

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 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., проф.
Семенова Інна Георгіївна

2. „Супутниковий моніторинг посух в південно-східних 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

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

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-східних областях
України”

Виконав студент 2 курсу групи МНЗ-61-М
спеціальності 103 Науки про Землю
Делінський Дмитро Сергійович

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

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Делінському Дмитру Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Супутниковий моніторинг посух в південно-східних областях України
керівник роботи Семенова Інна Георгіївна, д.геогр.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від 02.11.2017 р. № 321-С
2. Срок подання студентом роботи 01.06.2018 р.
3. Вихідні дані до роботи: часові ряди щотижневих супутникових вегетаційних індексів NDVI та VCI за 1985-2915 рр. по Запорізькій, Дніпропетровській, Донецькій 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 метеорологічного індексу посух SPEI з вегетаційним індексом VCI. 6) Визначення посушливих періодів за допомогою індексу SPEI, вегетаційного індексу VCI i встановлення повторюваності посух у досліджуваний період.

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

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 балльною шкалою
1	Огляд наукової літератури за темою дослідження. Формування теоретичної частини роботи.	01.04.2018	85	добре
2	Відбір та аналіз вихідних даних, розрахунки середньомісячних значень індексів посух.	10.04.2018	85	добре
3	Побудова і аналіз графіків часового ходу вегетаційних індексів.	20.04.2018	80	добре
4	Рубіжна атестація	30.04.2018	83	добре
5	Аналіз статистичних характеристик вегетаційних індексів.	01.05.2018	80	добре
6	Порівняльний аналіз супутникових вегетаційних індексів та метеорологічних індексів посух.	10.05.2018	80	добре
7	Аналіз повторюваності посух по місяцях вегетаційного сезону в досліджуваний період.	20.05.2018	80	добре
8	Складання висновків. Оформлення тексту магістерської роботи.	25.05.2018	85	добре
9	Підготовка доповіді до захисту матеріалів магістерської роботи.	01.06.2018	85	добре
Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)			83	добре

Студент Д.С. Делінський
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

АНОТАЦІЯ

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

Автор: Делінський Дмитро Сергійович.

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-східних областях України (Запорізькій, Дніпропетровській і Донецькій) протягом 1985-2015 рр. за допомогою супутникової інформації і метеорологічних індексів посух.

Відповідно до поставленої мети розв'язано наступні задачі:

- проведено аналіз часового ходу супутниковых вегетаційних індексів NDVI і VCI та визначені тенденції у їх змінах;
- визначено статистичні характеристики індексів NDVI і VCI;
- визначено повторюваність посушливих періодів за допомогою індексу VCI та індексу SPEI.

Об'єкт дослідження: посушливі явища.

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

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

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі використані сучасні дані по супутниковых 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 59 сторінок складається з 4 розділів, висновків, переліку посилань з 18 джерел, Додатку, містить 13 рисунків та 7 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-eastern regions of Ukraine".

Author: Delinskiy Dmitriy Sergeevich.

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-eastern regions of Ukraine (Zaporizhzhya, Dnipropetrovsk and Donetsk) 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-based vegetation indices NDVI and VCI were done and trends are determined;
- Statistical characteristics of NDVI and VCI indices are determined;
- Frequency of drought episodes has been determined using the index VCI and the index SPEI .

Object of study: drought phenomena.

Subject of research: Spatiotemporal variability of the satellite-based 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-east 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 59 pages consists of 4 sections, conclusions, References from 18 sources, annex, contains 13 figures and 7 tables in the main text.

Keywords: drought, drought index, satellite vegetation index.

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 сходу України.....	32
3.1 Вихідні дані та методи аналізу.....	32
3.2 Часовий хід VCI та NDVI	33
3.2.1 Часовий хід індексу VCI	33
3.2.2 Часовий хід індексу NDVI.....	39
3.3 Аналіз статистичних характеристик VCI та NDVI	44
4. Оцінка просторово-часового розподілу посух по південному сходу України.....	49
4.1 Оцінка посушливих умов за допомогою метеорологічного індексу посух SPEI	49
4.2 Міжрічна та сезонна повторюваність посух вегетаційного періоду.....	53
Висновки	55
Перелік посилань	57
Додаток А	59

ВСТУП

Для різних регіонів України в теплий період року є характерними несприятливі погодні умови, що визначаються посухою. Посуха - явище, зумовлене тривалою нестачею опадів при підвищенні температури повітря і його низькій вологості. Вона найчастіше трапляється на півночі Криму і в південно-східній частині країни. Звичайно посухи виникають як наслідок тривалого періоду бездощів'я, та нерідко супроводжуються таким явищем як суховій, що багатократно підвищує несприятливу дію посухи на рослинність. Тому дослідження посушливих явищ в Україні залишаються актуальними завдяки виникненню нових засобів та методик, які дозволяють проводити моніторинг та підвищувати завчасність попереджень про виникнення посушливих наслідків з метою мінімізації їх наслідків в економіці країни. Незважаючи на велику базу досліджень посух в Україні, питання діагностування, короткострокового та довгострокового прогнозування посух та їх наслідків залишається актуальним, адже є не вирішеним в повній мірі.

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. Для дослідження рослинного покриву використовують зв'язок спектральної відбивної здатності в різних діапазонах електромагнітного випромінювання зі структурою та станом рослинності. Оскільки стан рослинності в більшості залежить від погодних умов, вегетаційні індекси можна вважати об'єктивними критеріями посушливості і використовувати для моніторингу посух.

Мета магістерської роботи – оцінка посушливих умов у вегетаційний період в південно-східних областях України (Запорізькій, Дніпропетровській і Донецькій) протягом 1985-2015 рр. за допомогою супутникової інформації і метеорологічних індексів посух.

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

метеорологічними показниками посух проаналізовані часові ряди індексу SPEI та виконаний кореляційний аналіз для встановлення зв'язку між ним 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 супутниковых вегетаційних індексів, а також кількісної оцінки посушливих явищ взагалі, та в Україні зокрема. В третьому розділі представлені результати аналізу часових змін супутниковых вегетаційних індексів і їх статистичні характеристики за досліджуваний період. В четвертому розділі представлено оцінку повторюваності посух вегетаційного сезону по південно-східним областям України з використанням як супутниковых 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 ґрутові 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. Триває 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 ґрутову посуху.

Грутова посуха може спостерігатись на полях, які неадаптовані до посушливого клімату як без рослин, так і з рослинним покриттям. У першому випадку критерії ґрутової посухи визначають за агрогідрологічними властивостями ґрунту (найменша вологоємність). За наявним агрофітоценозом ґрутова посуха є складною системою, що враховує динаміку вологопотреби рослин і вологості ґрунту. В останньому випадку характерною особливістю ґрутової 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 ґрутової 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 підвищенну випаровуваність, і запаси ґрутової вологи без поповнення їх дощами виснажуються.

Посуху може супроводжувати суховій — це стан атмосфери, за якого простежується повільне, зі швидкістю $3\text{--}5 \text{ м}\cdot\text{s}^{-1}$ 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, орієнтованої на моніторинг посух в регіонах з великим ризиком тривалих посух і розвиненою системою страхування, широке 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 ґрутових 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 - недолік 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 сільськогосподарською. 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% площин однієї агрокліматичної зона та носять плямистий характер. Зональні посухи можуть займати від 10 до 100% площин агрокліматичної зони. Міжзональні посухи займають не менше двох агрокліматичних зон з охопленням від 10 до 35% площин 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'язаних 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

повітря 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. Антициклиони 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 антициклиони над північчю, північним заходом або центральними районами ЄСР, Нижнім Поволжям або Південним Уралом. Декілька рідше антициклиони 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 антициклону 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 посухі 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 покрову 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 Східній Європі. Перший процес – це вторгнення сухого та холодного арктичного повітря у вигляді антициклональних ядер в тилу північних циклонів та їх стаціонування 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. Антициклиони 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 покрову. 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 передує 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 ХХ 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 загальновживаний у вітчизняній метеорології гідротермічний коефіцієнт Г.Т. Селянінова, 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 ХХ століття і став найпопулярнішим показником посух у вітчизняній агрометеорології і досі має широке застосування, незважаючи наяву 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 виходить 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], ґрунтуються 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 неперевищення 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 нормальногорозподілу, відповідна по ймовірності неперевищення 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 арідності клімату, а також може обчислюватися для інших водних змінних, таких як сніговий покрив, вологосміність 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 вологоемність 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
$-2 \leq PDSI < -1$	Слабка посуха
$-3 \leq PDSI < -2$	Помірна посуха
$-4 \leq PDSI < -3$	Інтенсивна посуха
$PDSI \leq -4$	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 бездошових 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 площині території України. Прийнято, що при обхваті посухою від 1 до 10% площині посуха носить локальний характер, 11-20% території – посуха поширенна, 21-20% посуха вельми поширенна, при площині понад 50% посуха вважалася катастрофічною. Найбільша ймовірність весняних посух (51-60%) спостерігається у вузькій смузі, що примикає до Сивашу та Каркинітської затоки. Північніше, до лінії Херсон, Нижні Серогози, Мелітополь, Бердянськ, та південніше до лінії Джанкой, Стерегущий, ймовірність посухи складає 40%. На північ розташована зона з ймовірністю 30%, її границя проходить вздовж лінії Ізмаїл, Сербка, Баштанка, Запорожжя, 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%.

Осенні 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 спостерігалося взагалі.

В каталогі 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 площи 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 з розподілу повторюваності $\text{ГТК} \leq 1,0$ 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 $\text{ГТК} \leq 0,5$ 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 $\text{ГТК} \leq 0,3$ 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 pp. і 1973–2002 pp. (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 Одеської (240–270 місяців), а найменша – у Вінницькій, Луганській області і на півночі Сумської області (0–30 місяців).

На рис. 1.2, в зображене 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 pp. спостерігалося тільки 30-35 місяців з засухами, а на півдні Запорізької та Донецької областей – 55-60 місяців, тобто майже удвічі більше [4].

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, замінився мінімумом. Аналогічним чином змінилася й середня тривалість засух над півднем України [10].

