. 238. С. 94-101.
2. Бучинский И.Е. Засухи и суховеи. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 214 с.
3. Клімат України / За ред. В.М. Ліпінського. Київ: Видавництво Раєвського, 2003. 343 с.
4. Кошеленко Н.В., Гусак Ж.К., Миронченко Г.В. Некоторые особенности циркуляции атмосферы при засухах на Украине // Труды УкрНИГМИ. 1979. Вып. 176. С. 50-61.
5. Мартазинова В.Ф., Сологуб Т.А. Атмосферная циркуляция, формирующая засушливые условия на территории Украины в конце XX столетия // Наук. праці УкрНДГМІ. 2000. Вип.248. С. 36-47.
6. Семенова І.Г. Використання вегетаційних індексів для моніторингу посух в Україні // Український гідрометеорологічний журнал. 2014. Вип. 14. С. 43-52.
7. Семенова І.Г. Синоптичні та кліматичні умови формування посух в Україні. Монографія. Харків: ФОП Панов А.М., 2017. 236 с.
8. Семёнова И.Г. Характеристика засушливых условий на Украине в конце XX - начале XXI столетия // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2014. Вып. 1. С. 20 -29.
9. Хлебникова Е.И., Павлова Т.В., Сперанская Н.А. Засухи // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Под ред. С.М. Семенова. М.: Росгидромет, НИЦ "Планета", 2012. С. 126-164.
10. Хохлов В.М., Боровська Г.О., Хоменко Г.В., Шараєва Т.В. Регіональні особливості розподілу посух в Україні / В.М. Хохлов, // Український гідрометеорологічний журнал. 2011. № 9. С. 73-78.
11. Хохлов В.М. Просторово-часовий розподіл засух на території України в умовах зміни клімату // Український гідрометеорологічний журнал. 2011. № 8. С. 38-43.

12. Черенкова Е.А., Кононова Н.К. Связь опасных атмосферных засух в Европейской России в XX веке с макроциркуляционными процессами// Известия РАН. Сер. Географическая. 2009. № 1. С. 73-82.
13. Школьный Є.П., Лоева І.Д., Гончарова Л.Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації: підручник / під ред. Є.П. Школьного. Одеса: Міносвіти України, 1999. 600 с.
14. Gibbs W.J., Maher J.V. Rainfall deciles as drought indicators. Melbourne, Commonwealth of Australia, Bureau of Meteorology. 1967. Bulletin No. 48. 1967.
15. Kogan F., Guo W. Early Detection and Monitoring Droughts From NOAA Environmental Satellites // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Using Satellite Data and In-Situ Data to Improve Sustainability, Kiev, Ukraine, 9-12 June 2009. P. 11 -18.
16. Kogan F.N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data / F.N. Kogan // Bulletin of the Amer. Meteor. Soc. 1995. Vol. 76, No 5. P. 655-668.
17. Vicente-Serrano S.M. S. Beguería, J.I. López-Moreno A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index // J. of Climate. 2010. Vol. 23, No. 7. P. 1696–1718.
18. WMO (2009). Experts agree on a universal drought index to cope with climate risk [Електронний ресурс] // Press Release. 2009. No. 872. URL: http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_872_en.html.

ДОДАТОК А

ДОВІДКА

про апробацію результатів наукового дослідження
Лаврент'євої Анастасії Олександрівни

на тему „Супутниковий моніторинг посух в південно-західних областях
України”

1. Результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані в рамках науково-дослідної роботи кафедри метеорології та кліматології “Просторово-часова динаміка екстремальних погодних явищ в Україні за умови змін клімату” (2016-2019рр., № ДР 0116U002403). Зроблений в роботі аналіз динаміки посушливих місяців вегетаційного сезону за період 1985-2015 рр. на південному заході України, а також відомості про мінливість супутникового вегетаційного індексу VCI увійшли до звітів з НДР за 2017-2018 рр.

2. Отримані в магістерській роботі результати були опубліковані в наукових статтях і тезисах конференцій:

– Semenova I.G., Lavrenteva A.A. Dynamics of vegetation conditions in southwestern part of Ukraine in the end of 20th and the early 21st century // SWorld Journal, Is. No 13 (Yolnat PE, Minsk, 2017). URL: <http://www.sworldjournal.com/e-journal/j13.pdf>. P. 23-30. DOI: 10.21893/2227-6920.2017-13.010

– Лаврент'єва А.О., Делінський Д.С. Оцінка умов вегетації в степових областях України в теплі сезони 1985-2015 рр. за допомогою супутникової інформації // Тези доповіді наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ. 2017. С. 177.

– Лаврент'єва А.О., Делінський Д.С. Сучасна динаміка посушливих умов теплих сезонів у південних областях України // Тези доповіді III міжнародної наукової конференції молодих вчених «Сучасна гідрометеорологія: актуальні проблеми та шляхи їх вирішення». Одеса: ОДЕКУ, 2018.

– Семенова І.Г., Лаврент'єва А.О., Делінський Д.С. Оцінка динаміки посушливих умов в південних областях України з використанням супутникової інформації // Вісник ГМЦ ЧАМ. 2018. № 1(21). С. 51-63.

3. Наукові роботи за тематикою магістерського дослідження були представлені у I турах Всеукраїнського конкурсу наукових робіт у 2016 та 2017 рр.

Науковий керівник,
д.геогр.н., професор

І.Г. Семенова