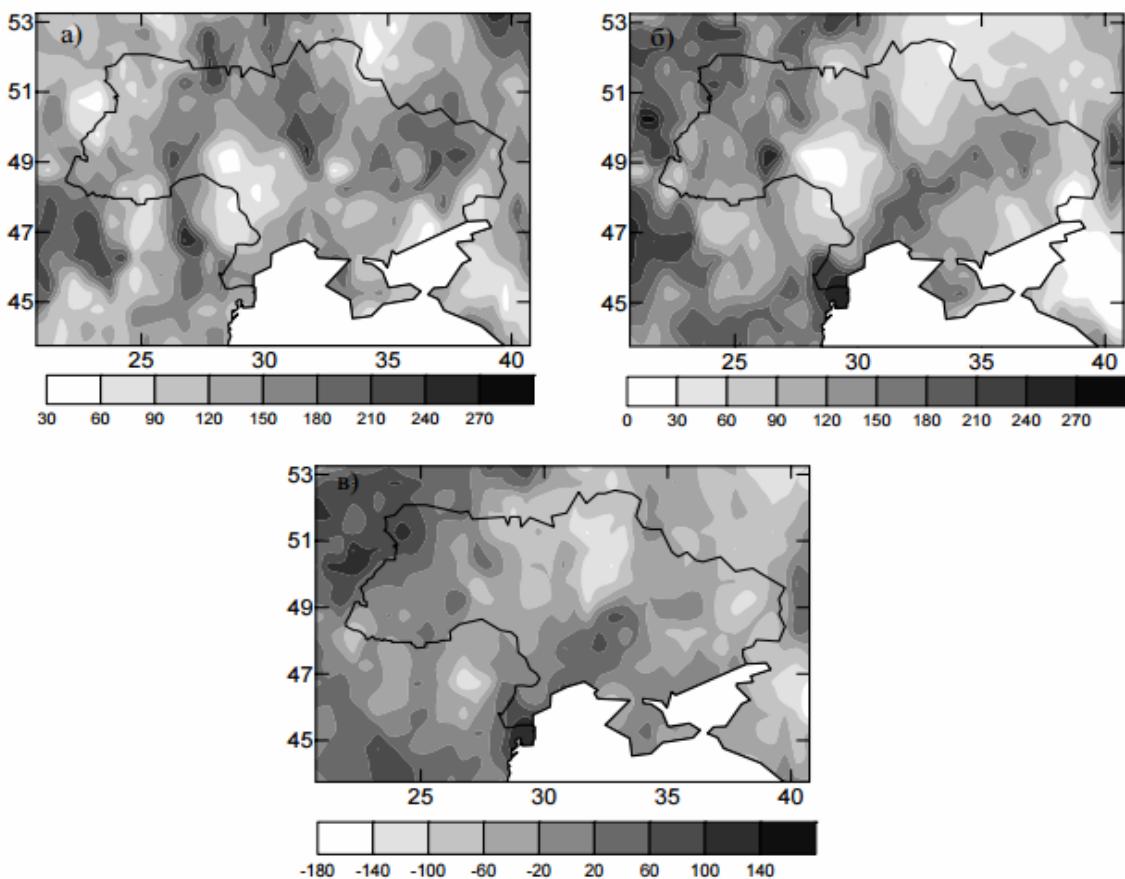


Рис. 1.2 - Повторюваність місяців з посухою для періодів 1943-1972 pp. (а), 1973-2002 pp. (б) та різниця між ними (в) [10]

Аналіз повторюваності сезонних посух, що спостерігалися протягом вегетаційного періоду (квітень-жовтень) у 1995-2012 pp. 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 будується так звані вегетаційні індекси, за якими, як мінімум, можна відрізняти 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 вимірюваних значень інтенсивності відбитого випромінювання в червоному і близькому 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 близькій 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 близькому інфрачервоному спектрі (рис. 2.1).

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].

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].

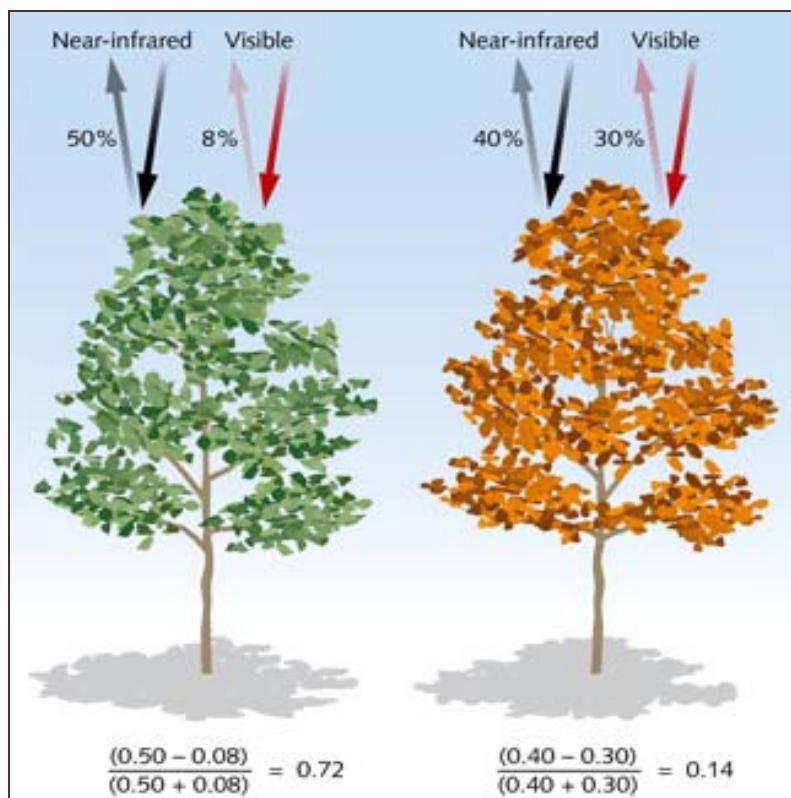


Рис. 2.1 - Принцип формування індексу NDVI відбивними потоками випромінювання у видимому (Visible) і близькому інфрачервоному (Near-infrared) діапазонах зондування

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

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 покрову 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 канальної 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:

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

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

Індекс стану температури розраховують за такою формулою:

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

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:

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

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 ПІВДЕННО-СХІДНИХ ОБЛАСТЯХ 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 сходу України - Запорізької, Дніпропетровської і Донецької, які належать до найбільш посушливої, степової агрокліматичної зони. Розглядалися теплі сезони (квітень-вересень) періоду 1985-2015 рр.

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).

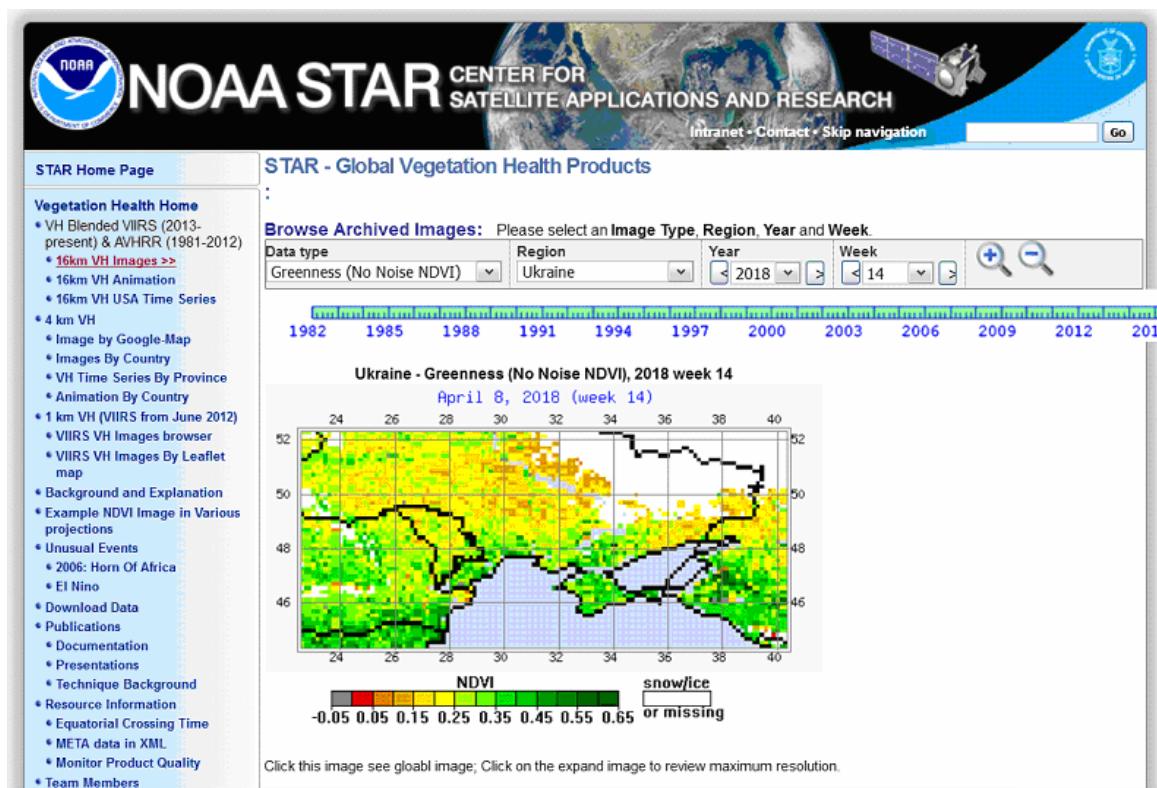


Рис. 3.1 - Приклад веб-сторінки з доступом до вихідних даних Global Vegetation Health Products

Для встановлення мінливості вегетаційних індексів NDVI та VCI в обраних регіонах були визначені і проаналізовані основні статистичні характеристики вихідних рядів даних для місяців вегетаційного сезону – середні, максимальні та мінімальні значення, стандартне відхилення [13].

3.2 Часовий хід вегетаційних індексів VCI та NDVI

3.2.1 Часовий хід індексу VCI

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

Запорізька область

На графіку часового ходу індексу VCI в Запорізькій області (рис. 3.2) в квітні (рис. 3.2, а) мінімум спостерігався в 1986 році і складав 0,2%, максимум складав 92,5% та спостерігався у 1990 році. Посушливі періоди спостерігались з врахуванням значення VCI, меншим 30%, в періоди: 1983-1985 рр., 1993-1995 рр., найбільш інтенсивна посуха була у 1986 р. За лінією лінійного тренда спостерігалося зростання індексу протягом досліджуваного періоду майже на 40%.

На графіку часового ходу індексу VCI в Запорізькій області за травень (рис. 3.2, б) мінімум спостерігався в 1986 році і складав 3,9%, максимум складав 87,5% та спостерігався у 2007 році. За лінією тренда бачимо, що значення індексу також зростали протягом періоду майже на 40%, а посуха спостерігалася у 1983, 1986 та 2002 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Запорізькій області за червень (рис. 3.2, в) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 6,7%, максимум складав 86,48% та спостерігався у 1997 році. За лінією тренда видно, що індекс зростав протягом періоду майже на 40%, а посуха спостерігалася у 1983 та 2003 роках.

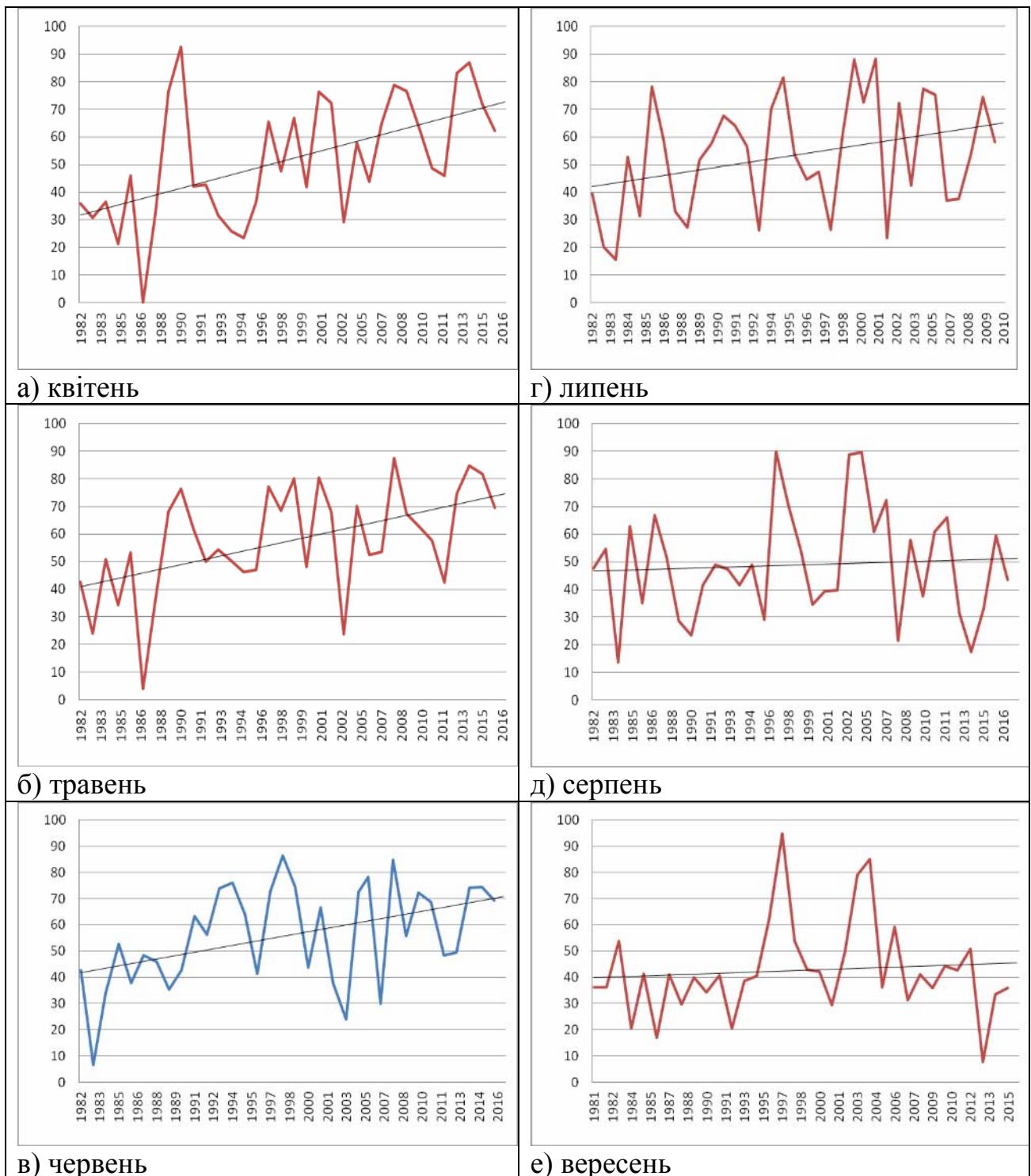


Рис. 3.2 – Графіки часового ходу індексу VCI (%) з лінійним трендом в Запорізькій області за місяці вегетаційного сезону (квітень-вересень) 1985-2015 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Запорозькій області за липень (рис. 3.2, г) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 15,6%, максимум складав 88,1% та спостерігався у 2001 році. Лінія тренда показує менше

зростання, ніж в попередні місяці, а засуха спостерігалася доволі часто в липня 1983-1984, 1988, 1992, 1997 та 2002 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Запорозькій області за серпень (рис. 3.2, д) мінімум спостерігався у 1983 році і складав 13,7%, максимум складав 90% та спостерігався у 1986 році. Тренд майже не виражений для цього місяця, а посуха за значеннями $VCI < 30\%$ спостерігалася у 1983, 1990, 2008 та 2014 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Запорозькій області за вересень (рис. 3.2, е) мінімум спостерігався в 2013 році і складав 7,7%, максимум складав 94,7% та спостерігався у 1997 році. Тренд, як і в серпні, майже відсутній, а посуха була у 1983, 1985, 1992 та у 2013 рр.

Таким чином, в Запорізькій області за лінійним трендом VCI спостерігалось помітне зростання значень вегетаційного індексу протягом досліджуваного періоду (майже на 40%) у весняні місяці та на початку літа (червень). В середині і наприкінці літа та на початку осені значення індексу майже не змінювалися, а коливалися біля середнього. Найбільш часто посухи траплялися в липні-вересні.

Дніпропетровська область

На графіку часового ходу індексу VCI в Дніпропетровській області в квітні (рис. 3.3, а) мінімум спостерігався в 1986 році і складав 0,05%, максимум складав 91% та спостерігався у 2013 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення підвищуються протягом досліджуваного періоду. Посуха спостерігалася у 1985, 1986, 1993, 2002 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Дніпропетровській області за травень (рис. 3.3, б) мінімум спостерігався у 1986 році і складав 4%, максимум складав 87,5% та спостерігався у 2008 році. За лінією тренда видно, що осереднені значення підвищуються протягом досліджуваного періоду. Посуха у травні спостерігалася у 1983 та 1986 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Дніпропетровській області за червень (рис. 3.3, в) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 16,8%, максимум складав 88,8% та спостерігався у 1998 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення підвищуються протягом досліджуваного періоду. Посуха спостерігалася у 1983 та 2003 рр.

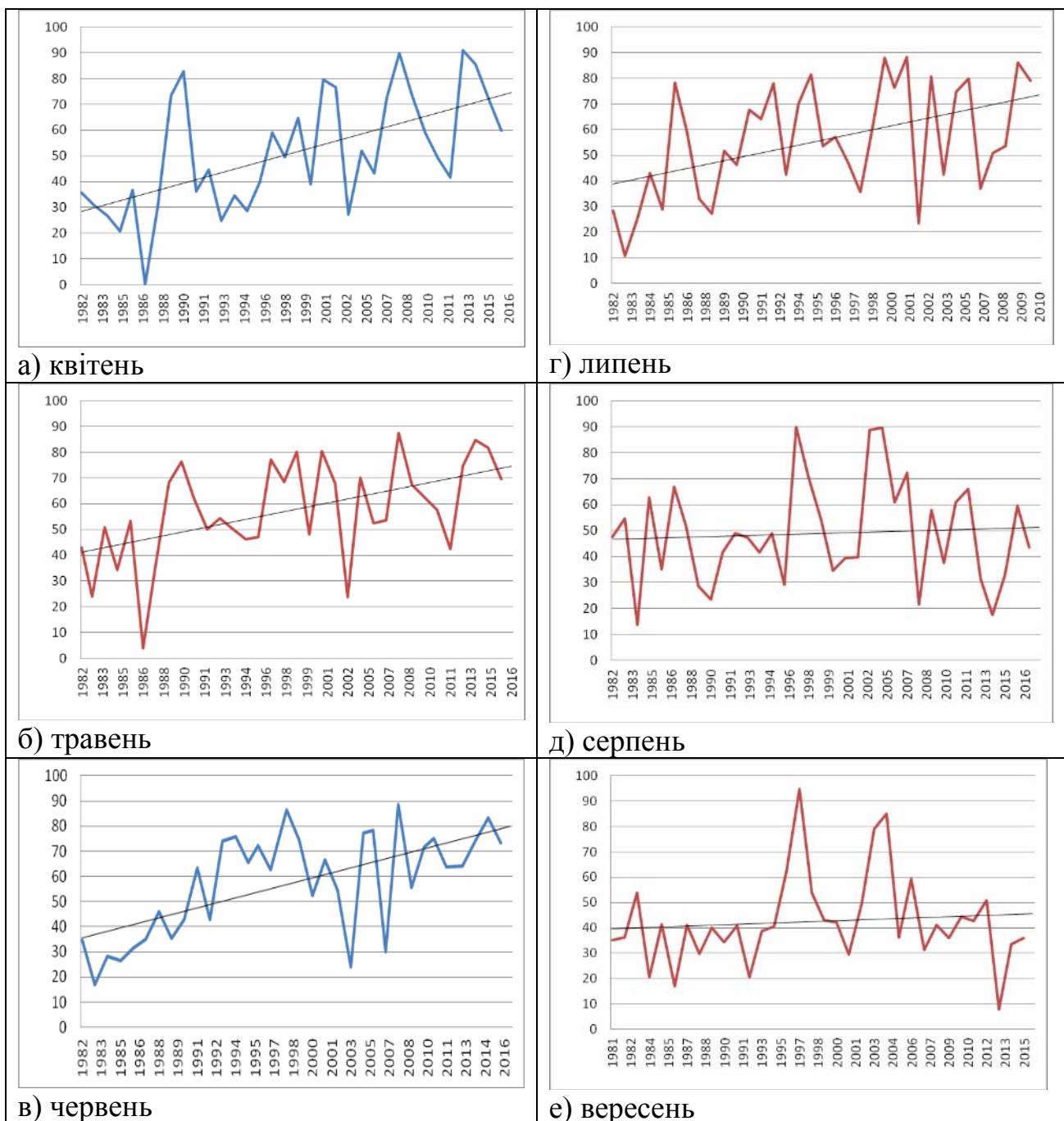


Рис. 3.3 – Графіки часового ходу індексу VCI (%) з лінійним трендом в Дніпропетровській області за місяці вегетаційного сезону (квітень-вересень) 1985-2015 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в липні (рис. 3.3, г) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 10,7%, максимум складав 88,1% та спостерігався у 1998 році. За лінією тренда видно, що осереднені значення підвищуються протягом дослідженого періоду з майже тією ж

інтенсивністю, що й в попередні місяці. Посуха в липні відзначалася у 1983 та 2002 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Дніпропетровській області в серпні (рис. 3.3, д) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 13,7%, максимум складав 90% та спостерігався у 1986 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення підвищуються протягом досліджуваного періоду слабко, тренд майже відсутній. Посуха спостерігалась у 1983, 1990, 2008 та 2014 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Дніпропетровській області у вересні (рис. 3.3, е) мінімум спостерігався в 2013 році і складав 7,7%, максимум складав 94,7% та спостерігався у 1997 році. Як і в серпні, спостерігається слабке підвищення значень індексу за лінією тренда протягом досліджуваного періоду. Посуха спостерігалась у 1984, 1985, 1992, та 2013 рр.

Донецька область

На графіку часового ходу індексу VCI в Донецькій області у квітні (рис. 3.4, а) мінімум спостерігався в 1986 році і складав 0,05%, максимум складав 91% та спостерігався у 2013 році. За лінією тренда спостерігається суттєве зростання значень індексу VCI протягом досліджуваного періоду – на понад 40%. Посуха спостерігалась в 1985, 1986, 1993, 1994 та 2002 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Донецькій області у травні (рис. 3.4, б) мінімум спостерігався в 1986 році і складав 3,9%, максимум складав 87,4% та спостерігався у 2008 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення індексу також підвищуються протягом досліджуваного періоду на понад 30%. Посуха спостерігалась у 1983, 1986 та 2002 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Донецькій області у червні (рис. 3.4, в) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 16,8%, максимум складав 88,7% та спостерігався у 2011 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення також стрімко підвищуються протягом досліджуваного періоду – на понад 40%. Посуха була в 1983 та 2003 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Донецькій області у липні (рис. 3.4, г) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 10,7%, максимум складав 88% та спостерігався у 2000 році. За лінією тренда видно зростання індексу на понад 30% протягом досліджуваного періоду. Посуха спостерігалась у 1983 та 2002 рр.

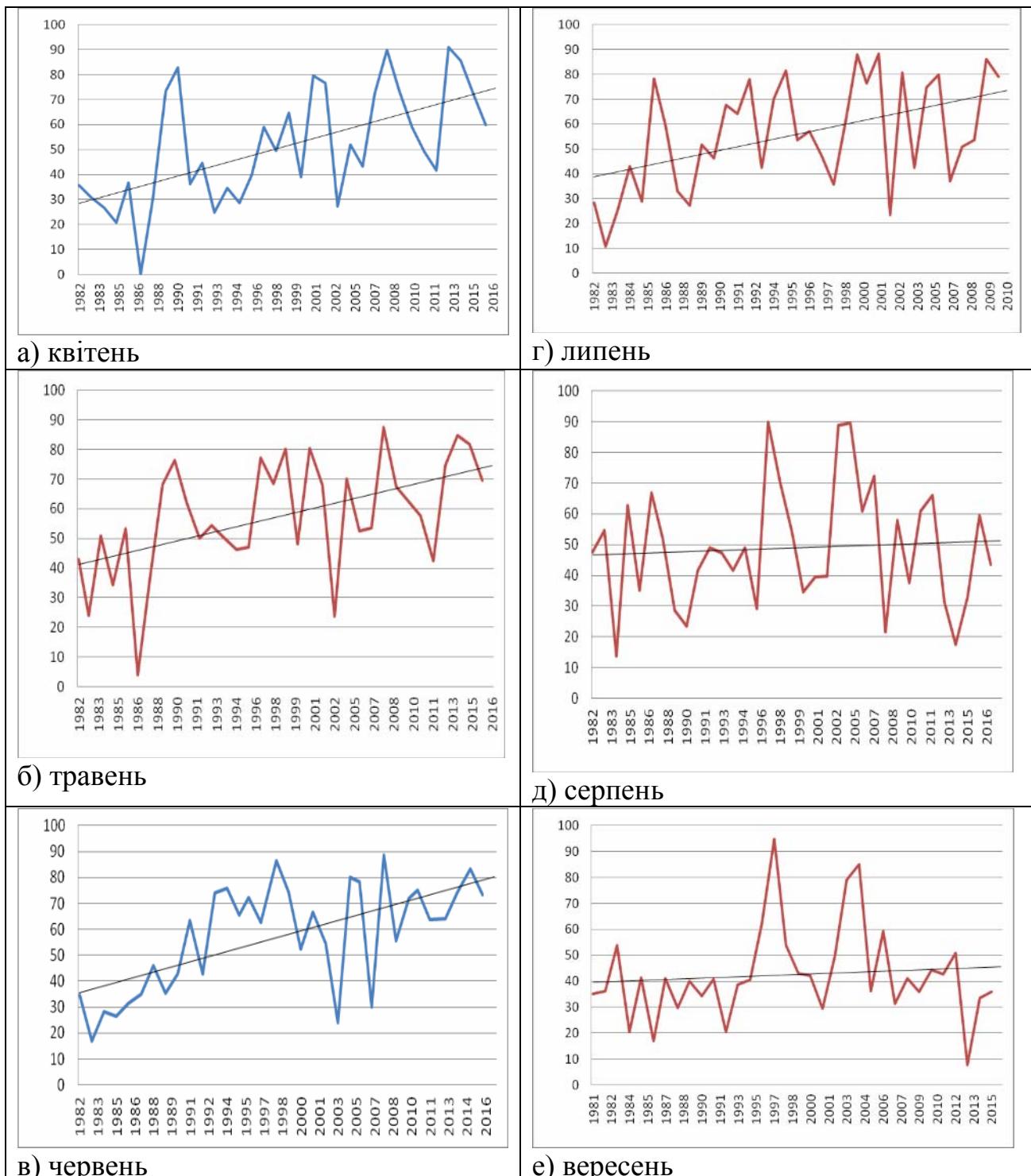


Рис. 3.4 – Графіки часового ходу індексу VCI (%) з лінійним трендом в Донецькій області за місяці вегетаційного сезону (квітень-вересень) 1985-2015 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Донецькій області у серпні (рис. 3.4, д) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 13,6%, максимум складав 89,9% та спостерігався у 2005 році. За лінією тренда відзначається

незначне зростання індексу протягом досліджуваного періоду, тобто тренд майже відсутній. Посуха спостерігалась у 1983, 1990, 2008, 2014 рр.

На графіку часового ходу індексу VCI в Донецькій області у вересні (рис. 3.4, е) мінімум спостерігався в 1987 році і складав 7,6%, максимум складав 94% та спостерігався у 1997 році. Тренд осереднених значень, як і у серпні, майже відсутній. Посуха була у 1984, 1985, 1991, 2013 рр.

3.2.2 Часовий хід індексу NDVI

Запорізька область

На графіку часового ходу індексу NDVI в Запорізькій області у квітні (рис. 3.5, а) мінімум спостерігався в 1986 році і складав 0,04, максимум складав 0,3 та спостерігався у 1990 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення підвищуються протягом досліджуваного періоду.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Запорізькій області за травень (рис. 3.5, б) мінімум спостерігався в 1986 році і складав 0,18, максимум складав 0,38 та спостерігався у 2007 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення підвищуються протягом досліджуваного періоду.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Запорізькій області за червень (рис. 3.5, в) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 0,28, максимум складав 0,41 та спостерігався у 1998 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення слабко підвищуються протягом досліджуваного періоду.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Запорізькій області за липень (рис. 3.5, г) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 0,27, максимум складав 0,38 та спостерігався у 1998 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення слабко підвищуються протягом досліджуваного періоду.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Запорізькій області за серпень (рис. 3.5, д) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 0,19, максимум складав 0,37 та спостерігався у 2002 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення майже не змінювалися протягом досліджуваного періоду.

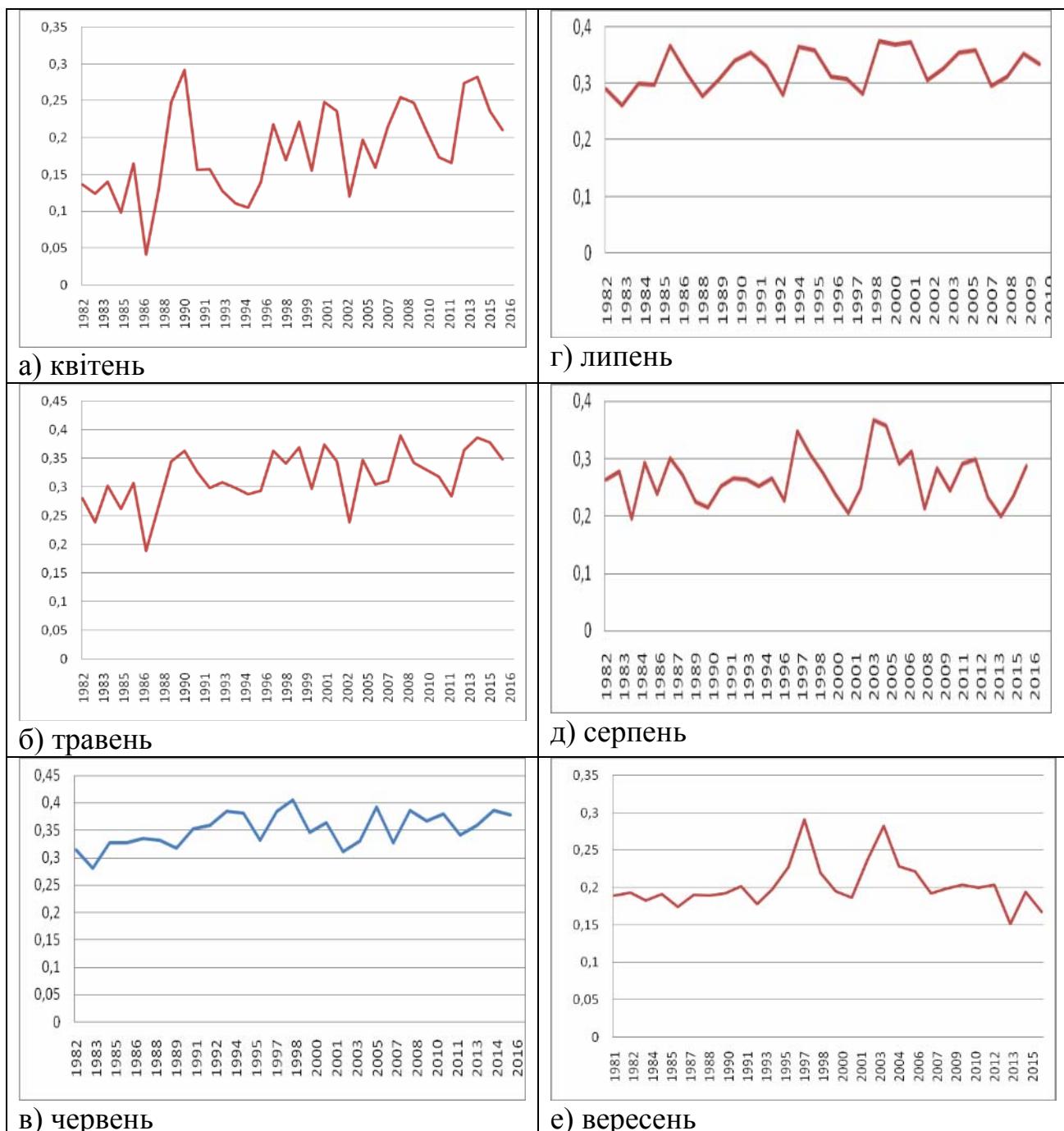


Рис. 3.5 – Графіки часового ходу індексу NDVI з лінійним трендом в Запорізькій області за місяці вегетаційного сезону (квітень-вересень) 1985-2015 pp.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Запорозькій області за вересень (рис. 3.5, е) мінімум спостерігався в 2013 році і складав 0,15, максимум складав 0,28 та спостерігався у 1997 році. Як й в серпні, за лінією

тренда осереднені значення майже не змінювалися протягом досліджуваного періоду.

Дніпропетровська область

На графіку часового ходу індексу NDVI в Дніпровська області за квітні (рис. 3.6, а) мінімум спостерігався в 1986 році і складав 0,04, максимум складав 0,27 та спостерігався у 2013 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення підвищуються протягом досліджуваного періоду.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Дніпропетровській області за травень (рис. 3.6, б) мінімум спостерігався в 1986 році і складав 0,18, максимум складав 0,38 та спостерігався у 2008 році. За лінією тренда видно, що осереднені значення підвищуються протягом досліджуваного періоду.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Дніпропетровській області у червні (рис. 3.6, в) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 0,27, максимум складав 0,41 та спостерігався у 1998 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення слабко підвищуються протягом досліджуваного періоду.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Дніпропетровській області у липні (рис. 3.6, г) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 0,27, максимум складав 0,37 та спостерігався у 1998 році. Тренд індексу у липні майже відсутній.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Дніпропетровській області у серпні (рис. 3.6, д) мінімум спостерігався в 2013 році і складав 0,2, максимум складав 0,37 та спостерігався у 2002 році. Тренд індексу за досліджуваний період майже відсутній.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Дніпропетровській області у вересні (рис. 3.6, е) мінімум спостерігався в 2013 році і складав 0,15, максимум складав 0,38 та спостерігався у 1997 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення майже не змінювалися протягом досліджуваного періоду, при цьому наприкінці навіть зменшувалися.

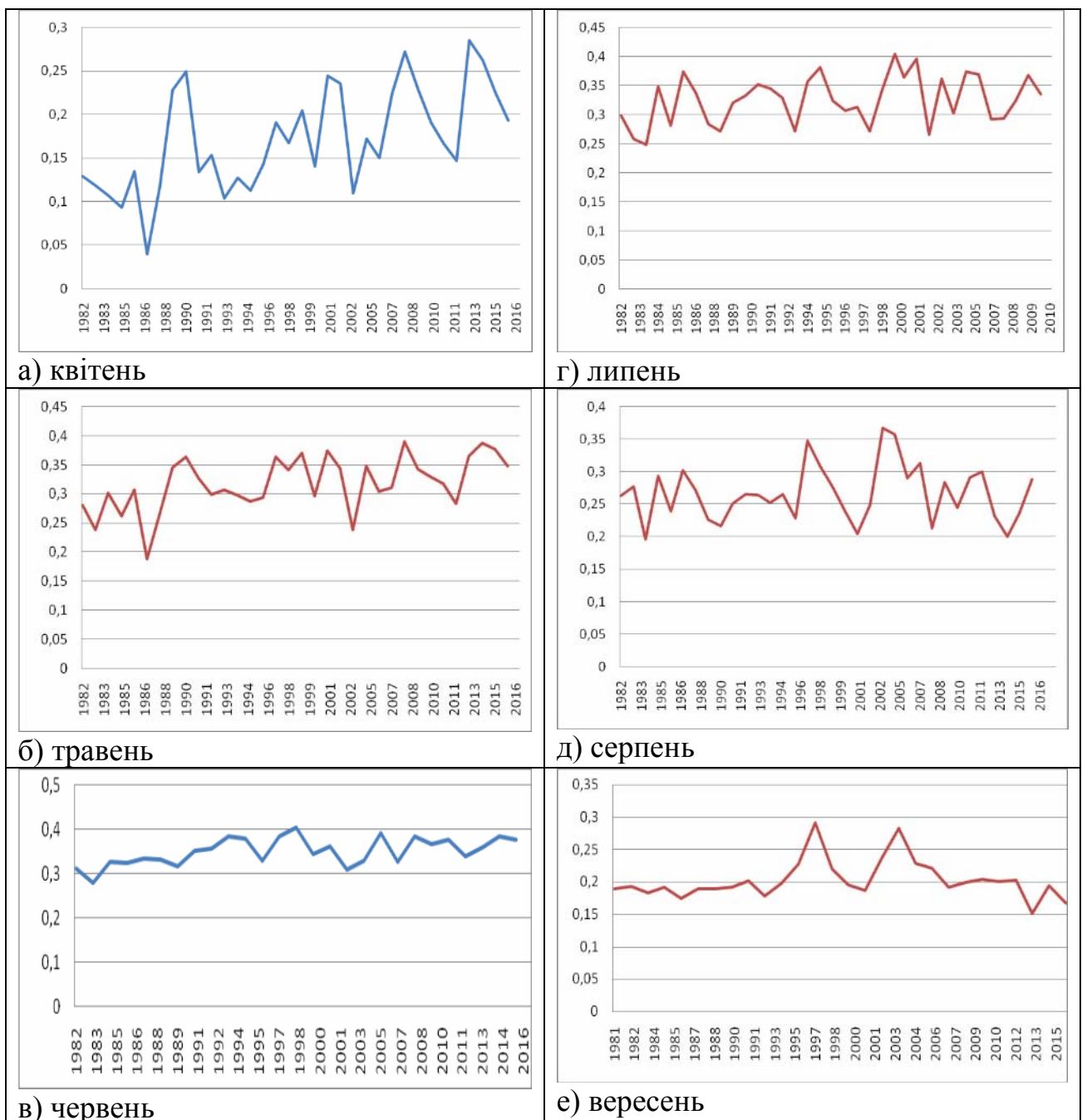


Рис. 3.6 – Графіки часового ходу індексу NDVI з лінійним трендом в Дніпропетровській області за місяці вегетаційного сезону (квітень-вересень) 1985-2015 рр.

Донецька область

На графіку часового ходу індексу NDVI в Донецькій області у квітні (рис. 3.7, а) мінімум спостерігався в 1986 році і складав 0,04, максимум складав 0,27 та спостерігався у 2013 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення підвищуються протягом досліджуваного періоду.

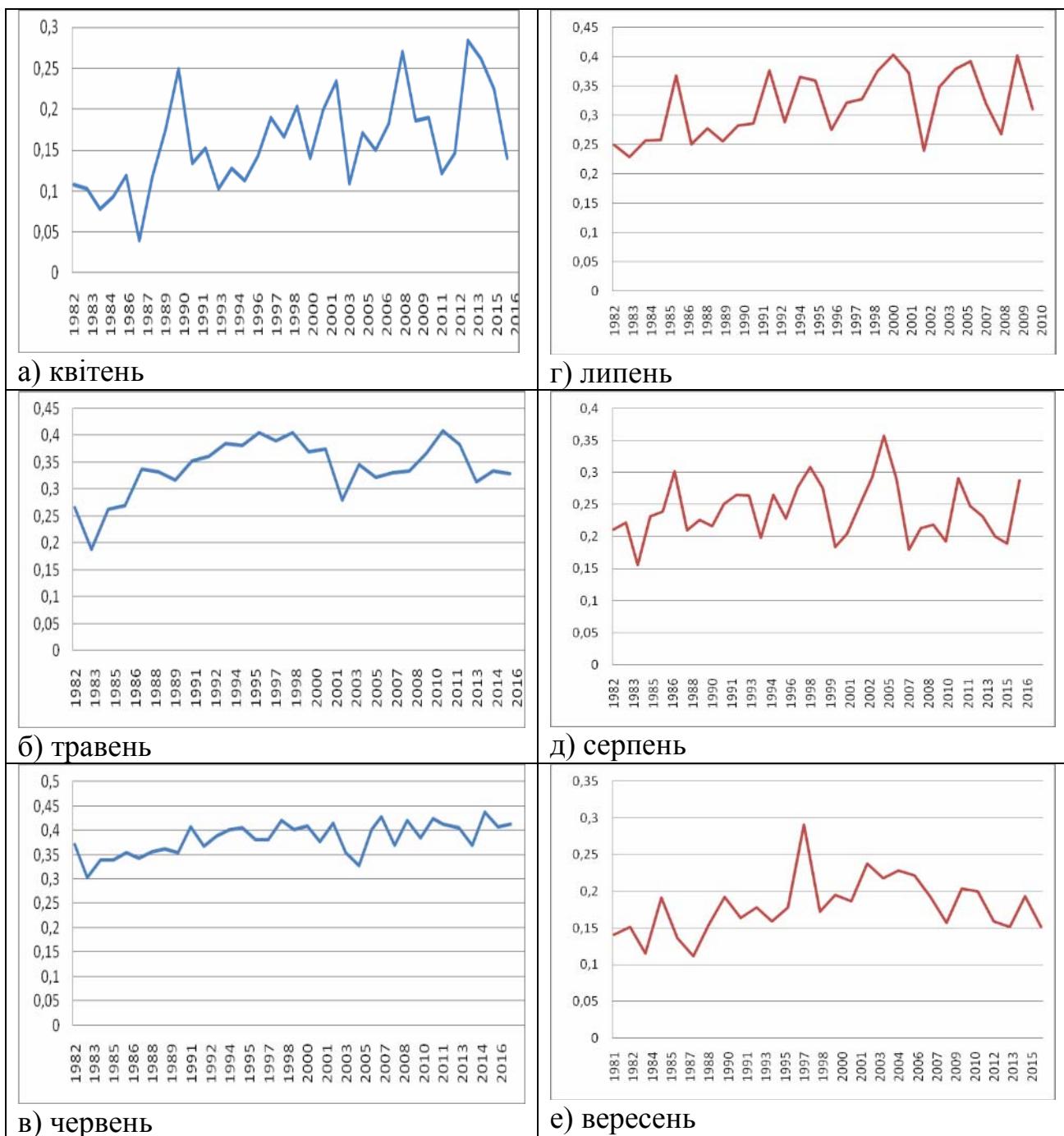


Рис. 3.7 – Графіки часового ходу індексу NDVI з лінійним трендом в Донецькій області за місяці вегетаційного сезону (квітень-вересень) 1985-2015 pp.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Донецькій області у травні (рис. 3.7, б) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 0,14, максимум складав 0,41 та спостерігався у 2010 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення слабко підвищуються протягом досліджуваного періоду.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Донецькій області за червень (рис. 3.7, в) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 0,30, максимум складав 0,44 та спостерігався у 2014 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення слабко підвищуються протягом досліджуваного періоду.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Донецькій області у липні (рис. 3.7, г) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 0,24, максимум складав 0,4 та спостерігався у 2009 році. За лінією тренда бачимо, що осереднені значення майже не змінювалися протягом досліджуваного періоду.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Донецькій області за серпень (рис. 3.7, д) мінімум спостерігався в 1983 році і складав 0,16, максимум складав 0,36 та спостерігався у 2005 році. За лінією тренда осереднені значення майже не змінювалися протягом досліджуваного періоду.

На графіку часового ходу індексу NDVI в Донецькій області у вересні (рис. 3.7, е) мінімум спостерігався в 1987 році і складав 0,12, максимум складав 0,28 та спостерігався у 1997 році. Як і у серпні, не спостерігається тенденцій у зміні осереднених значень індексу протягом досліджуваного періоду, але помітне деяке їх зменшення наприкінці періоду.

3.3 Аналіз статистичних характеристик VCI та NDVI

Розглянемо статистичні характеристики *індексу VCI* для областей південного сходу України, представлені у табл. 3.1. Як можна бачити, найменші середні значення VCI спостерігаються в усіх областях у вересні (42,6-49,1%), максимум доводиться на травень в Донецькій області (61,5%), Дніпропетровській (57,4%) та Запорізькій (57,4%) областях.

Мінімальні значення VCI в Запорізькій області коливаються від 0,2% в квітні до 15,6% в липні, в Дніпропетровській області від 1,0% у квітні до 21,5% в серпні, і в Донецькій області від 0,01% в квітні до 15,1% в вересні. Загалом, найменші значення VCI спостерігаються у квітні по всіх областях.

Максимальні значення VCI в Запорізькій області коливаються від 86,4% в червні до 94,7% у вересні, в Дніпропетровській області від 87,5% в травні до 90,9% в квітні, і в Донецькій області від 84,2% в червні до 94,9% в травні.

Таблиця 3.1 – Статистичні характеристики індексу VCI (VCI_{cp} - середнє, VCI_{min} – мінімальне, VCI_{max} – максимальне, δ – стандартне відхилення) по південному сходу України для місяців вегетаційного сезону періоду 1985-2015 рр.

Місяць	Запорізька область				Дніпропетровська область				Донецька область			
	VCI_{cp}	VCI_{min}	VCI_{max}	δ	VCI_{cp}	VCI_{min}	VCI_{max}	δ	VCI_{cp}	VCI_{min}	VCI_{max}	δ
Квітень	51,7	0,2	92,5	22,1	50,9	0,1	90,9	22,8	53,9	0,01	93,4	22,1
Травень	57,4	3,9	87,5	19,2	57,4	4,0	87,5	19,2	61,5	0,7	94,9	19,5
Червень	56,0	6,7	86,4	19,1	57,3	16,8	88,8	20,5	48,7	11,3	84,2	18,0
Липень	53,3	15,6	88,1	20,4	55,7	10,7	88,1	21,6	58,6	10,5	84,9	19,4
Серпень	48,9	13,7	89,9	19,9	50,3	21,5	91,4	21,5	52,4	9,9	94,9	18,8
Вересень	42,6	7,7	94,7	17,9	47,7	11,0	89,4	19,5	49,1	15,1	91,6	18,3

Найменші стандартні відхилення спостерігаються в літні місяці, а в Запорізькій області – у вересні, тобто мінливість вегетаційного індексу в цей період найменша. Максимальні значення δ доводяться на квітень по усім областям в Запорізькій (22,1%), в Дніпропетровській (22,8%) та Донецькій (22,1%) областях.

Далі проведемо аналогічний аналіз статистичних характеристик **індексу NDVI** для областей південного сходу України, наведених у табл. 3.2. Як можна бачити, найменші середні значення NDVI спостерігаються в усіх областях у квітні (0,16-0,18), що відповідає відсутності ще розвинутого рослинного покрову. Максимум доводиться на червень в усіх областях - Запорізькій (0,41), Дніпропетровській (0,44) та Донецькій (0,44).

Мінімальні значення NDVI в Запорізькій області коливаються від 0,04 в квітні до 0,25 в липні, в Дніпропетровській області від 0,04 у квітні до 0,29 в червні, і в Донецькій області від 0,04 у квітні до 0,27 в липні. Загалом, найменші значення NDVI спостерігаються у квітні місяці.

Максимальні значення NDVI в Запорізькій області коливаються від 0,3 у квітні до 0,41 у червні, в Дніпропетровській області від 0,28 у квітні до 0,44 у червні, і в Донецькій області від 0,27 у квітні до 0,44 у червні.

Таблиця 3.2 – Статистичні характеристики індексу NDVI ($NDVI_{cp}$ - середнє, $NDVI_{min}$ – мінімальне, $NDVI_{max}$ – максимальне, δ - стандартне відхилення) по південному сходу України для місяців вегетаційного сезону періоду 1985-2015 рр.

Місяць	Запорізька область				Дніпропетровська область				Донецька область			
	$NDVI_{cp}$	$NDVI_{mi}$	$NDVI_{m}$	δ	$NDVI_{cp}$	$NDVI_{mi}$	$NDVI_{m}$	δ	$NDVI_{cp}$	$NDVI_{mi}$	$NDVI_{m}$	δ
Квітень	0,18	0,04	0,30	0,06	0,17	0,04	0,28	0,06	0,16	0,04	0,27	0,05
Травень	0,32	0,19	0,40	0,05	0,32	0,19	0,40	0,05	0,32	0,17	0,42	0,05
Червень	0,35	0,25	0,41	0,04	0,37	0,29	0,44	0,04	0,38	0,30	0,44	0,03
Липень	0,33	0,25	0,40	0,04	0,35	0,27	0,43	0,05	0,37	0,27	0,42	0,04
Серпень	0,27	0,20	0,40	0,04	0,31	0,25	0,40	0,04	0,31	0,22	0,4	0,04
Вересень	0,20	0,13	0,30	0,03	0,23	0,16	0,30	0,04	0,24	0,17	0,31	0,04

Найменші стандартні відхилення спостерігаються в літні місяці, а в Запорізькій області – у вересні, тобто мінливість вегетаційного індексу в цей період найменша. Максимальні значення δ доводяться на квітень по усім областям і коливаються в межах 0,05-0,06.

4 ОЦІНКА ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО РОЗПОДІЛУ ПОСУХ ПО ПІВДЕННОМУ СХОДУ УКРАЇНИ

4.1 Оцінка посушливих умов за допомогою метеорологічного індексу посух SPEI

Для оцінки часового ходу посушливих епізодів в літні місяці досліджуваного періоду 1985-2015 рр. були обрані дані стандартизованого індексу опадів-евапотранспірації SPEI, осереднені по кожній області, з бази даних SPEI Глобальний моніторинг посух (SPEI Global Drought Monitor, <http://spei.csic.es/map/maps.html>), де оцінка потенційної евапотранспірації (PET) проводиться за допомогою метода Торнвейта. В даному дослідженні використані дані на масштабі 1 місяць для оцінки розподілу посух по місяцях літнього періоду.

Як випливає з табл. 1.1 (розділ 1), посухам відповідають від'ємні значення індексу SPEI, тому на графіках часового ходу виведено лише інформацію, коли індекс був від'ємним. Інтенсивність посухи буде визначатися відповідно цих критеріїв індексу SPEI: м'яка посуха $-0,99 \dots 0,00$; помірна посуха $-1,49 \dots -1,00$; сильна посуха $-1,99 \dots -1,50$; екстремальна посуха $\leq -2,00$.

На рис. 4.1 наведено часовий розподіл від'ємного індексу SPEI для червня по південно-східних областях. Можна бачити, що посушливими червні були в 13 роках в Дніпропетровській і Запорізькій областях, та в 11 роках – в Донецькій області. Загалом, по всіх областях переважали м'які посухи ($SPEI > -0,99$). Помірні посухи ($-1,49 < SPEI < -1,00$) спостерігалися в усіх областях три-четири рази – у 1998, 1999, 2012 рр. При цьому в червні 1999 і 2009 рр. посуха була сильною ($-1,50 < SPEI < -1,99$) в Донецькій області, а в червні 1999 р. – Запорізькій області. Екстремальних посух в червні не спостерігалося.

Якщо розглядати повторюваність по роках, то можна бачити, що в першу половину досліджуваного періоду з 1985 по 1994 рр. посухи в червні майже не спостерігалися, або були слабкими в 1 році. Але починаючи з 1995 р. повторюваність посух зростає, а з 2007 р. і до 2015 р. майже всі червні

по всіх трьох областях були посушливими, при цьому інтенсивність посух загалом також зросла порівняно з попереднім періодом.

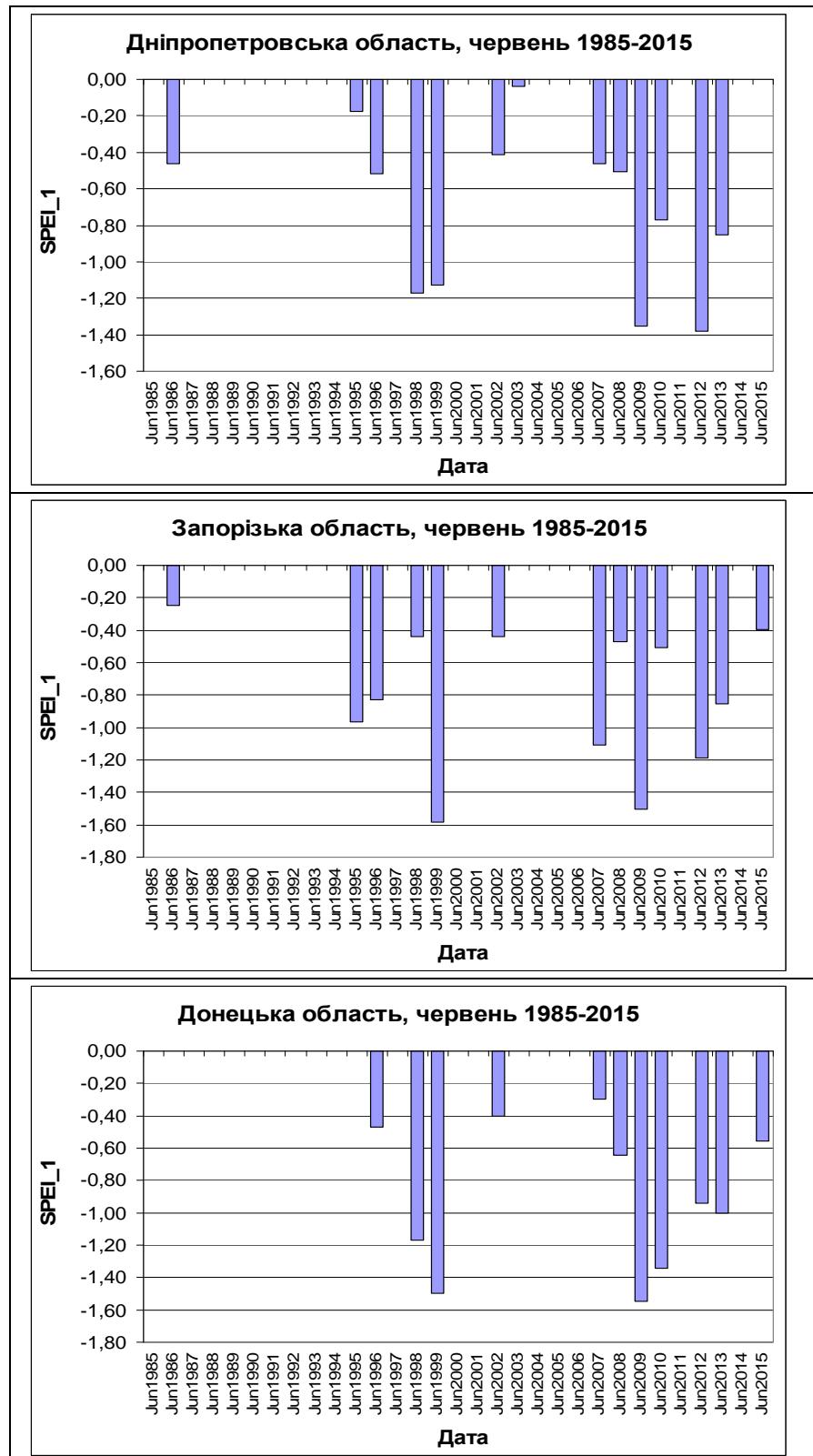


Рис. 4.1 – Часовий хід індексу SPEI в південно-східних областях України в червні 1985-2015 pp.

На рис. 4.2 наведено часовий розподіл від'ємного індексу SPEI для липня по південно-східних областях. Можна бачити, що посушливими липні були в 21 роках в Дніпропетровській і Запорізькій областях, та в 20 роках – в Донецькій області. Загалом, по всіх областях переважали м'які посухи ($SPEI > -0,99$). Помірні посухи ($-1,49 < SPEI < -1,00$) спостерігалися в загалом у Дніпропетровській області у 1994, 1995, 1996, 2014, 2016 рр. Сильні посухи ($-1,50 < SPEI < -1,99$) були в Дніпропетровській області у 2001 та 2007 рр., в Донецькій області у 1996, 2001, 2007 рр., в Запорізькій області у 1996, 2007, 2012 рр. Екстремальна посуха в липні спостерігалась в Запорізькій області у 2001 році.

Якщо розглядати повторюваність по роках, то можна бачити, що посухи в липні в трьох областях повторюються у 1996, 2001 та 2007 рр., в ці роки їх інтенсивність також велика. Загалом, протягом досліджуваного періоду не виділяється окремих періодів з великою повторюваністю посух в липні, однак з 1993 по 2002 рр. та з 2005 по 2016 рр. в усіх областях кількість та інтенсивність посух дещо вище, ніж в проміжні періоди часу.

На рис. 4.3 наведено часовий розподіл від'ємного індексу SPEI для серпня по південно-східних областях. Можна бачити, що посушливими серпні були в 17 роках в Дніпропетровській області, 19 роках в Запорізькій області, та в 19 роках – в Донецькій області. Як і в інші місяці, по всіх областях переважали м'які посухи ($SPEI > -0,99$). Помірні посухи ($-1,49 < SPEI < -1,00$) спостерігалися в усіх областях три-чотири рази – у 1986, 1992, 2007, 2017 рр. При цьому в липні 1992 і 2008 рр. посуха була сильною ($-1,50 < SPEI < -1,99$) в Дніпропетровській області, а в серпні 2007 та 2008 рр. – Запорізькій області. Екстремальні посухи були у 2010 році по всім областям.

Якщо розглядати повторюваність по роках, то можна бачити, що протягом першої половини досліджуваного періоду посушливі роки чергувалися з такими, в яких посуха була відсутня, а інтенсивність посух не перевищувала помірної. Починаючи з 2005 р. посуха в усіх областях спостерігалася в серпні щорічно, за виключенням 2012 р., а її інтенсивність досягала сильної та екстремальної.

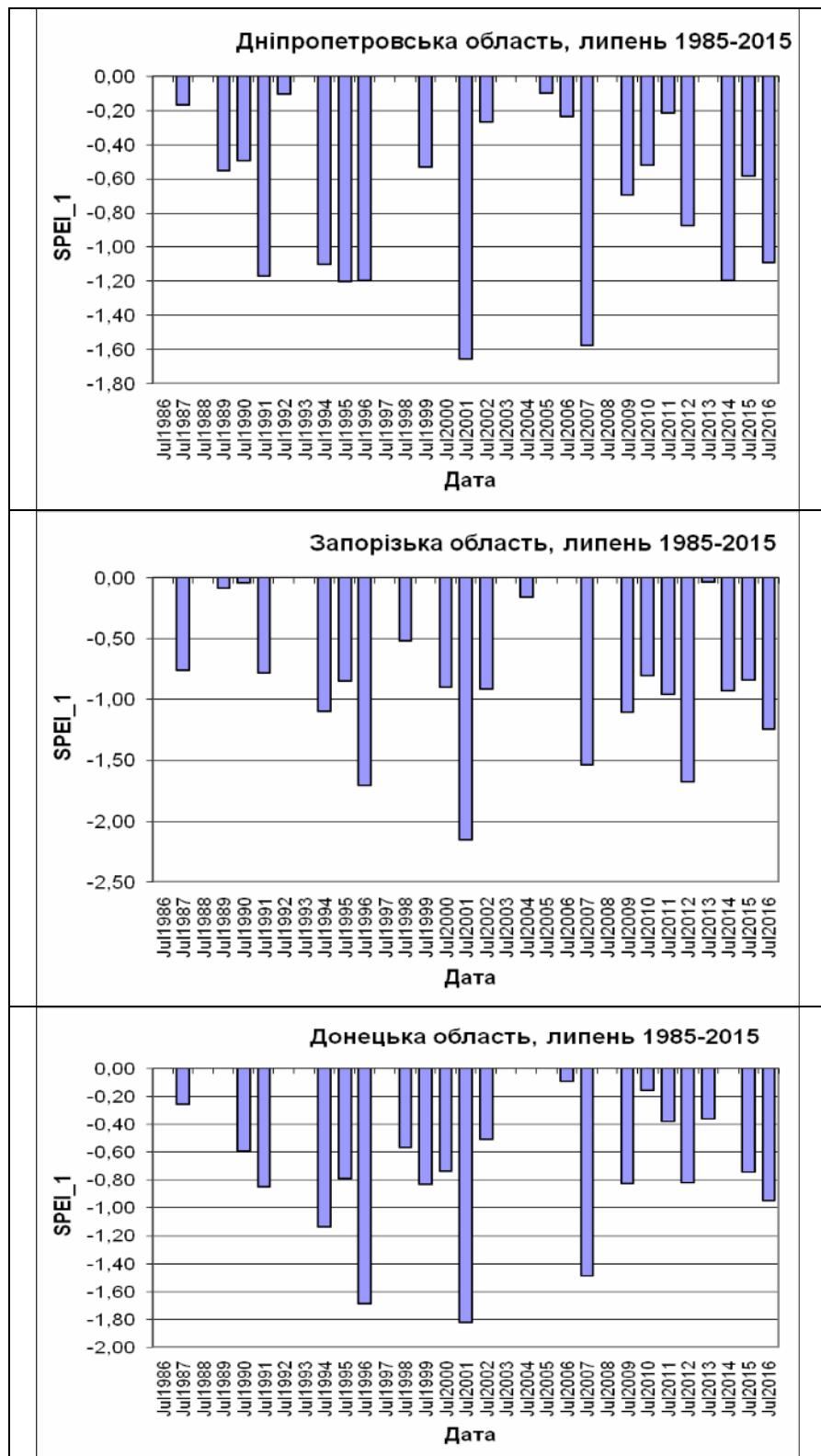


Рис. 4.2 – Часовий хід індексу SPEI в південно-східних областях України в липні 1985-2015 рр.

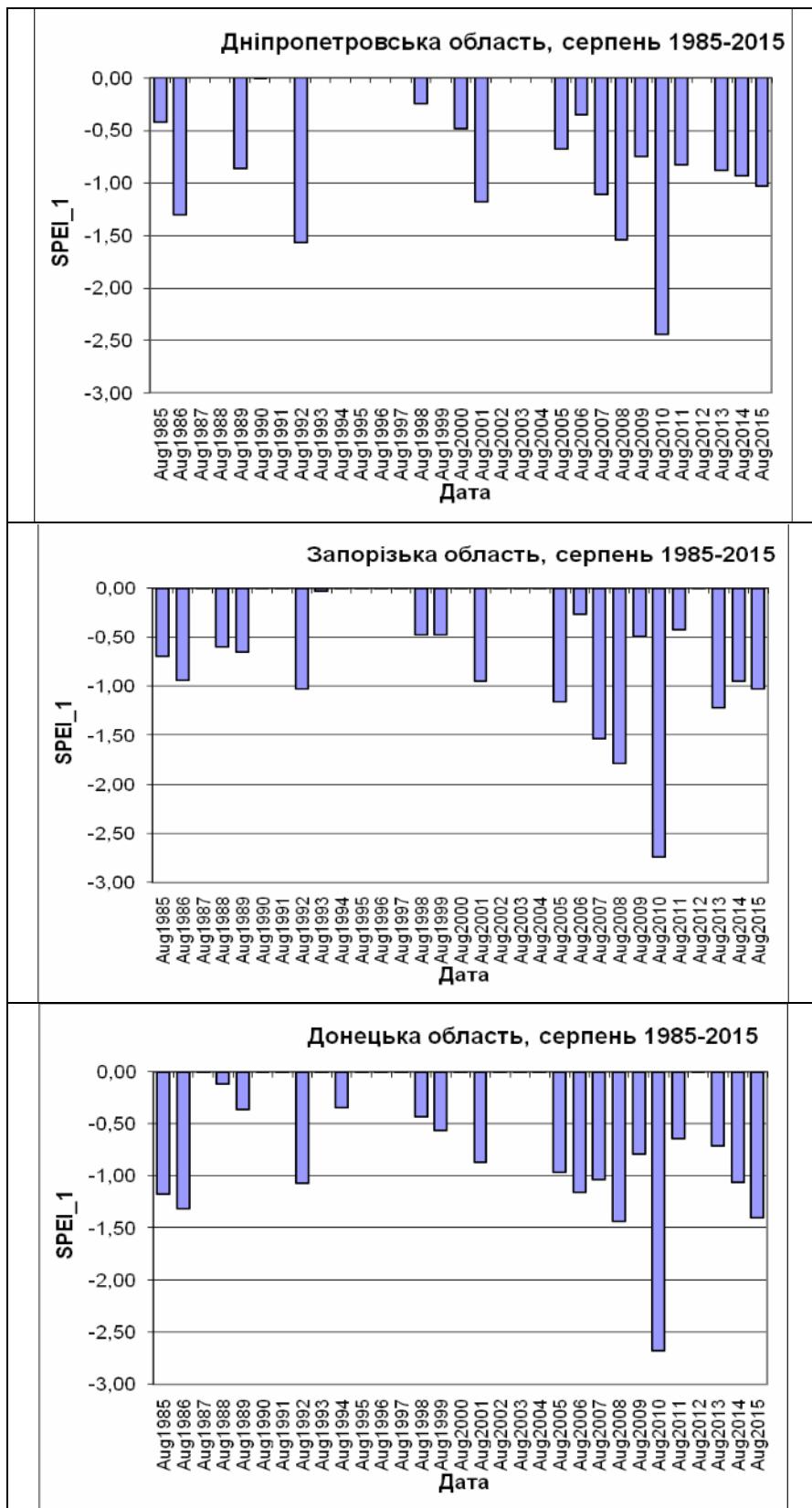


Рис. 4.3 – Часовий хід індексу SPEI в південно-східних областях України в серпні 1985-2015 рр.

В табл. 4.1 представлена 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 (оцінені за t-тестом) спостерігаються лише для Донецької області в червні, при цьому кореляційний зв'язок зворотний. В інші місяці кореляційний зв'язок між параметрами слабкий та незначущий.

Таблиця 4.1 – Коефіцієнти кореляції між SPEI та VCI по південно-східним областям України за період 1985-2015 рр.

Область	Місяць		
	червень	липень	серпень
Дніпропетровська	- 0,21	0,25	0,28
Запорізька	0,10	0,25	0,25
Донецька	-0,42	0,23	0,12

Слабкий кореляційний зв'язок можна пояснити тим, що незважаючи на східну площину 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. Спутниковий 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 метеорологічних умов набагато вище, ніж метеорологічних індексів посухи, таких як VCI.

4.2 Міжрічна та сезонна повторюваність посух вегетаційного періоду

Використовуючи в якості критерію посух значення $VCI \leq 30$, визначимо, як часто спостерігалися посухи в розглянуті місяці досліджуваного періоду в різних областях південного сходу України. В табл. 4.2 представлени результати щодо повторюваності посушливих місяців в певні роки періоду 1985-2015 рр.

В квітні посухи спостерігалися в 6 роках в Запорізькій та Дніпропетровській областях, та в 4 роках в Донецькій області. Одночасно по трьох областях посухи були у 1985-86 рр. та 1993 р.

В травні посухи відмічалися в кожній області в 2-3 роках, при цьому одночасно в усіх областях лише у 1986 р.

Таблиця 4.2 – Повторюваність років з посухою ($VCI \leq 30$) в різні місяці вегетаційного сезону по південно-східних областях України за період 1985-2015 рр.

Місяць	Запорізька область	Дніпропетровська область	Донецька область
Квітень	1983, 1985, 1986, 1993, 1994, 2002	1984, 1985, 1986, 1993, 1994, 2002	1982, 1985, 1986, 1993
Травень	1983, 1986, 2002	1983, 1986, 2002	1986, 1987
Червень	1983, 2003, 2007	1983, 1985, 2003, 2007	1983, 2005
Липень	1983, 1984, 1985, 1989, 1993, 1998, 2002	1983, 1985, 1989, 2002	1983, 1988
Серпень	1983, 1989, 1990, 1996, 2008, 2014	1983, 1986, 1988, 1989, 2013	1983, 1990, 1996, 2014
Вересень	1984, 1986, 1988, 1992, 2001, 2013	1986, 1992, 2002, 2013	1981, 1985, 1986, 1990, 1989, 2013

В південно-східних областях спостерігалося від 2 до 4 червнів місяців з посухою, при цьому одночасно в трьох областях посуха була у 1983 р., а в двох областях (Запорізька та Дніпропетровська) посуха одночасно спостерігалася у 2007 р. та 2003 р.

В липні найбільша кількість посух спостерігалася в Запорізькій області – 7 років, і лише в двох роках – в Донецькій області. По всіх трьох областях посуха була у 1983 р.

В серпні кількість років з посухою коливалася від 6 у Запорізькій області до 4 в Донецькій області. В усіх трьох областях посуха спостерігалася в цьому місяці у 1983 та 1986 рр.

У вересні по 6 посушливих років спостерігалося в Запорізькій та Донецькій областях та 4 роки – в Дніпропетровській. Одночасно по трьох областях посуха була у вересні 1986 р.

Таким чином, аналіз повторюваності посух по різних місяцях за допомогою вегетаційного індексу VCI показав, що найбільш часто посуха зустрічалася в серпні та вересні – до 5-6 років, в інших місяцях середня повторюваність посух становила 3-4 рази за досліджуваний 30-ти річний період. Найбільш посушливими виявилися: квітень 1985 р., червень 2007 р., вересень 1992 р. Загалом, особливо посушливою видалася весна 1986 р., літо 1983 та 1989 рр. та початок осені 2013 р.

ВИСНОВКИ

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

1. Аналіз часового ходу індексів NDVI та VCI показав, що протягом розглянутого періоду по всіх областях спостерігалося підвищення значень індексів майже в усі місяці вегетаційного сезону. Найбільша інтенсивність зростання припадає на квітень і травень, що може свідчити про те, що настання весни з кожним роком від початку досліджуваного періоду відбувалося все раніше, тому рослинність в ці місяці розвивалася більш інтенсивно, ніж на початку періоду дослідження. В червні та особливо в липні тренди зростання індексів уповільнюються, а в серпні-вересні тенденція до збільшення індексу NDVI та VCI майже зникає, а в деяких випадках навіть стає від'ємною (наприклад, Дніпропетровська область), тобто умови вегетації наприкінці вегетаційного сезону майже не змінювалися.

2. Аналіз статистичних характеристик показав, що абсолютні середні максимуми VCI відмічаються переважно навесні (квітень- травень) і становлять 57-61%, але можуть припадати й на кінець вегетаційного сезону. Найбільш посушливим, за середнім значенням VCI, в Запорізькій і Дніпропетровській областях виявлено вересень, коли середні значення індексу коливалися в межах 42-47%, а в Донецькій області – червень та вересень (48% та 49% відповідно).

Мінімальні середні значення індексу NDVI в усіх областях припали на квітень (0,16-0,18). Максимальні середні значення NDVI припадають в усіх областях на червень та коливаються в межах 0,35-0,37. При цьому абсолютні максимуми найвищі в Дніпропетровській та Донецькій областях і досягають 0,44 в червні.

За значеннями стандартного відхилення визначено, що найбільша мінливість індексу VCI, як і NDVI, спостерігається у квітні, що відповідає мінливим погодним умовам в цю пору року, а найменша – припадає на липень, а в Запорізькій області й у вересні, що характеризує ці місяці як такі, яким відповідають найбільш стійкі погодні умови.

3. Проведений аналіз часового ходу метеорологічного індексу посух SPEI в обраних областях в літній період показав, що протягом тридцятирічного періоду спостерігалося наростання повторюваності посух в червні та серпні, та майже не змінювалася частота посух від початку періоду до кінця в липні.

У червні в період по 1994 рр. посухи майже не спостерігалися, але починаючи з 1995 р. повторюваність посух зростає, і з 2007 р. майже всі червні по всіх трьох областях були посушливими. У липні виділяються періоди з 1993 по 2002 рр. та з 2005 по 2016 рр., коли в усіх областях кількість та інтенсивність посух дещо вище, ніж в проміжні періоди часу. А в 2001 р. в Запорізькій області спостерігалася екстремальна посуха у липні. В серпні, починаючи з 2005 р. посуха в усіх областях спостерігалася щорічно, а її інтенсивність досягала сильної та екстремальної.

4. Порівняння супутникового вегетаційного індексу VCI з метеорологічним індексом посух SPEI за допомогою кореляційного аналізу показало, що статистичний зв'язок між ними є слабким. Значущі коефіцієнти кореляції спостерігаються лише для Донецької області в червні, при цьому кореляційний зв'язок зворотний (-0,42). Слабкий кореляційний зв'язок можна пояснити більш високою чутливістю супутникового вегетаційного індексу VCI до поточних погодних умов через високу дискретність (один тиждень) порівняно з метеорологічним індексом посух.

5. Аналіз повторюваності посух по місяцях вегетаційного сезону за досліджуваний період показав, що найбільш часто посуха в південно-західних областях України траплялася в серпні та вересні – до 5-6 років за період, в інших місяцях середня повторюваність посух становила 3-4 рази. Одночасно по всіх трьох південно-східних областях посуха спостерігалася у квітні 1985-1986 рр. та у 1993 рр., у травні 1986 р., у липні 1983 р., у серпні 1983 та 1986 рр., у вересні 1986 р.

Таким чином, результати даного дослідження свідчать про те, що супутникові вегетаційні індекси є зручними для оцінки посушливого стану як поточних погодних умов, так й кліматичних, тому їх можна рекомендувати для моніторингу посух в оперативних умовах.

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.: Гидрометеоиздат, 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.Школьний Є.П., Лоєва 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
Делінського Дмитра Сергійовича

на тему „Спутниковий моніторинг посух в південно-східних областях
України”

1. Результати магістерської роботи отримані в рамках науково-дослідної роботи кафедри метеорології та кліматології “Просторово-часова динаміка екстремальних погодних явищ в Україні за умови змін клімату” (2016-2019 рр., № ДР 0116U002403). Зроблений в роботі аналіз динаміки посушливих місяців вегетаційного сезону за період 1985-2015 рр. на південному сході 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:

- 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